

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Kangean Energy Indonesia Ltd yang merupakan perusahaan gas swasta yang memproduksi *dry gas* (gas kering). Sumbernya berupa gas alam dari sumur yang disebut *natural gas* yang sumbernya berasal dari wilayah pagerungan besar. Kangean Energy Indonesia Ltd tidak hanya menghasilkan gas kering saja, *liquified petroleum gas* dan *condensat* pernah diproduksi tetapi saat ini lpg plant sudah berhenti beroperasi. Dalam menunjang proses produksi dan kehidupan pulau pagerungan besar, plant yang beroperasi 24 jam ini disuplay dengan sistem pembangkit sendiri, yaitu 2 unit *Saturn 20 gas turbine generator* dan 3 unit *3512 caterpillar gas engine generator set*.

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanikal, teorinya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal. Sumber energi mekanik bisa berupa resiprokat maupun turbin. Pada lapangan pagerungan di gunakan gas turbin dan gas engine sebagai penggerak generator.

Sistem pembangkitan listrik yang sudah umum digunakan adalah mesin generator tegangan AC, di mana penggerak utamanya bisa berjenis mesin turbin, mesin diesel atau mesin baling-baling. Dalam pengoperasian pembangkit listrik dengan generator, karena faktor keandalan dan fluktuasi jumlah beban, maka disediakan dua atau lebih generator yang dioperasikan dengan tugas terus-menerus, cadangan dan bergiliran untuk generator-generator tersebut. Penyediaan generator tunggal untuk pengoperasian terus menerus adalah suatu hal yang riskan, kecuali bila bergilir dengan sumber PLN atau peralatan UPS. Untuk memenuhi peningkatan beban listrik maka generator-generator tersebut dioperasikan secara sinkron antar generator atau operasi sinkron generator dengan sumber pasokan lain yang lebih

besar misalnya dari PLN. Sehingga diperlukan pula sistem pembagi daya listrik untuk mencegah adanya sumber tenaga listrik terutama generator yang bekerja paralel mengalami beban lebih mendahului yang lainnya.

Apabila suatu generator yang bekerja secara paralel yang mengalami gangguan, maka generator tersebut dihentikan, dengan demikian daya listrik total yang dibangkitkan dari generator tersebut menjadi berkurang. Dalam pengoperasian generator yang bekerja paralel, diperlukan suatu sistem pengontrolan yang baik sehingga operasi pembagian beban untuk menjaga kontinuitas pelayanan dapat tercapai.

Dalam melaksanakan penelitian dan penulisan tugas akhir (skripsi) ini, penulis menggunakan jurnal internasional sebagai tinjauan pustaka dan sumber dalam pemahaman teori dan analisis yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Dibawah ini merupakan jurnal – jurnal yang berkaitan dengan judul penulis.

Jurnal internasional yang ditulis oleh S.Z. Vijlee, A. Ouruoa, L.N. Domaschk, and J.H. Beno (Naval Research, US) 2007 dengan judul “*Directly-Coupled Gas Turbine Permanent Magnet Generator Sets For Prime Power Generation On Board Electric Ships*” menjelaskan tentang turbin gas generator yang digunakan untuk mensuplai kebutuhan energi listrik pada kapal *US NAVY*. Parameter nya adalah Jenis penggerak, Jumlah penggerak, Metode kopling, Tipe dan Topologi generator, Kecepatan putaran, Tegangan dan Frekwensi.

Jurnal internasional yang ditulis oleh Dipl. -Ing. Tobias Vogel, Dr. -Ing. Gerd Oeljklaus, Univ. Prof. Dr. -Ing. Habil Klaus Görner, University of Duisburg-Essen 2016. Dr. -Ing. Thoomas Polklas, Dipl. -Ing Christian Frekers (MAN Deisel & Turbo SE) dengan judul “*Comparative Study of Gas Engines and Gas Turbines in CO generations (CHP) Using the Example of Typical Public District Heat Distribution Network*” menjelaskan tentang pemanfaatan gas buang dari *gas engine* dan *gas turbine* untuk menghasilkan uap dengan tambahan boiler. Parameter nya

adalah uap yang dihasilkan dengan pemanasan gas buang digunakan untuk memutar turbin uap sebagai *back pressure*.

Jurnal internasional yang ditulis oleh Lee S. Langston (University of Connecticut) IGTI, ASME 2013 dengan judul "*The Adaptable Gas Turbine*" menjelaskan tentang performa *gas turbine* sebagai tenaga pendorong pesawat dan penghasil energi listrik. Parameter nya perbedaan *gas turbine* yang digunakan untuk pesawat terbang dan *gas turbine* untuk penggerak generator.

Jurnal internasional yang ditulis oleh Yousef Almarzooq 2011 dengan judul "*One of The Most Important Turbine (Gas Turbine)*" menjelaskan tentang aplikasi *gas turbine* untuk pesawat terbang dan penghasil listrik. Parameter nya skema pemanfaatan *gas turbine*, dan operasi pemanfaatan putaran shaft generator.

Jurnal internasional yang ditulis oleh Dolotovskii, E Larin (Gagarin Saratov State Technical University Rusia) 2017. Dengan judul "*Stabilization of Gas Turbine Unit Power*". Menjelaskan tentang kombinasi unit *gas turbine* dan unit tenaga uap untuk menghasilkan tambahan energi listrik. Parameter nya yaitu struktur *gas engine plant* dan kalkulasi ekonomis dan teknis energi listrik yang di hasilkan.

Jurnal internasional yang ditulis oleh Kyong Hee Kim, Changsok Yoo. (Seoul National University South Korea) 2013 dengan judul "*A Feasibility Study on Natural Gas Power Plant Project in the DPRK Under the CDM Scheme and Grid Connection*". Menjelaskan tentang gas alam sebagai bahan bakar *gas turbine* untuk menghasilkan listrik dengan parameter gas buang memepengaruhi lingkungan sekitar, gas alam sebagai bahan bakar ramah lingkungan.

Jurnal internasional yang ditulis oleh O. R. AL-Hamdan, A. A. Saker (High Institute Energy of Kuwait) 2013 dengan judul "*Studyng the Role Played By Evaporative Cooler On the Performance of GE Gas Turbine Existed in Shuaiba*

North Electric Generator Power Plant". Menjelaskan tentang analisis pengaruh udara sekitar sebagai pasokan udara pembakaran *gas turbine* generator. Parameternya adalah temperatur udara *main inlet compressor*, metode pengolahan temperature udara *compressor*.

Jurnal internasional yang ditulis oleh M. L. Elhafyani, S. Zounggar, M. Benkaddour, A. Aziz (University Mohammed Morroco) 2014. Dengan judul "*Behavior on Induction Generator Without and With Voltage Regulator*" menjelaskan tentang penggunaan *voltage regulator* pada generator pembangkit listrik tenaga angin. Parameternya yaitu variasi kecepatan angin variasi beban listrik, pengaruh menggunakan *voltage regulator* terhadap keluaran tegangan.

Julia Kurz, Martin Hoeger, Reinhard Niehuis (Bundeswehr University Munich, MTU aero Engines AG Germany) 2017 dengan judul "*Active Boundary Layer Control On Highly Loaded Turbine Exit Case Profile*" menjelaskan tentang analisis perubahan beban terhadap mesin pesawat terbang dengan *jet engine turbine*". Parameternya adalah efek kerja *jet engine* terhadap variasi beban.

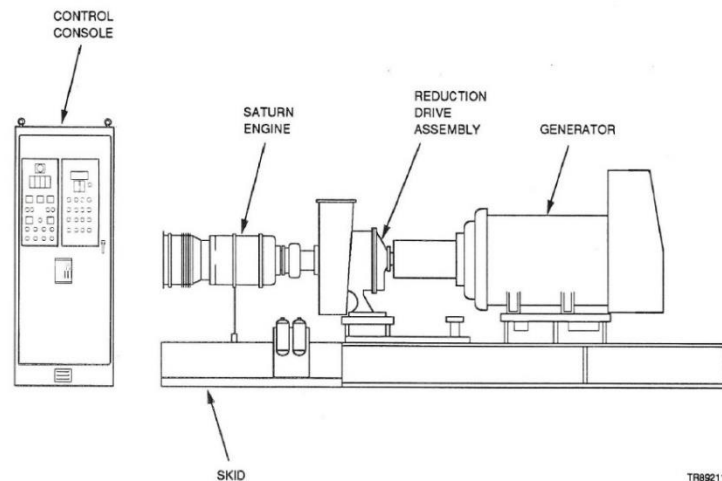
Ari Saikkonen, Tom Kaas (Wartsila Technical Journal) 2012 dengan judul "*Analogue Isochronous Load Sharing and UNIC*". Menjelaskan tentang generator yang bekerja dengan *mode isochronous*. Parameternya adalah *load sharing system*, tujuan operasi *isochronous*.

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Saturn 20 Gas Turbine Generator

2.2.1.1. Definisi Turbin

Turbin adalah mesin yang digunakan untuk mengekstraksi kerja dari fluida kerjanya. Ada berbagai macam jenis turbin yang di telah dibuat. Tipe turbin dapat dibagi dari jenis fluida, tipe bilah, jumlah bilah maupun arah alirannya. Pembahasan mengenai turbin gas ini adalah *gas turbine generator Saturn 20 solar turbine company caterpilaar*.



Gambar 2.1. Saturn 20 Gas Turbine Generator Package

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Turbin gas adalah mesin yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dengan pembakaran dalam (*internal combustion*). Energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin di *couple* dengan *gear box reduction* untuk di turunkan putarannya sesuai dengan kebutuhan generator setelah itu dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan listrik. Turbin gas merupakan salah satu jenis mesin yang menggunakan metode *internal combustion engine* (mesin pembakaran dalam). Turbin gas bekerja dengan proses termodinamika yang dikenal sebagai *brayton cycle*. Siklus *brayton* memiliki beberapa tahap yaitu:

- *Compression*

Proses dimana udara atmosfer di kompresi hingga tekanan permintaan *combustion chamber*.

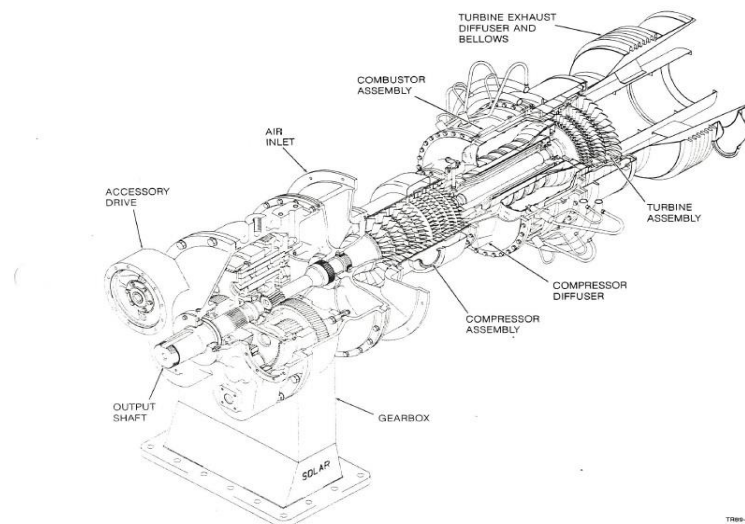
- *Combustion*

Proses dimana bahan bakar di campur dengan udara kompresi kemudian di injeksikan ke ruang bakar dan dinyalakan oleh *spark plug* *Expansion*. Proses dimana hasil pembakaran tereksansi dan memiliki energi kinetik dan digunakan untuk memutar turbin.

- *Exhaust*

Proses pembuangan hasil pembakaran setelah digunakan untuk memutar turbin oleh *discharge section*.

2.2.1.2. Komponen Utama Gas Turbin Air Inlet Assembly



Gambar 2.2. Saturn 20 gas Turbine Generator Assembly

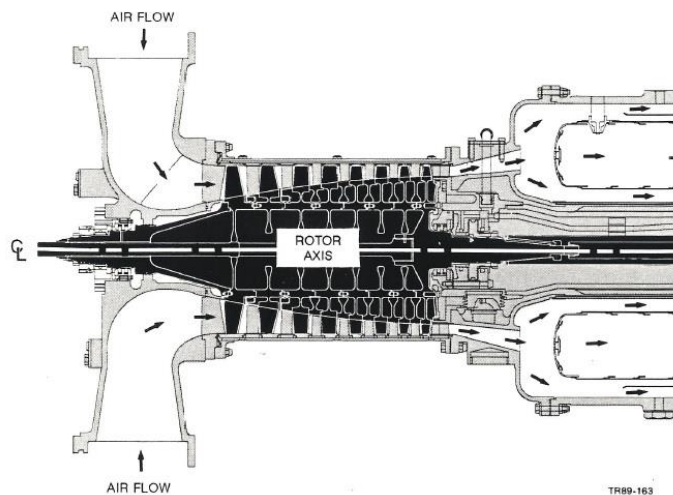
Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Komponen ini merupakan pintu masuk udara dari atmosfer ke *compressor* dengan 360°. *Air inlet assembly* ini bukan merupakan filter udara, melainkan pintu masuk sekaligus penyangga poros turbin.

1. The Axial Flow Compressor

Saturn 20 gas turbine generator menggunakan 8 stage axial compressor. "Axial Flow" merupakan bagian dari jalur udara yang mana udara tersebut dikompres dengan cara dialirkan lewat rotor compressor menabrak stator compressor dan dihasilkan udara dengan peningkatan tekanan dan penurunan kecepatan. Axial flow digunakan karena dapat memperkecil ruang aliran udara sehingga udara dikompres sedemikian rupa agar dapat digunakan untuk pembakaran dan pendinginan.

Copyright© 1990 by Solar Turbines Incorporated. All rights reserved.



Gambar 2.3 *Saturn 20 Compressor Axial Flow*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpillar USA*)

2. Compressor Stage

Rangkaian komponen dari *rotor compressor* terdiri dari 8 *stage rotor* dan 8 *stage stator*. *Rotor disk* berputar bersamaan untuk menekan aliran udara ke *stage* yang lebih sempit ruangnya. *Rotor* disangga oleh *bearing* dan ditopang oleh *skid* pada ujung ujungnya.

Blade stator dari *compressor* berbeda dengan *blade rotor compressor*. Perbedaannya yaitu apabila *blade rotor* berputar bersamaan untuk memberi dorongan terhadap aliran udara, *blade stator* tidak berputar dan mengambat aliran

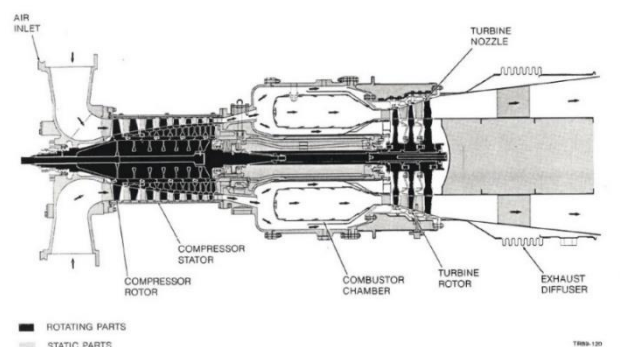
udara sampai ke stage 8 dengan ruang yang semakin sempit sehingga udara tersebut mengalami kompresi. Ukuran *blade turbine* sesuai dengan ilmu dan aturan aerofoil juga berbeda di setiap *stage* nya.

3. The Diffuser

The diffuser adalah bagian dari ujung aliran udara yang telah melewati proses kompresi oleh *compressor* sebelum menuju *combustion housing*. *Diffuser* bekerja mengalirkan udara bertekanan yang diperlukan oleh *combustion chamber* dan udara untuk pendinginan. Tekanan pada *diffuser* adalah tekanan yang dibutuhkan *combustion chamber* sehingga bagian ini merupakan komponen penting *gas turbine*. Tekanan referensi menjadi *set point compressor discharge pressure* dan pada *gas turbine generator* disebut Pcd.

4. Combustor Assembly

Combustor assembly merupakan komponen tempat terjadinya pencampuran udara dan *fuel* yang kemudian dibakar. Ruang bakar ini terdiri dari *case, dome, inner, outer, shrouds,* dan *cooling louvers*. Komponen tersebut dipasang di belakang *flange* dari *diffuser case* dan berada di depan *flange exhaust collector*. *Bosses* tersambung dengan *case* untuk *instalasi spark plug*. *Compressor discharge air lines* untuk mengontrol *system* dan pembuangan *fuel*.



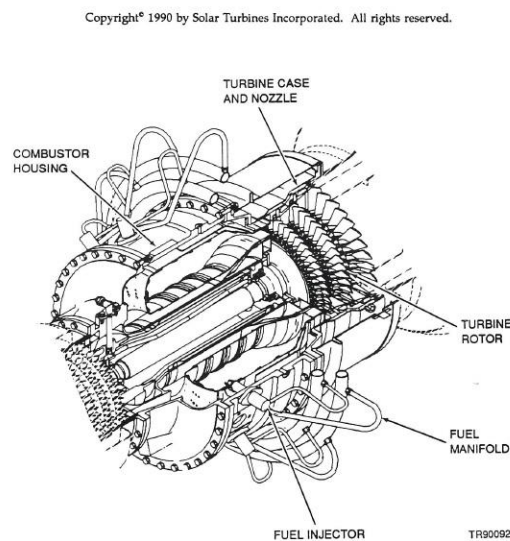
Gambar 2.4 Saturn 20 Combustor Diagram

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

12 *injector fuel* dipasang pada *bosses* menempel dengan *combustor housing* menonjol serta dibungkus oleh *combuster lines assembly*. Aliran akan melewati bidang lurus dengan tipe anular. *Manifold fuel* dan manifold udara menempel pada *circumference* yang merupakan bagian dari *combustor housing dual fuel engine*. *Liquid fuel* dibagi di *manifold fuel* dibawah *combustor housing*. Pipa yang mengalirkan fuel dengan ukuran bervariasi sesuai dengan kebutuhan menuju *manifold fuel injector*.

5. Turbine Asembly

Turbine assembly terdiri dari *turbine case*, *nozzles*, *balanced rotor assembly*, *exhaust diffuser assembly* dan *turbine output shaft*. *Turbine rotor* terdiri dari 3 *stage rotor disk* dengan *blade nya*. Komponen diatas dirangkai dengan *shaft turbine* menggunakan *bolt*. *Intermediate turbine shaft* disangga oleh *bearing* dan ditopang oleh *case*.



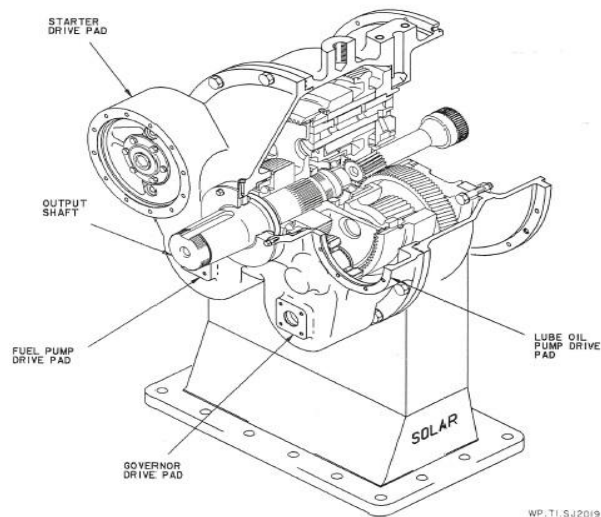
Gambar 2.5. Saturn 20 Turbine Asembly

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Bagian dari struktur tersebut disambung dengan *flange combustion housing*, dan *flange* akhirnya dihubungkan dengan *flange diffuser exhaust*. *Case turbine* terletak di *stage* ke 3 *stationary turbine nozzles* dengan *fan* yang menguntungkan karena dapat merubah arah aliran buangan lurus dengan *turbine blades*.

6. Accessory and Reduction Assembly

Keluaran dari rangkaian *gear* penurun putaran disambung dengan *mounting pads*. Aksesoris *drive mounting pads* dari mesin berada diantara *turbine* dan *generator*. Disana terdapat *starter unit*, *oil pump*, dan *liquid fuel pump*, serta aksesoris lainnya.

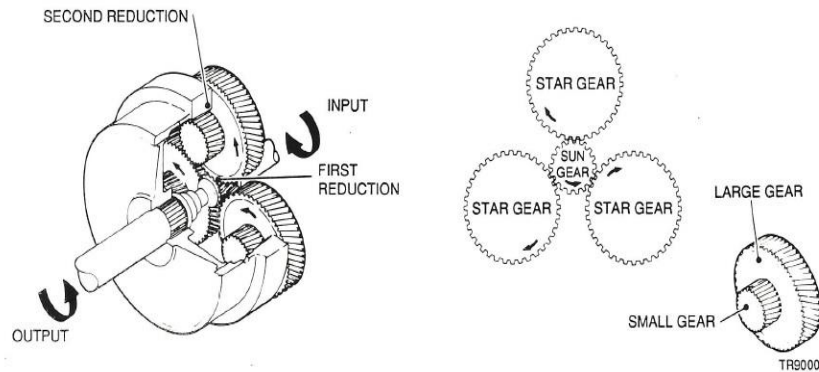


Gambar 2.6. *Saturn 20 Gear Reduce Asembly*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Gear disini digunakan sebagai pengatur *starter* dengan sistem *clutch* selama *start* dan peningkatan kecepatan saat *start up*. Selama operasi banyak sekali aksesoris yang digunakan. Karena permintaan kecepatan putaran generator lebih rendah dari kecepatan putaran turbin serta turbin tidak dapat bekerja dengan putaran sama persis dengan generator, maka perlu diturunkan kecepatan turbin dari 18.000 Rpm ke 1800 Rpm agar sesuai dengan kebutuhan generator.

Dua *stage reduction gear* dirangkai menggunakan referensi “*epicycle star*” nama ini diambil dari rangkaian yang telah dirangkai kembali dalam sistem penamaan *solar turbine*.



Gambar 2.7. *Saturn 20 Gear Reduce System*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilar USA*)

Dalam *reduction drive* terdapat *sun gear/ gir utama* yang terhubung fengan *shaft turbin*. *Sub gear* memutar 3 - *star gear* lainnya yang digunakan untuk menurunkan putaran serta terhubung dengan *fix countershaft*. Terdapat 2 *stage reduction stage*; gear pertama hingga kedua menurunkan putaran secara bertahap, gear ke tiga terhubung dengan *couple rotor generator* dan menghasilkan Rpm yang dibutuhkan yaitu 1800 Rpm.

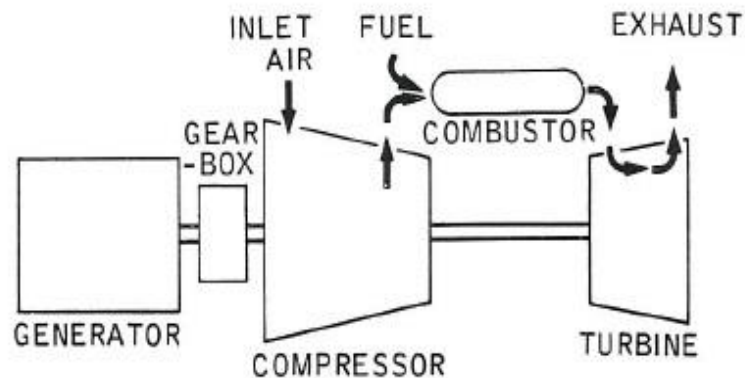
Komponen luar mesin gas turbine generator:

- *Air Inlet Duct*
Sebagai penghubung udara luar dengan inlet udara rangkaian *gas turbine generator*
- *Blend Valve and Duct*
Memindahkan udara dari kompresor ke ventilasi.
- *Engine Speed Magnetic Pick Up*
Mengukur kecepatan putaran *turbine* pada stage ke 2

- *T5 Thermocouples dan Harness*
Mengukur temperatur ruangan pada stage ke 3 turbin
- *Exhaust Collector*
Menyediakan jalur untuk pembuangan hasil pembakaran.
- *Output Reduction drive Assembly*
Mentransmisikan Rpm turbin menjadi Rpm generator.
- *Combustion Housing*
Sebagai rumah dari ruang pembakaran dan komponen penunjang lainnya.
- *Compressor Case*
Sebagai rumah dari komponen kompressor.
- *Fuel Injector*
Mengirimkan *fuel* ke ruang bakar
- *Diffuser Case*
Menyediakan jalur udara bertekanan dari output compressor ke ruang bakar.
- *Igniter Plug*
Menyediakan percikan api untuk pembakaran awal.

2.2.1.3. Teori Gas Turbine

Gas turbine engine pada dasarnya bekerja menggunakan pembakaran dimana energi dihasilkan dengan pembakaran dalam. Energi tersebut berekspansi dan dirubah menjadi energi mekanikal yang merupakan aplikasi dari “*thermodynamic*” secara terus menerus.



CS187

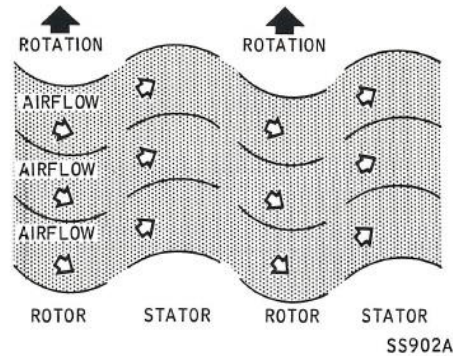
Gambar 2.8. *Gas Turbine Work Diagram*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

2.2.1.4. Cara Kerja *Gas Turbine*

Proses *thermodynamic* terjadi pada *turbine engine* secara terus menerus. Pada *gas turbine* tersebut terus menerus terjadi aliran kompresi udara dari *compressor* yang selanjutnya di campur dengan *fuel*, diberi percikan api oleh *spark plug* dan terjadilah pembakaran di *combustion chamber*. Hasilnya tenaga yang didapat dari hasil pembakaran memiliki energi yang digunakan untuk memutar *blade rotor turbine* dan terjadilah putaran pada *shaft turbine*.

Copyright© 1990 by Solar Turbines Incorporated. All rights reserved.



Gambar 2.9. *Compressing Air flow*

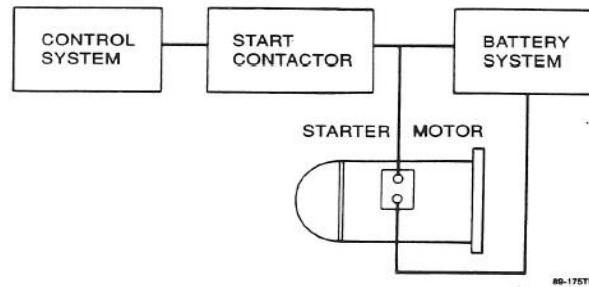
Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Udara awal dalam *compressor* didapatkan dari putaran awal turbin yang di putar oleh *starter motor*. Kemudian setelah putaran mencapai 60% maka pembakaran dapat dimulai. Udara bertekanan yang dikirimkan oleh *diffuser*. Pada bagian ini energi kinetik merubah udara dari tekanan rendah menjadi bertekanan tinggi kemudian di kirimkan ke *combustion housing*. Selama Proses *start up*, *torch* membagi *fuel* ke masing masing *combustion chamber* dan dibakar oleh masing-masing *igniter plug*. Torch akan menghentikan percikan api bila pembakaran telah berjalan optimal dan kontinyu.

Pembakaran terus menerus yang dimaksud adalah udara kompresi dan *fuel* tersedia dengan baik. Hasilnya, hasil pembakaran dengan panas setelah proses ekspansi yang dapat dengan mudah merusak *blade rotor*. Setelah pembakaran, fuel dan udara mengalami penurunan tekanan dan mengalami kenaikan kecepatan. Artinya energi kinetik menjadi mekanikal telah dihasilkan. Sebelum dibuang, hasil pembakaran dilweatkan di ruang berkelok agar dapat dikurangi kecepatan dan panasnya baru dibuang ke atmosfer. Hasil energi mekanikal berupa putaran *shaft turbine* kemudian di *reduce* oleh *gear reduce assembly* setelah itu digunakan untuk memutar generator.

2.2.1.5. The Electric Start System

2.2.1.5.1. Definisi



Gambar 2.10. *Electric Start System*

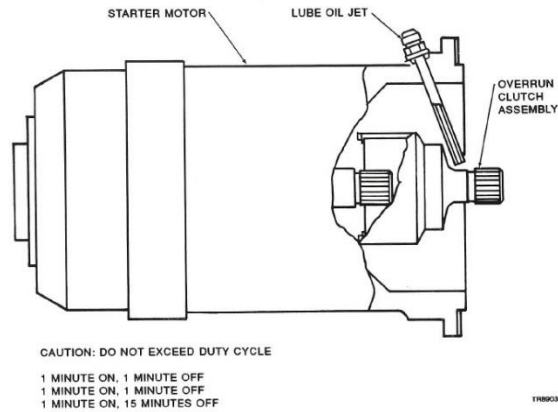
Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Sistem ini bertujuan untuk memberikan rotasi / putaran turbin dalam aklerasi / start up. Dalam Bahasa indoneisa disebut pengerak mula.

2.2.1.5.2. System Component

Komponen dari DC *electric start system* yaitu motor dc yang dialamnya terdapat *overrunning sprag clutch assembly*, *starter assembly* dan aksesoris adapter, *shaft*, pengawatan, *control relay* dan kendali dengan kontaktor magnet. Kontrol relay terletak pada panel control sedangkan start kontaktor magnet terletak bersama dengan *battery charger* dan *battery rack*.

2.2.1.5.3. Starter Assembly



Gambar 2.11. *Starter Assembly*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Terdiri atas motor dc dengan *housing* dan *overuning sprag clutch assembly*. Jenisnya *shuntwound*, 120 v dc. Dengan *winding compensating* hubungan bintang / start.

2.2.1.5.4. *System functional Description*

Ketika turbin *start-up* dan *crank cycle* bergerak, *control relay* aktif maka suplay listrik dc untuk motor telah mengalir dan motor memutar *gearbox* dan rotor turbin akan berputar. Motor terhubung dengan *gear box* dengan perantara *sprag clutch* sehingga bila kecepatan putaran mencapai 60% maka clutch akan menonaktifkan sambungan dengan *gear box* kemudian *motor starter* akan di nonaktifkan. Pelumasan untuk rangkaian *clutch* oleh *jet oil* bertujuan untuk menjaga agar *sprag clutch* dapat bekerja dengan baik.

2.2.2. 3512 Caterpilaar Gas Engine Generator

2.2.2.1. Definisi Gas Engine Generator

Gas engine adalah mesin berbahan bakar gas dengan menggunakan sistem pembakaran dalam. Tujuan dari sistem pembakaran dalam adalah memproduksi energi mekanikal dari bahan bakar yang dibakar didalam ruang bakar. Maksudnya, pembakaran terjadi didalam mesin, bukan diluar mesin.

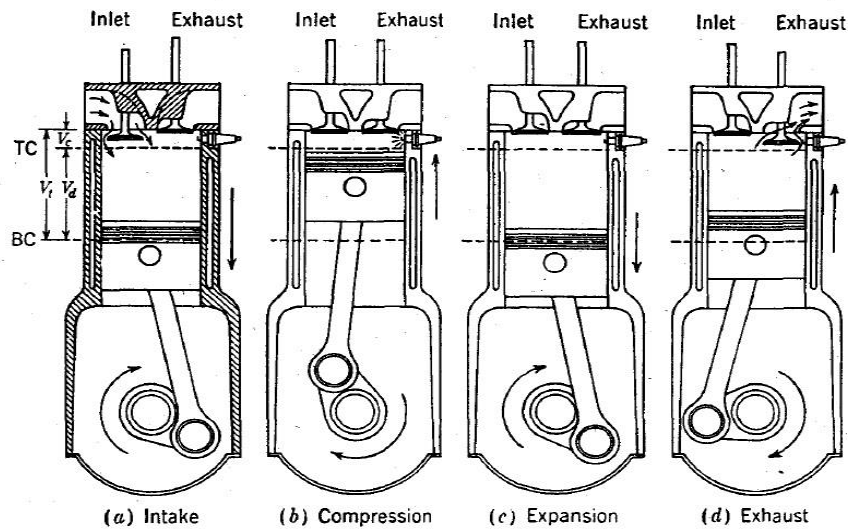


Gambar 2.12. 3512 Gas Engine Generator

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

Pembakaran yang terjadi diluar mesin disebut *external combustion*. Energi dilepaskan dari campuran udara yang di oksidasi dengan *fuel* dan dibakar. Energi tersebut digunakan untuk menggerakkan piston yang tergabung dengan *crankshaft*.

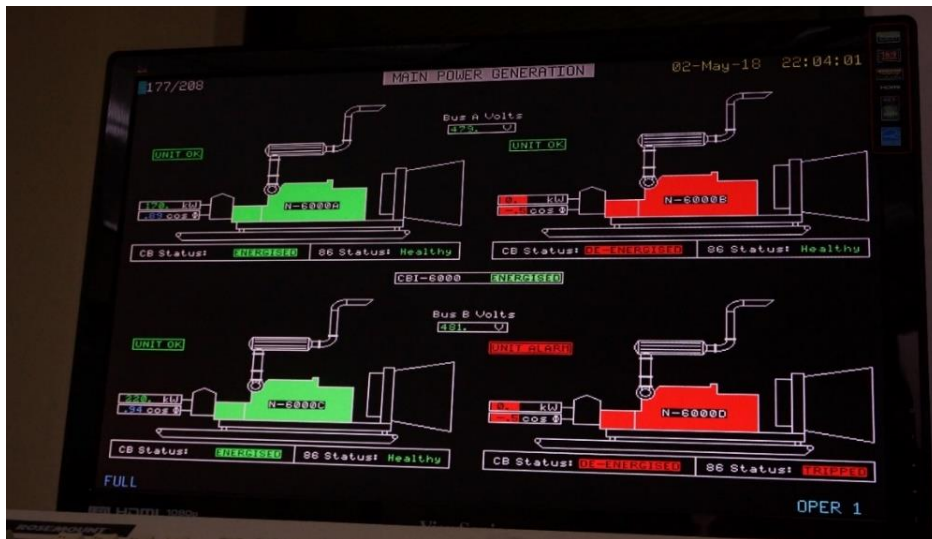
Gas engine bekerja dengan system 4 langkah / *four stroke*:



Gambar 2.13. *Gas Engine 4 Stroke*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

Gas engine generator yang digunakan sebagai pembangkit utama di *gas refinery plant* Kangean Energy Indonesia Pagerungan operation terdiri dari 3 unit *Caterpillar 3512*, Masing-masing mesin memiliki kapasitas 500 Kilo Watt, berfrekuensi 60 Hertz dan bertegangan 480 Volt 3 fasa.



Gambar 2.14. Gas Engine DCS Control

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

Saat beroperasi, *gas engine generator* hanya diizinkan mensuplai daya maksimal 450 Kilo Watt. Hal tersebut dikarenakan usia generator yang sudah lebih dari 20 tahun dan kurang tepat apabila bekerja melebihi 80% dari kapasitas.

Governor mengontrol bahan bakar gas untuk karburator sehingga terjadi pembakaran yang efisien, sehingga pembakaran yang terjadi didalam mesin lebih efisien dan menguntungkan. *Altronic III electronic ignition* mengendalikan pengapian yang kemudian diteruskan ke busi untuk memberi percikan api pembakaran.

2.2.2.2. Cara Kerja Gas Engine

- TMA (titik mati atas) atau TDC (*top dead centre*)

Posisi piston *gas engine* berada di titik paling atas silinder, berada titik terjauh dari *crankshaft*.

- TMB (titik mati bawah) atau BDC (*bottom dead centre*)

Yaitu posisi piston berada di titik terbawah dari silinder, yang terdekat dengan *crankshaft* (poros engkol).

- Langkah 1 Hisap

Piston bergerak dari posisi TMA ke TMB, *valve in* kondisi terbuka dan *valve out* tertutup, udara atmosfer dihisap gas diinject kan dan masuk *combustion*. Prosesnya udara sebelum dialirkan ke *combustor* harus melewati filter terlebih dahulu agar dapat diperkecil kemungkinan udara tercemar yang digunakan.

- Langkah 2 Kompresi

Piston bergerak dari TMB ke TMA, *valve in* dan *valve out* tertutup. Udara dan gas yang terkurung dalam ruang bakar dikompresi oleh piston, sebelum piston sampai di posisi TMA *ignition spark plug* akan memberi percikan api untuk membakar udara dan gas yang telah dicampur dan dikompresi.

- Langkah 3 Tenaga

Gas dan udara yang telah terbakar tadi menghasilkan tekanan hasil dari ekspansi. Tekanan tersebut menyebabkan terjadi dorongan untuk piston menuju TMB. Langkah Ini merupakan inti dari proses konversi energi dari udara dan gas menjadi tenaga *gas engine*.

- Langkah 4 Pembuangan

Posisi Piston di TMB akan menuju TMA, *valve in* tertutup dan *valve out* terbuka menyebabkan hasil pembakaran semula dibuang lewat *valve out (Exhaust)* Kemudian berulang lagi dari langkah awal secara kontinyu. Empat langkah tersebut terjadi dalam sekali pembakaran yang mana jumlah dan ukuran piston menentukan berapa tenaga yang dihasilkan oleh *gas engine*, semakin besar dan banyak piston yang digunakan, maka semakin besar tenaga yang dihasilkan. Selanjutnya putaran *crankshaft* tersebut dihubungkan dengan generator lewat *couple*. Tidak ada penurunan dan peningkatan kecepatan putaran, karena biasanya gas engine didesain untuk memberikan putaran dan torsi sesuai dengan spesifikasi yang diperlukan generator.

2.2.3. Generator Sinkron

2.2.3.1. Definisi Generator Sinkron

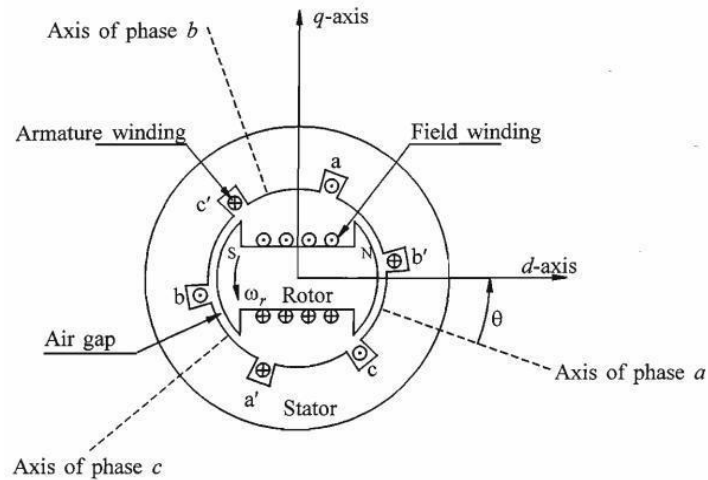
Generator sinkron adalah mesin yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke listrik dan listrik ke mekanik. Generator sinkron menghasilkan tegangan *alternating current* dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanis didapat dari putaran turbin / penggerak lainnya kemudian energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi antara stator dan rotor yang berputar.

Menurut Anderson P.M (1982), generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu: tegangan bolak-balik, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutubkutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga *turbine gas*, *gas engine* atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet. Medan magnet ini akan memotong kumparan stator, hasilnya pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik.

Besar ggl induksi kumparan stator atau ggl induksi armature per fasa adalah:
 $E_a = 4,44 \cdot F \cdot z/2 \cdot \Phi \cdot K_d$ Keterangan:

- E_a = Gaya gerak listrik armature per-phase (Volt)
- F = Frekuensi output generator (Hz)
- M = Jumlah kumparan per phase = $Z/2$
- Z = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa = Faktor distribusi

- Φ = Fluks magnet per kutub per-fasa



Gambar 2.15. Skema Diagram Generator Sinkron Tiga Fasa

(Sumber: Kundur Prabha,1993)

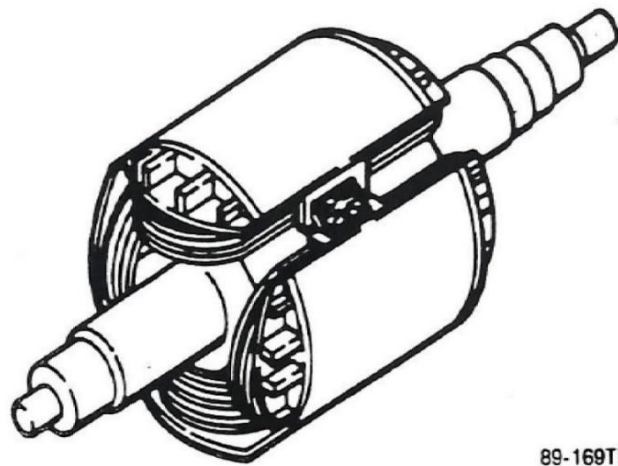
Gambar diatas menunjukkan bahwa pada generator sinkron, kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.

2.2.3.2. Konstruksi Generator Sinkron

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

2.2.3.2.1. Rotor

Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient (kutub sepatu) dan *non-salient* (rotor silinder). Gambar dibawah menunjukkan bentuk rotor kutub sepatu.



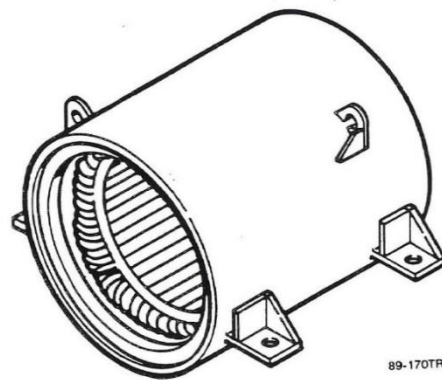
Gambar 2.16. Bentuk Rotor Silinder

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

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

2.2.3.2.2. Stator

Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam, oleh karena itu komponen ini juga disebut dengan stator. Lilitan armatur generator dalam wye dan titik netral dihubungkan ke tanah.



Gambar 2.17. Stator Generator

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

lilitan dalam wye dipilih karena:

- Meningkatkan daya output.
- Menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.

Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Dalam lilitan wye tegangan harmonik ketiga fasa saling meniadakan, sedangkan dalam lilitan delta tegangan harmonik ditambahkan. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari: rangka stator, inti stator dan alur dan gigi stator, serta kumparan stator.

2.2.3.2.1. Rangka stator

Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator. Rangka luar yang biasanya terbuat dari baja berfungsi sebagai penyangga struktur stator dan mempunyai kaki-kaki yang dipasang pada bagian pondasi. Rangka stator ini dibuat kokoh untuk mengatasi perubahan beban secara tiba-tiba atau hubung singkat tiga fasa.

2.2.3.2.2. Inti stator

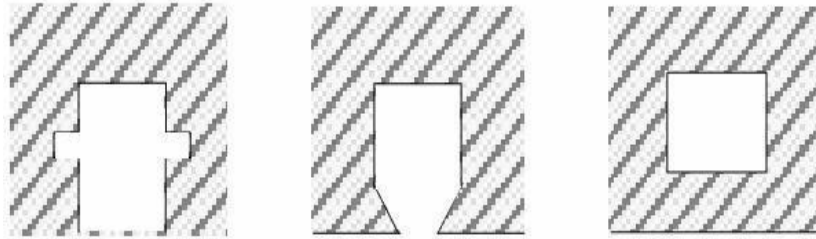
Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi bahan ferromagnetik berlapis- lapis yang terpasang ke rangka stator. Inti stator menyediakan jalur permeabilitas yang tinggi untuk proses magnetisasi. Inti stator dibuat berlaminasi untuk mengurangi rugi eddy current dan juga rugi histeresis.

Kerugian karena eddy current disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluk magnetik disekitar inti stator. Karena inti stator terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak), maka arus eddy yang menginduksi inti stator akan semakin besar. Eddy current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah generator karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti stator, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas.

Kerugian histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti stator. Gesekan molekul dalam inti stator ini menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah bentuk menjadi energi panas. Panas yang dihasilkan selama masih dalam range parameter masih dapat ditoleransi. Bahan-bahan nonmagnetic atau penggunaan perisai fluks yang terbuat dari tembaga juga digunakan untuk mengurangi *stray loss*.

2.2.3.2.2.3. Alur

Alur (slot) dan alur stator merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada tiga bentuk alur stator yaitu: terbuka, setengah terbuka dan tertutup. Ketiga bentuk alur tersebut tampak seperti pada gambar 2.18. Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.



Gambar 2.18. Bentuk-Bentuk Alur

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpillar USA.*)

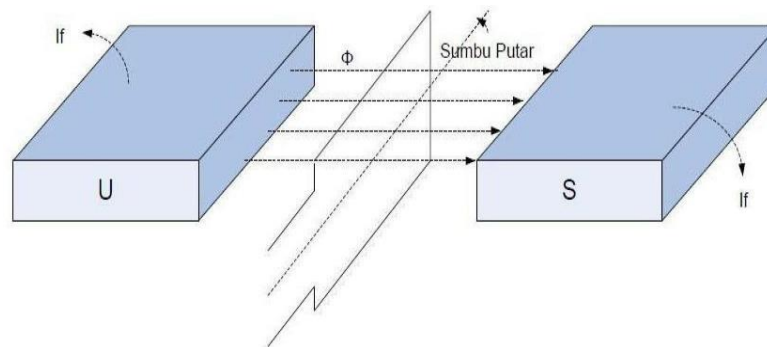
2.2.3.3. Prinsip Kerja Generator

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

Untuk dapat terjadinya gaya gerak listrik (GGL) tersebut diperlukan dua kategori masukan, yaitu:

- Masukan tenaga mekanis yang akan dihasilkan oleh penggerak mula (prime mover).
- Arus masukan (I_f) yang berupa arus searah yang akan menghasilkan medan magnet yang dapat disebut eksitasi dan dapat dikendalikan oleh AVR.

Di bawah ini akan dijelaskan secara sederhana cara pembangkitan listrik dari sebuah generator.



Gambar 2.19. Sistem Pembangkitan Generator Sinkron

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Dimana:

I_f : Arus medan

U – S : Kutub generator Sumbu Putar Poros Generator

Φ : Fluks medan

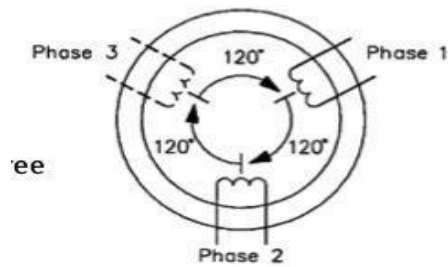
Apabila rotor generator diputar pada kecepatan nominalnya, dimana putaran tersebut diperoleh dari putaran penggerak mulanya (*prime mover*), kemudian pada kumparan medan rotor diberikan arus medan sebesar I_f , maka garis-garis fluksi yang dihasilkan melalui kutub-kutub inti akan menghasilkan tegangan induksi pada jangkar stator sebesar: $E_a = C \cdot n \cdot \Phi$ Dimana:

E_a : Tegangan induksi yang dibangkitkan pada jangkar generator

C : Konstanta

N : Kecepatan putar

Φ : Fluks yang dihasilkan oleh arus penguat (arus medan)



Gambar 2.20. Skema Kumbaran Tiga Fasa

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction For 3512 Gas Engine Generator Caterpilaar USA.*)

Apabila generator digunakan untuk melayani beban, pada kumbaran jangkar generator akan mengalir arus. Untuk generator 3 fasa, setiap belitan jangkar akan memiliki beda fasa sebesar 120 derajat.

2.2.3.3.1 Jumlah Kutub

Generator memiliki hubungan antara kecepatan dan putaran (N) dari rotor, frekuensi (f) dari EMF / GGL yang disesuaikan dengan banyaknya kutub (P).

Hubungan tersebut adalah: $F = P \cdot n / 120$

Dimana:

F = Frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub pada generator

N = putaran rotor generator (rpm) 120

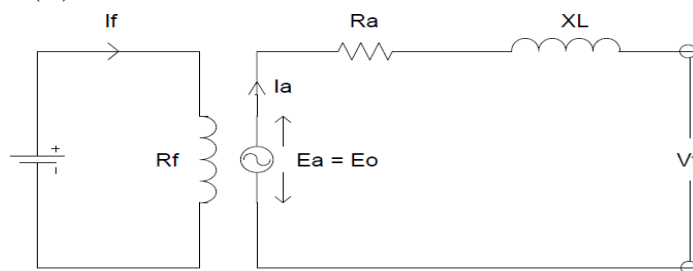
2.2.3.4. Karakteristik Generator Sinkron

Karakteristik generator sinkron ada dua, yaitu generator tanpa beban dan generator berbeban.

2.2.3.4.1. Generator Sinkron Tanpa Beban

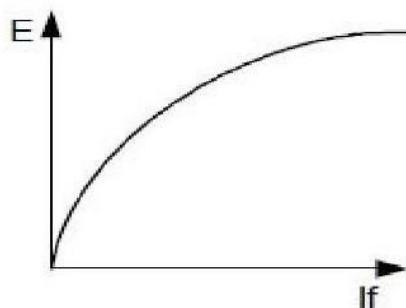
Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), pada generator sinkron tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature ($I_a = 0$). Dengan demikian besar tegangan adalah: $V_t = E_a = E_o$. Oleh karena besar ggl armature adalah merupakan fungsi dari flux magnet, maka ggl armatur juga ditulis: $E_a = f(\Phi)$.

Dari persamaan diatas, jika arus penguat medan armature besarnya maka akan ikut kenaikan flux dan akhirnya juga pada ggl armatur. Pengaturan arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya, akan didapatkan besar ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Dibawah ini merupakan hubungan antara arus penguat medan (I_f) dan E_a .



Gambar 2.21. Rangkaian Listrik Generator Sinkron Tanpa Beban

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)



Gambar 2.22. Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Keterangan:

I_f = Arus kumparan medan atau arus penguat

R_f = Hambatan kumparan medan

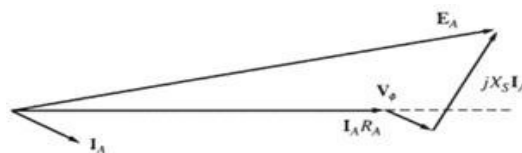
R_a = Hambatan armatur X_L = Reaktansi bocor (reaktansi armatur)

V_t = Tegangan output E_a = Gaya gerak listrik armatur

2.2.3.4.2. Generator Sinkron Berbeban

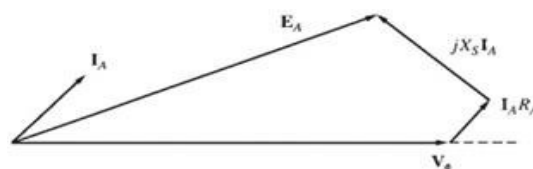
Tiga macam sifat beban generator, yaitu: beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika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

Diagram fasor pembebanan generator sinkron adalah sebagai berikut:



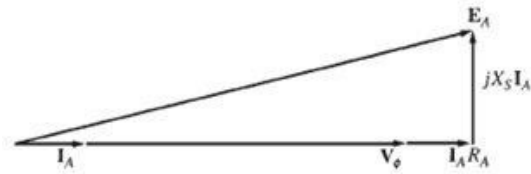
Gambar 2.23. Faktor Daya

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)



Gambar 2.24. Faktor Daya Lagging

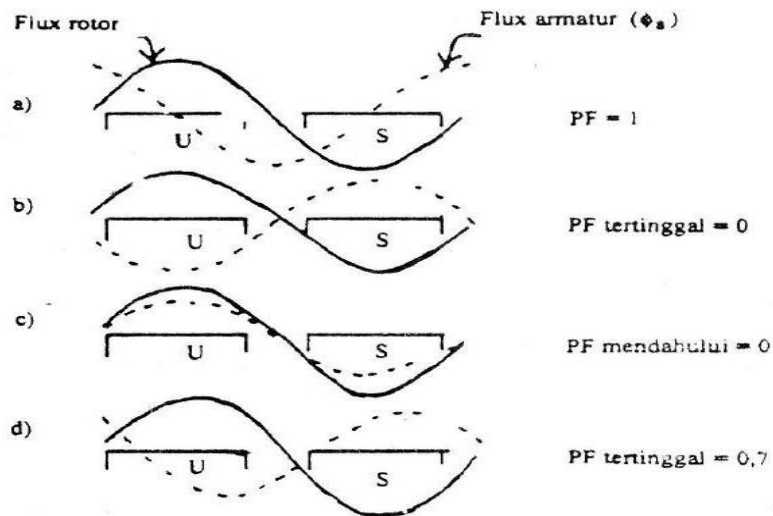
Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)



Gambar 2.25. Faktor Daya Leading

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka segera mengalir arus armatur (I_a). Dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan jangkar timbul flux putaran jangkar. Flux putaran jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah flux putaran yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Hal ini bergantung pada faktor daya beban dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.26. Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap Flux Rotor

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017).

Dari gambar 2.23 pada faktor daya beban (PF) = 1, berarti arus armatur sephase dengan tegangan beban. Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) adalah mendahului terhadap flux putaran utama (rotor) Interaksi dari kedua flux putar tersebut menghasilkan flux putar baru yang cacat (tidak sinus murni),

akibatnya tegangan keluaran generator juga tidak sinus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.

Dari gambar 2.24 pada faktor daya beban tertinggal ($PF=0$), berarti arus armatur tertinggal terhadap tegangan beban. Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) berada sephase (Posisi a pada $PF=1$ digeser ke kiri/tertinggal lagi, jadi) terhadap flux putar utama (rotor). Interaksi dari kedua flux putar tersebut menyebabkan terjadinya pengurangan besar flux rotor dan kejadian ini disebut demagnetisasi. Jika proses demagnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang dihasilkan oleh generator akan berkurang. Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan (I_f) harus diperbesar.

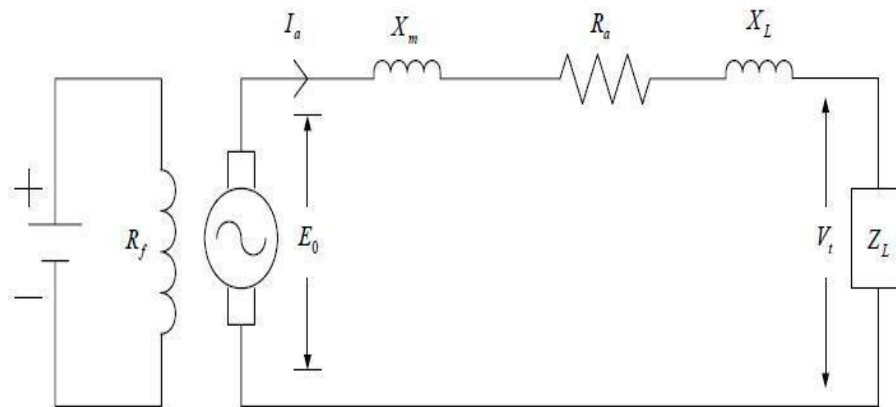
Dari gambar 2.25 pada faktor daya beban mendahului ($PF=0$), berarti arus armatur mendahului terhadap tegangan beban. Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) akan sefase dengan flux putar rotor, (posisi a pada $PF=1$ digeser ke kanan). Akibat interaksi dari flux ini dihasilkan flux baru yang bertambah besar terhadap flux rotor. Proses ini disebut magnetisasi. Jika proses magnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang ditimbulkan akan bertambah besar. Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan (I_f) dikurangi.

Dari gambar 2.26 pada faktor daya beban menengah adalah beban fase antara arus armatur (I_a) dan tegangan beban 0 sampai mendahului atau tertinggal. Untuk beda fase 0 sampai, arus armatur mendahului terhadap tegangan beban disebut mendahului (leading). Sedangkan untuk beda fase 0 sampai, arus armatur tertinggal terhadap tegangan beban disebut faktor daya tertinggal (lagging). Pada faktor daya (PF) beban menengah mendahului, flux armatur yang timbul fasenya agak bergeser kekanan terhadap flux putar rotor. Sehingga dan bentuk sinyal ggl armatur yang dihasilkan agak sedikit cacat.

Proses kejadian tersebut dinamakan reaksi jangkar atau reaksis armatur. Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m , akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. E_0 menjadi $E_a = E_0 - jI_a$

X_m dan tegangan terminal menjadi (V_t). GGL armatur tanpa beban (E_0) besarnya adalah: $E_0/ph = V_t + I_a (R_a + j X_a)$. Atau $E_0/ph = V_t + I_a + Z_a$.

Rangkaian ekivalen generator sinkron per fasa dapat dilihat pada gambar 2.27 berikut:



Gambar 2.27. Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.3.5. Daya dan Torsi Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan mesin yang mengkonversikan energi mekanik menjadi listrik tiga fasa. Energi mekanis ini disebut dengan pengerak mula dan mempunyai putaran konstan. Putaran yang tidak konstan mempengaruhi frekwensi yang dihasilkan generator. Secara teori, bahwa semua daya mekanis yang dihasilkan oleh pengerak mula oleh generator sinkron diubah menjadi listrik.

2.2.3.6. Rugi – Rugi Generarator Sinkron

Rugi – rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik. Rugi Total = rugi variabel + rugi konstan. $P_t = \text{rugi tembaga armature} + P_c$.

2.2.3.6.1. Rugi Listrik

Rugi listrik atau rugi tembaga tersusun dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga terjadi di semua lilitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu 750 C dan tergantung pada

tahanan efektif dari lilitan pada fluks dan frekuensi kerjanya. Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \cdot R_a$) sebesar sekitar 30 sampai 40% dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh. Sangat berkaitan dengan rugi $I^2 R$ adalah rugi – rugi kontak sikat pada cincin slip dan komutator, rugi ini biasanya diabaikan pada mesin induksi.

2.2.3.6.2. Rugi Besi

Rugi besi atau rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada iron mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron rugi ini dialami oleh iron armatur, meskipun pembentukan medan magnet yang berasal dari mulut celah memberi kerugian pada besi medan, terutama pada sepatu kutub atau permukaan iron medan. Rugi ini di data diambil untuk suatu kurva rugi – rugi besi sebagai fungsi dari tegangan armatur disekitar tegangan ukuran. Maka rugi besi dalam keadaan terbebani ditentukan sebagai harga pada suatu tegangan yang besarnya sama dengan tegangan ukuran yang merupakan perbedaan dari jatuhnya tahanan ohm armatur pada saat terbebani. Rugi histerisis (P_h) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang besarnya adalah: $P_h = \eta h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v$ (watt).

2.2.3.6.3. Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari:

1. Rugi sentuhan yang terjadi pada sentuhan tipis antara sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan memberi *input* pada mesin yang bekerja pada kecepatan normal akan tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.
2. Rugi angin (*windage loss*), disebut juga rugi buta (*stray loss*) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagian stator. Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada beban penuh.

2.2.3.7. Efisiensi Generator

Pada umumnya yang disebut dengan efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin-mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan.

$$\eta = P_{out}/P_{in}.100\%$$

$$\eta = P_{out}/P_{in} + P_{loss}.100\% \quad P_{loss} = I^2R$$

Dimana:

P_{out} = daya keluaran (watt)

P_{in} = daya masukan

ΣP_{loss} = untuk generator adalah ($I_f^2 \cdot R_f + I_a^2 \cdot R_a + I^2 R_{sr} +$ rugi gesek + rugi inti) I_f^2 .

R_f = rugi kumparan medan

$I_a^2 \cdot R_a$ = rugi kumparan jangkar

$I^2 \cdot R_{sr}$ = rugi kumparan medan

Rugi gesek = rugi sikat + rugi angin + rugi sumbu

Rugi sikat = $I_a \cdot V_{si}$

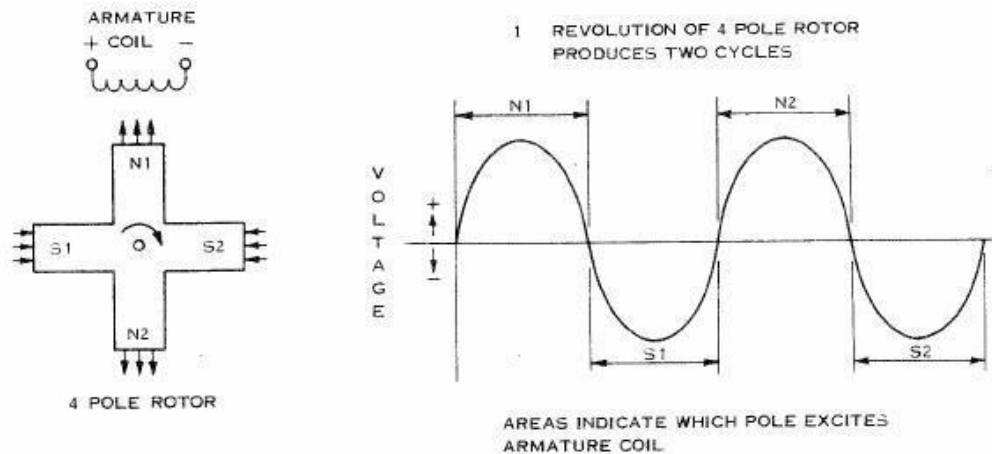
Rugi angin yaitu rugi-rugi karena adanya celah antara bagian rotor dan stator ($\pm 1\%$)

Rugi Sumbu = rugi-rugi yang timbul pada benda berputar

Rugi Inti = rugi histerisis + rugi arus pusar

Generator tiga fasa lebih handal karena konduktor dalam sistem tiga fasa hanya membutuhkan $3/4$ tembaga dari sistem satu fasa untuk menyalurkan daya

yang sama. Effisiensi transmisi tiga fasa juga lebih baik dibanding sistem dua fasa. Selanjutnya, sistem tiga fasa digunakan pada stator (armatur) generator karena lebih efektif dan ukurannya lebih kecil jika dibandingkan sistem satu atau dua fasa dengan daya yang sama. Sistem tiga fasa juga lebih ekonomis dan efisien.



Gambar 2.28 Gelombang Tegangan Sinusoidal – Rotor 4 Kutub

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Frekwensi generator tergantung pada jumlah kutub dan putaran (RPM). Bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$F \text{ (Hz)} = (\text{Jumlah kutub}) \cdot (\text{RPM}) : (2 \cdot 60)$$

Jumlah dari kutub diberi pembagian dua karena membutuhkan dua kutub (utara dan selatan) untuk menghasilkan satu siklus. Sedangkan untuk putaran (RPM) diberi pembagian 60 untuk mendapatkan jumlah dari putaran per detik.

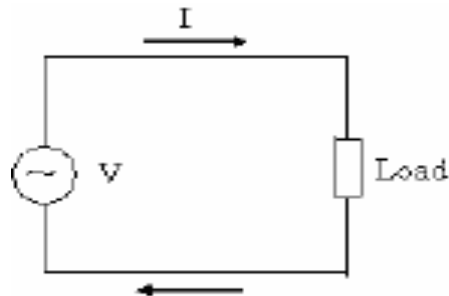
2.2.4. Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau Horsepower (HP), Horsepower merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746Watt atau lbft/second. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1

Ampere dan tegangan 1 Volt. Daya dinyatakan dalam P, Tegangan dinyatakan dalam V dan Arus dinyatakan dalam I, sehingga besarnya daya dinyatakan:

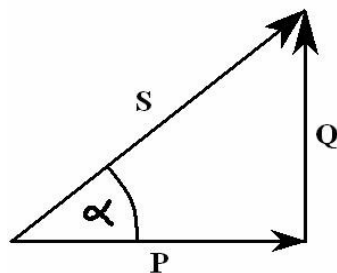
$$P = V \times I$$

$$P = \text{Volt} \times \text{Ampere} \times \cos \varphi \quad P = \text{Watt}$$



Gambar 2.29 Arah Aliran Arus Listrik

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)



Gambar 2.30. Segitiga Daya

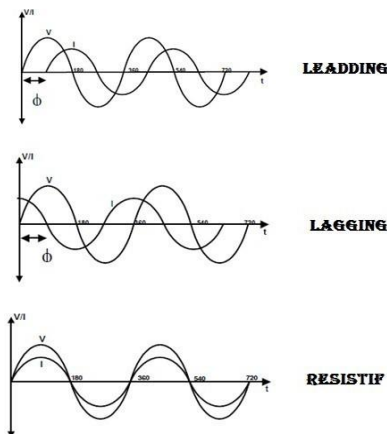
Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.4.1. Faktor Daya

Faktor daya atau disebut juga cosinus sudut ($\cos \alpha$) adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Adanya dan besarnya faktor daya pada sistem tegangan AC disebabkan oleh ada beban dan besarnya tergantung dari karakteristiknya.

Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya (pf) selalu lebih kecil atau sama

dengan satu. Secara teori, jika seluruh beban daya memiliki $pf = 1$, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistim pendistribusian. Jika faktor daya sangat rendah maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran daya aktif (W) yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya semu (VA). Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi.



Gambar 2.31 Faktor Daya Beban

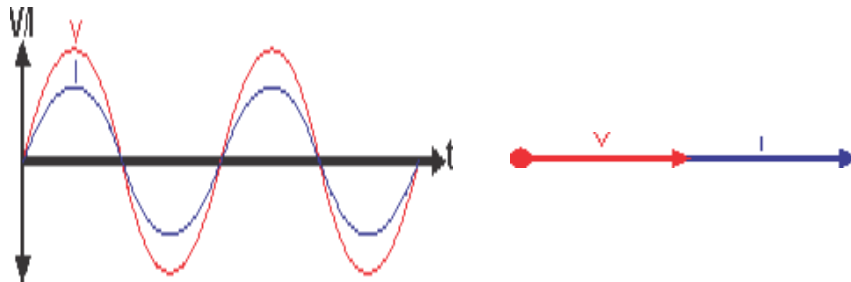
Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Pada sistem arus bolak-balik, daya listrik tidak sesederhana pada sistem arus searah. Pada arus bolak-balik terdapat tiga jenis daya, yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif. Daya Semu (*Apparent Power*) Atau disebut juga daya total yaitu penjumlahan daya aktif dan daya reaktif. Jadi daya inilah yang dijadikan kapasitas daya maksimal suatu generator.

$$S=V.I(\text{VA}) \text{ atau } S= P^2 +Q^2$$

Daya Aktif (*Real Power*) Adanya daya aktif (faktor P) disebabkan beban yang digunakan bersifat resistif seperti lampu pijar, rheostat, load bank, pemanas, motor induksi berbeban berat, dan trafo berbeban tinggi, dll. Beban resistif membuat phasa antara tegangan dan arus selalu sama (inphase) sehingga membuat

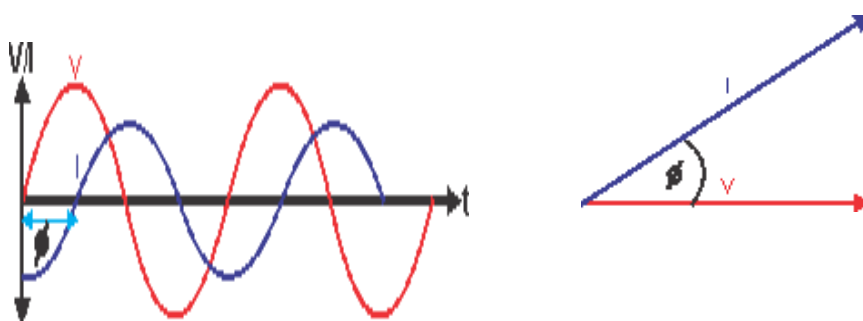
pf = 1. Adapun perhitungan daya aktif sebagai berikut: 1 fasa $P = V \times I \times \cos \alpha$ (W)
dimana $Z = R$ 3 fasa $P = 3 \times V_{L-L} \times I_L \times \cos \alpha$ (W).



Gambar 2. 32. Karakteristik Fasa dan Vektor Pada Beban Resitif Murni.

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Daya Reaktif (*Reactive Power*) Pada dasarnya daya reaktif ini (faktor Q) disebabkan oleh 2 karakteristik beban yaitu beban induktif dan kapasitif. Adanya beban induktif membuat perbedaan fasa antara tegangan dan arus dimana arus tertinggal terhadap tegangan atau disebut dengan pf *lagging* (positif pf). Sehingga membuat pf rendah ($pf < 1$), atau induktif murni ia memiliki $pf = 0$ maka hanya ada daya reaktif saja. Contoh beban induktif seperti motor induksi tanpa beban atau berbeban rendah, trafo berbeban rendah, ballast, dll.

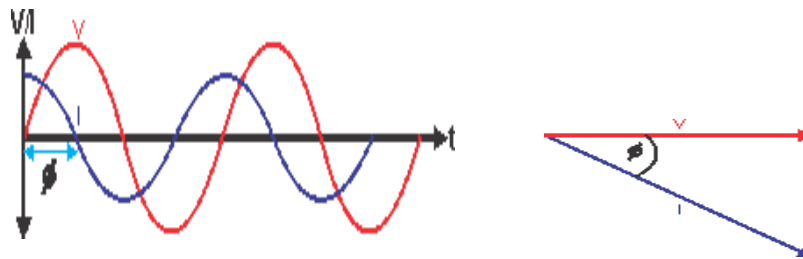


Gambar 2.33. Karakteristik Fasa dan Vektor Pada Beban Induktif Murni

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Sedangkan adanya beban kapasitif juga membuat perbedaan fasa antara tegangan dan arus dimana arus mendahului terhadap tegangan atau disebut dengan *pf leading* (negatif *pf*). Sehingga juga membuat *pf* rendah ($pf < 1$), atau kapasitif murni ia memiliki $pf = 0$ maka hanya ada daya reaktif saja. Contoh beban kapasitif seperti penghantar daya yang terlalu panjang, filter kapasitor, motor sinkron yang kelebihan eksitasi, dll. Adapun perhitungan daya reaktif sebagai berikut: 1 fasa 3 fasa.

$Q = V \times I \times \sin \alpha$ (VAR) Dimana jika *lagging* $Z = jXL$ $Q = 3 \times V_L - L \times I_L \times \sin \alpha$ (VAR) *leading* $Z = -jXC$



Gambar 2.34. Karakteristik Fasa dan Vektor Pada Beban Kapasitif Murni

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

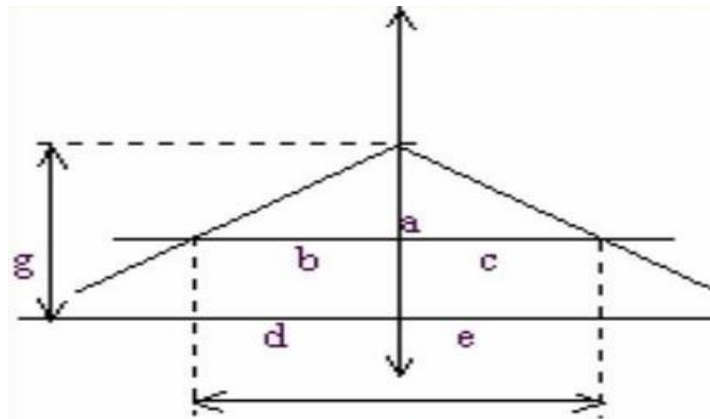
2.2.5. Operasi Paralel Generator

Paralel generator dilakukan dengan mengoperasikan bersama dua unit generator atau lebih dengan bus, sistem kerja ini bertujuan untuk menambah daya, untuk menghemat biaya pemakaian operasional dan biaya pembelian kapasitas generator, dan menjamin kontinuitas ketersediaan daya listrik. Sistem ini disebut juga dengan *load sharing generator*.

Dalam langkahnya, mensinkronkan generator dengan kapasitas yang berbeda harus memperhatikan sebuah batasan. Batasan tersebut adalah terjadinya *overload* pada generator yang kapasitasnya minimum. Untuk mengatasi permasalahan ini, harus diketahui karakteristik dari setiap generator. Karakteristik yang dimaksud adalah karakteristik daya terhadap putaran atau frekuensi. Selain itu

karakteristik dari masing – masing generator harus mempunyai *droop* yang sama. Dengan karakteristik yang demikian kita dapat melakukan pengaturan daya generator sehingga dapat mencapai prosentase yang sama pada masing – masing unit generator yang diparalel. Aplikasi dari karakteristik tersebut adalah dengan diagram karakteristik frekuensi - daya. Supaya terjadi distribusi beban seperti pada diagram karakteristik, maka antar generator dioperasikan pada kecepatan bersama yang besarnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Kecepatan bersama} = b/d * g \text{ atau } = c/e * g (\%)$$



Gambar 2.35. Diagram Karakteristik Frekwensi Terhadap Daya Dua Generator

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Dimana:

- A. Frekuensi atau putaran bersama.
- B. Beban pada generator 1.
- C. Beban pada generator 2
- D. Kapasitas generator 1.
- E. Kapasitas generator 2
- F. Total beban kedua generator.
- G. Putaran atau frekuensi tanpa beban dari kedua generator.

Dengan demikian bila dua generator yang berkerja secara paralel, dan jika salah satu generator karakteristik droopnya ditingkatkan maka akan mengakibatkan:

1. Frekuensi akan naik.
2. Daya yang ditingkatkan oleh generator yang dinaikkan karakteristik droopnya akan meningkat. Untuk mendapatkan putaran generator dengan pembagian beban yang proporsional digunakan formula.
Dimana: Available KW Load $S_{al} = S_{nl} \text{ Rated KW} (S_{nl} - S_{fl})$
3. S_{al} adalah putaran pada saat beban yang dibangkitkan
4. S_{fl} adalah putaran pada saat beban penuh
5. S_{nl} adalah putaran pada saat tanpa beban

2.2.5.1. Syarat Paralel Generator

Dengan demikian generator dengan kapasitas yang berbeda dapat secara aman sinkron dan menanggung beban secara proporsional sesuai dengan kapasitasnya. Sebelum generator dapat di sinkronkan, kondisi harus memenuhi persyaratan yaitu:

1. Mempunyai Tegangan Yang Sama

Tegangan yang sama diharapkan terjadi pada saat sinkron dengan beban kosong faktor dayanya. Dengan faktor daya 1 berarti tegangan antara 2 generator persis sama. Jika 2 sumber listrik itu berasal dari dua sumber yang sifatnya statis misal dari *battery* atau transformator maka tidak akan ada arus singkat, akan tetapi karena dua sumber merupakan sumber tegangan yang dinamis (generator) Maka faktor dayanya akan terjadi naik turun nilainya secara periodik bergantian dan berlawanan.

Hal ini terjadi karena adanya sedikit perbedaan sudut fasa yang sesekali bergeser karena faktor gerak dinamis dari penggerak. Itu bisa dibuktikan dengan membaca secara bersamaan Rpm dari misal dua generator dalam keadaan sinkron unit 1 mempunyai putaran 1500 Rpm dan unit 2 mempunyai putaran 1501 Rpm

maka terdapat selisih 1 putaran / menit. Perhitungannya $1/1500 \times 360$ derajat, hasilnya terdapat beda fase 0,24 derajat dan jika dihitung selisih tegangan sebesar $\cos \phi$ 0,24 derajat x tegangan nominal (400 V) tegangan nominal (400 V) dan selisihnya sekitar V dan selisih tegangan yang kecil cukup mengakibatkan timbulnya arus sirkulasi antara 2 buah generator tersebut dan sifatnya tarik menarik, dan itu tidak membahayakan.

Generator saat *loading* bersama maka faktor dayanya akan relatif sama sesuai dengan faktor daya beban. Sebaiknya dan idealnya masing masing generator menunjukkan faktor daya yang sama. Faktor Daya berbeda bias terjadi jika terjadi, jika ada syarat yang tidak terpenuhi, akibatnya salah satu generator yang mempunyai nilai faktor daya lebih rendah dan akan mempunyai nilai arus yang lebih besar. Perlu diperhatikan bahwa nilai arus dibatasi untuk tidak melebihi arus nominal dan daya nominal generator. Pada unit generator yang akan disinkron biasanya didalam alternatornya ditambahkan peralatan yang dinamakan *droop kit*. *Droop kit* ini berupa *current transformer* yang dipasang disebagian lilitan dan outputnya disambungkan ke VR. *Droop kit* ini berfungsi untuk mengatur faktor daya berdasarkan besarnya arus beban, sehingga pembagian beban KVAR diharapkan sama pada KW yang sama.

2. Mempunyai Urutan Fasa Yang Sama

Urutan fasa maksudnya arah putaran dari ketiga fasa. Arah urutan ini dalam dunia industri bernama CW (*clock wise*) searah jarum jam, dan CCW (*counter clock wise*) berlawanan dengan jarum jam. Peristiwa ini diukur dengan alat *phase sequence* type jarum. Pada saat mengukur urutan fasa, jarum bergerak berputar kekanan dinamakan CW dan jika berputar kekiri dinamakan CCW. Disamping itu dikenal juga urutan fasa ABC dan CBA. ABC dengan CW sedangkan CBA dengan CCW.

Masing-masing generator jika mempunyai arah urutan yang sama maka mempunyai salah satu syarat dari parallel generator. Artinya bisa jadi pada dua generator yang sama urutan RST pada generator set dapat dihubungkan dengan fasa

STR pada generator set 2 dan itu tidak ada masalah asal keduanya mempunyai arah urutan yang sama.

3. Mempunyai Frekuensi Yang Sama

Listrik AC memiliki dua frekuensi yaitu 50 hz dan 60 hz. Dalam operasionalnya sebuah generator bisa saja mempunyai frekuensi yang fluktuatif (berubah ubah) karena faktor-faktor tertentu. Jaringan distribusi terpasang alat pembatas frekuensi yang membatasi frekuensi pada minimal 48,5 hz dan maksimal 51,5 Hz. Untuk industry, biasanya over frekuensi dibatasi sampai 55 Hz sebagai *overspeed*.

Pada saat akan disinkron, dua unit generator tentu tidak memiliki frekuensi yang sama persis. Jika mempunyai frekuensi yang sama persis maka generator tidak akan bisa parallel karena sudut fasanya belum sesuai, salah satu harus dikurangi atau ditambah sedikit untuk mendapatkan sudut fasa yang tepat. Setelah dapat disinkron dan berhasil sinkron baru kedua generator mempunyai frekuensi yang sama-sama persis. Jika frekuensi tidak sama disinkronkan maka akan terjadi beberapa kemungkinan yaitu dari yang paling ringan sampai yang paling berat.

Dengan melihat *synchronoscope* maka jarum akan berputar dengan kecepatan sudut $2\pi r$ / detik atau 1 putaran/ detik. Jika pada saat masuk tepat pada sudut nol maka generator yang memiliki frekuensi lebih rendah akan mengalami *reverse power* dimana pada saat terhubung sinkron frekuensi ada pada 49,5 Hz. Dan proteksi reverse power akan bekerja mengamankan, namun jika pada saat masuk sinkron saat posisi *synchronoscope* di sudut 180 derajat itu berarti terjadi selisih tegangan yang sangat besar disamping kemungkinan *reverse* juga terjadi kerusakan yang fatal terhadap generator, di kontak *breaker* akan muncul arus yang besar dan menimbulkan percikan api yang besar dan pada turbin akan terjadi gaya penahan yang besar hal ini disebabkan karena tekanan beban besar yang tiba tiba.

4. Mempunyai Sudut Fasa Yang Sama

Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan kedua fasa dari 2 unit generator mempunyai sudut fasa yang sama atau 0 derajat. Dalam aplikasinya tidak mungkin mempunyai sudut yang berhimpit karena generator yang berputar memiliki kecepatan yang berbeda. Sudut fasa yang meskipun dilihat dari parameteranya mempunyai frekuensi sama namun jika dilihat menggunakan *synchronoscope* pasti bergerak labil, kekiri dan kekanan. Dengan kecepatan sudut radian yang ada sangat sulit untuk mendapatkan sudut berhimpit dalam jangka waktu 0,5 detik. *Breaker* perlu 0,3 detik untuk *close* pada saat ada perintah *close* pada proses sinkron masih diperkenankan perbedaan sudut maksimal 10 derajat. Dengan perbedaan maksimal 10 derajat selisih tegangan yang terjadi berkisar 4 Volt.

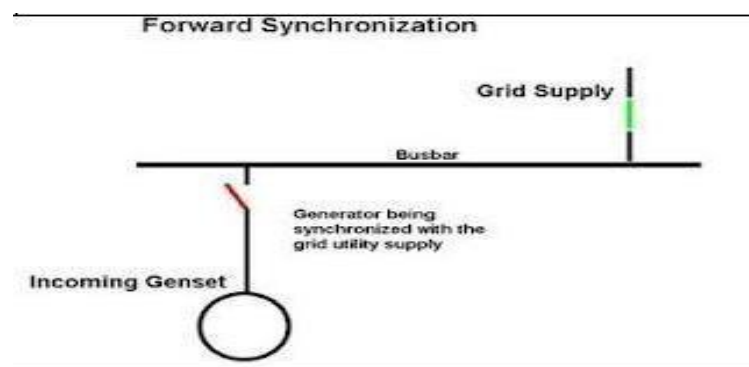
Pembangkit tenaga listrik, memiliki perlengkapan untuk indikator paralel generator banyak yang menggunakan alat *synchroscope*. Penggunaan alat ini, (*voltmeter*) untuk memonitor kesamaan tegangan dan frekuensi meter untuk kesamaan frekuensi. Ketepatan sudut fasa dapat dilihat dari *synchroscope*. Bila jarum penunjuk berputar berlawanan arah jarum jam berarti frekuensi generator lebih rendah dan bila searah jarum jam berarti frekuensi generator lebih tinggi. Pada saat jarum telah diam dan menunjuk pada kedudukan vertikal, berarti beda fasa generator dan bus telah 0 (Nol) dan selisih frekuensi telah 0 (Nol), maka pada kondisi ini saklar dimasukkan (ON). *Synchroscope* tidak bisa menunjukkan urutan fasa bus, sehingga untuk memparalelkan perlu dipakai indikator urutan fasa bus.

2.2.5.2. Tipe Sinkron Berdasarkan Arah Susunan

Berdasarkan arah susunan peralatan pada sistem tenaga listrik, sinkronisasi dibagi menjadi dua jenis. Sinkronisasi Berdasar Susunan Peralatan:

2.2.5.2.1. *Forward Synchronization*

Foward Synchronozation, yaitu proses sinkronisasi generator ke dalam sistem atau busbar.

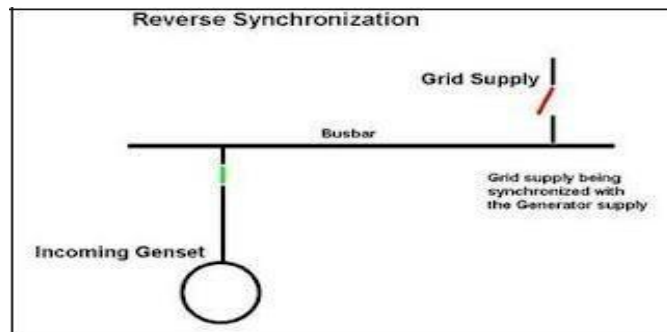


Gambar 2.36 Sinkronisasi Maju

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.5.2.2. *Reverse Synchronization /Backward Synchronization*

Biasanya digunakan pada system tenaga listrik di suatu pabrik, dimana suatu jaringan suplai akan digabungkan ke dalam suatu jaringan system atau busbar yang ada. Pada kondisi ini tidak dimungkinkan untuk mengatur parameter sinkron pada sisi *incoming* (jaringan yang akan disinkronkan), yang terpenting CB (PMT) dari beban- beban pada jaringan suplai (*grid supply*) dalam keadaan terbuka.



Gambar 2.37. Sinkronisasi Terbalik

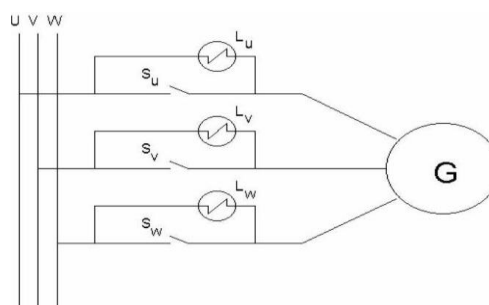
Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.5.3. Metoda sinkron

Metoda sederhana yang digunakan untuk mensinkronkan adalah dengan menggunakan sinkroskop lampu, yang harus diperhatikan dalam metoda ini adalah lampu – lampu indikator harus sanggup menahan dua kali tegangan antar fasa.

2.2.5.3.1. Sinkronoskop Lampu Gelap

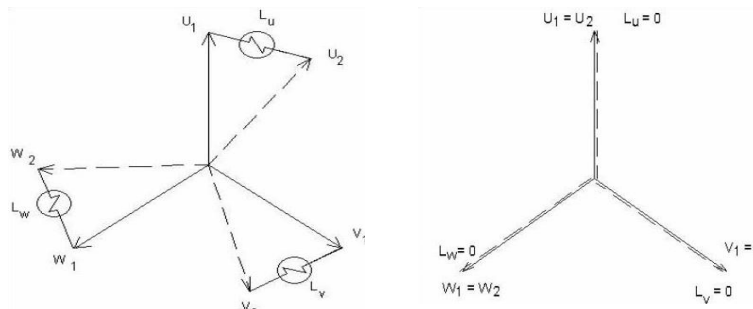
Jenis sinkronoskop lampu gelap pada prinsipnya menghubungkan antara ketiga fasa, yaitu U dengan U, V dengan V dan W dengan W. Sinkronoskop dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.38. Skema Sinkronoskop Lampu Gelap

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Pada hubungan ini jika tegangan antar fasa adalah sama maka ketiga lampu akan gelap yang disebabkan oleh beda tegangan yang ada adalah 0, juga sebaliknya, apabila diantara fasa terdapat beda tegangan lampu akan menyala. Ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:

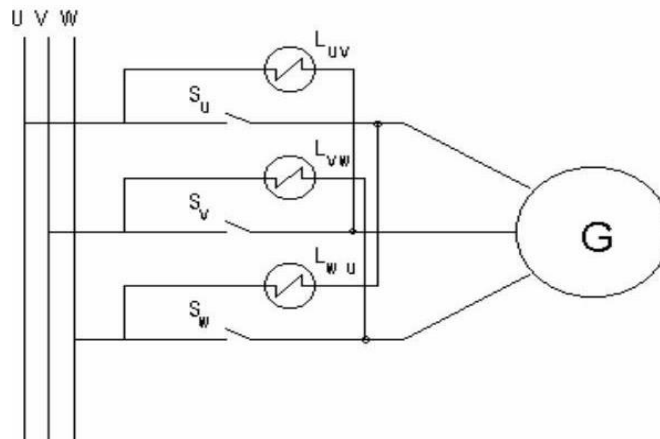


Gambar 2.39. Beda Tegangan Antara Fasa Pada Sinkronoskop Lampu Gelap

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.5.3.2. Sinkronoskop Lampu Terang

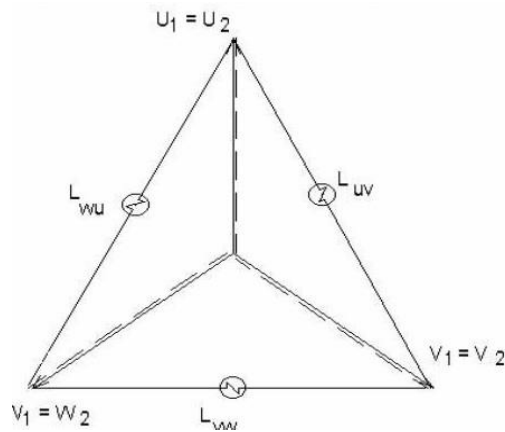
Jenis sinkronoskop lampu terang pada prinsipnya menghubungkan antara ketiga fasa, yaitu U dengan V, V dengan W dan W dengan U. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.40. Skema Sinkronoskop Lampu Terang

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Sinkronoskop lampu terang adalah kebalikan dari sinkronoskop lampu gelap. Ketika antara fasa terdapat beda tegangan maka ketiga lampu akan menyala sama terang dan generator siap untuk diparalel. Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar dibawah ini:

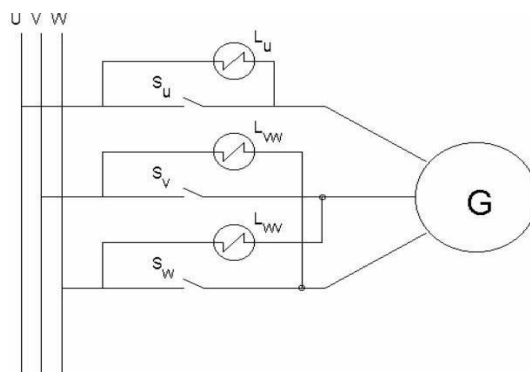


Gambar 2.41. Beda Tegangan Antara Fasa Sinkronoskop Lampu Terang

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

2.2.5.3.3. Sinkronoskop Lampu Terang Gelap

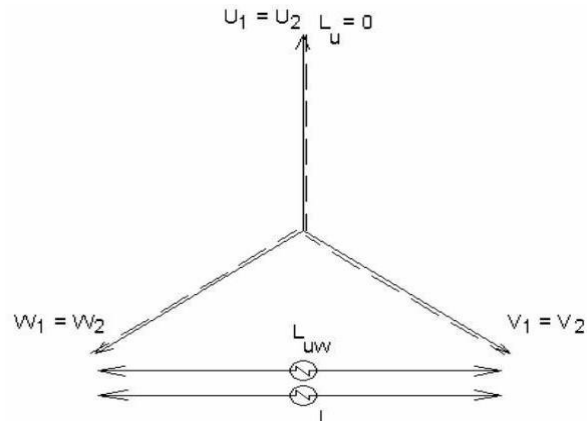
Sinkronoskop jenis ini dapat dikatakan merupakan perpaduan antara sinkronoskop lampu gelap dan terang. Prinsip dari sinkronoskop ini adalah dengan menghubungkan satu fasa sama dan dua fasa yang berlainan, yaitu fasa U dengan fasa U, fasa V dengan fasa W dan fasa W dengan fasa V. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada skema dibawah ini:



Gambar 2.42. Skema Sinkronoskop Lampu Terang Gelap

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

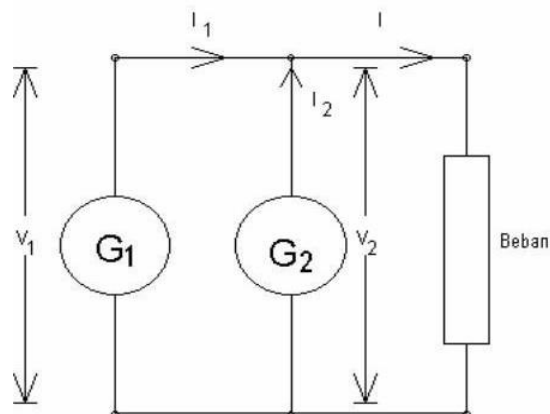
Pada sinkronoskop ini generator siap diparalel, jika satu lampu gelap dan dua lampu lainnya terang. Pada kejadian ini dapat diterangkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.43. Beda tegangan antara fasa sinkronoskop lampu terang gelap

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Persyaratan sinkron antar generator jika tidak terpenuhi maka: Jika Frekuensi tidak sama berdasarkan rumus $f = ((p \cdot n) / 120)$ maka terdapat hubungan kesebandingan antara f dan n , jika frekuensi tidak sama atau $f_1 > f_2$, maka seolah – olah generator pertama (G_1) akan menarik generator kedua (G_2). Hal ini disebabkan karena perbedaan frekuensi artinya terdapat perbedaan tegangan Dan G_2 diperlakukan sebagai beban (motor) oleh G_1 .



Gambar 2.44. Diagram Sinkron 2 Generator

Sumber (Laporan Kerja Praktik Robi Kurnia Tisna Teknik Elektro UMY 2017)

Dari diagram diatas, diketahui bahwa G1 dengan tegangan output E1 / dan tegangan G2 adalah E2 / fasa, dan R beban atau busbar » 0. Dengan hokum fasa kirchoff, bahwa $\sum E = 0$ Pada loop 1, $E1 - E2 - i1 \cdot R_{busbar} = 0$ $E1 - E2 - i1 \cdot 0 = 0$ Karena G1 paralel G2 maka, $E1 = E2$, sehingga:

$$E1 - E1 - i1 \cdot R_{busbar} = 0$$

$$i1 = (0 / R_{busbar}) = 0/0 = 0$$

Apabila $E1 \neq E2$ maka $E1 - E2 = \Delta E$

$$i1 = (\Delta E / R_{busbar}) = \Delta E / 0 = \infty$$
 Dan arus $i1$ akan memukul ke G2.

Sinkronisasi dilakukan dengan memonitor tegangan dari salah satu atau dua fasa output generator dan tegangan fasa-fasa yang sama dengan jaringan. Unit-unit kecil biasanya menggunakan satu fasa dan sistem pembangkit listrik biasanya menghasilkan tiga fasa. Sinkronisasi secara otomatis bekerja melalui pengaturan kecepatan dioperasikan menggunakan motor potensiometer. Potensiometer digunakan untuk memonitor kecepatan mesin yang akan menghasilkan frekuensi listrik, potensio ini berfungsi mengatur frekuensi listrik untuk mencocokkan fasa generator mendekati dengan yang ada pada aktif bus. Waktu untuk sinkronisasi bervariasi dari 1/2 detik ke atas. Sinkronisasi tergantung pada seberapa dekat kecepatan governor dan seberapa dekat sinkronisasi itu cocok dengan frekuensi generator terhadap aktif bus.

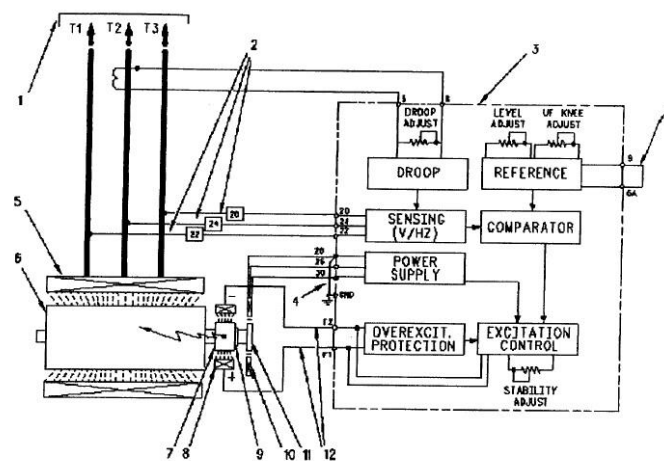
2.2.6. VR (Voltage Regulator)

2.2.6.1. Definisi VR

VR adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk menjaga tegangan generator supaya tetap konstan baik secara *single running* maupun kondisi sinkron. Maksudnya generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu constant terlepas pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

General Information

SMCS Code: 4467



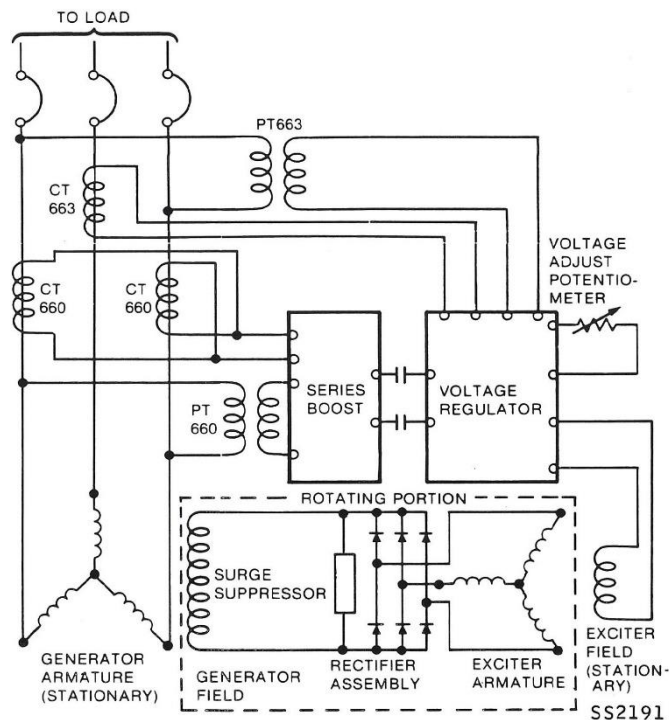
Gambar 2. 45. Volatage Regulator

Sumber (*Voltage Regulator 6-B Manual Caterpilaar RENR2480-02 USA*)

Prinsip kerja dari VR adalah mengatur arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Tegangan output generator jika berada di bawah tegangan nominal tegangan generator maka VR akan meningkatkan medan magnet pada exciter, dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka VR akan menurunkan medan magnet pada exciter. Artinya apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat distabilkan.

2.2.6.2. Prinsip Kerja VR

VR dapat bekerja secara otomatis maupun manual dikarenakan dilengkapi dengan peralatan yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis.

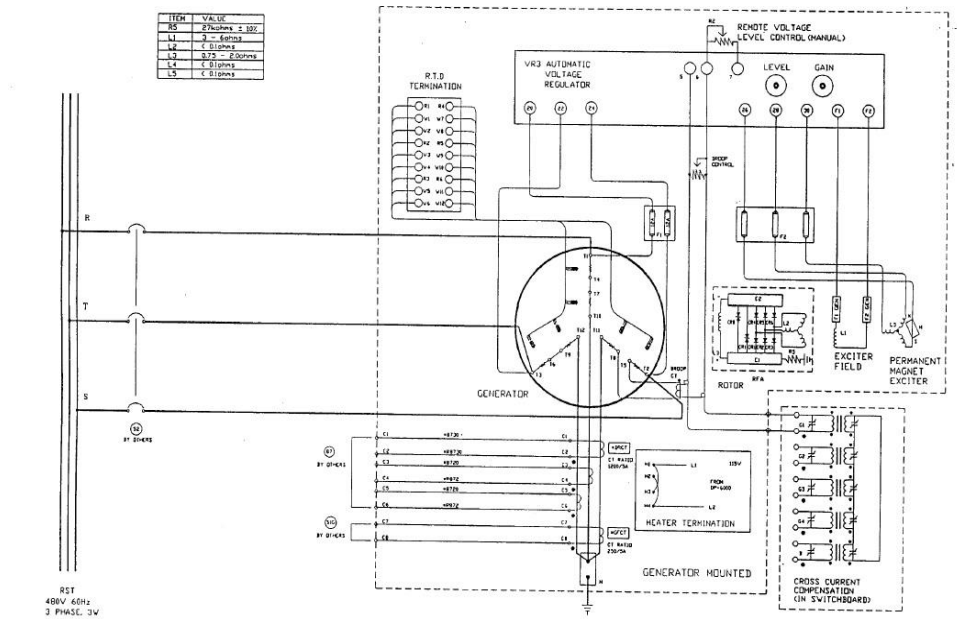


Gambar 2.46. Voltage Regulator Circuit

Sumber (*Voltage Regulator 6-B Manual Caterpilaar RENR2480-02 USA*)

Dengan eksitasi secara terpisah VR dioperasikan dengan mendapat daya dari *permanent magnet generator (PMG)* dengan tegangan 110V, 20A, 400Hz. Serta mendapat sensor dari *potensial transformer (PT)* dan *current transformer (CT)*. Umumnya VR mempunyai bagian utama yaitu suatu kontrol untuk memonitor tegangan output generator, komponen kontrol untuk nilai set poin eksitasi dan kontrol pembanding tegangan output dengan set point untuk memberikan perintah menambah atau mengurangi arus pada eksitasi. VR bekerja dengan menggunakan

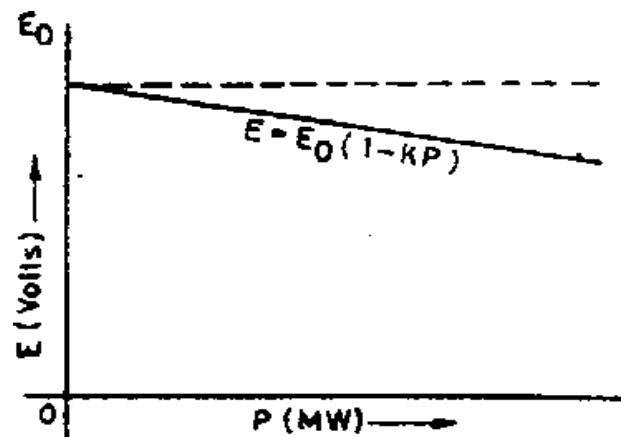
prinsip dasar *error detection* atau deteksi *error* tegangan, ketika output tegangan generator tinggi maka sinyal *error* akan positif dan akan mengurangi arus eksitasi begitu pula sebaliknya, apabila tegangan sama dengan set poin maka error signal akan 0 dan ketika memberikan perintah eksitasi, blok diagram sistem eksitasi pada generator sinkron ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.47. Blok Diagram Eksitasi

Sumber (*Voltage Regulator 6-B Manual Caterpilaar RENR2480-02 USA*)

Medan magnet eksitasi, yaitu output tegangan dan arus generator masuk ke voltage regulator dan dilanjutkan proses sensing di auxiliary control yang diatur nilai tegangan eksitasi sesuai dengan set poinnya, auxiliary control mengatur eksitasi agar tidak melebihi medan magnet di generator.



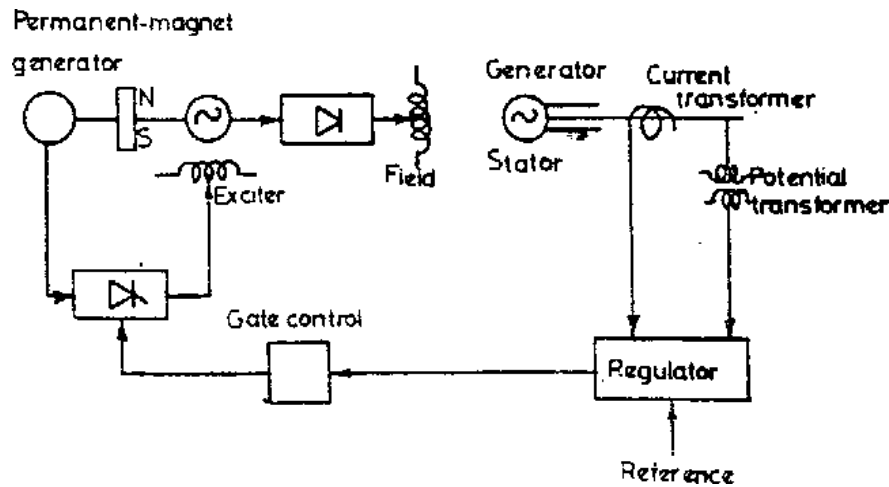
Gambar 2.48. Karakteristik VR

Sumber (*Voltage Regulator 6-B Manual Caterpillar RENR2480-02 USA*)

Fungsi VR antara lain:

- Menjaga kesetabilan tegangan
- Mengatur pembagian daya semu reaktif
- Memberikan pengaturan arus eksitasi

VR mempunyai dua dasar sistem eksitasi yaitu *self excitation* (eksitasi sendiri) dan *separate excitation* (eksitasi terpisah). *Self excitation* mengambil sensor langsung dari output generator. Tegangan output generator yang masuk ke *self excited VR* dengan cara disearahkan dan diproses ke arus medan pada kumparan medan untuk memperbaiki output generator sesuai dengan set poin. *Separate excitation* (eksitasi terpisah) mempunyai magnet permanen pada rotor (*PMG*), *permanent magnet* menginduksi ke sirkit kontrol VR.



Gambar 2.49. *Separate Excitation*

Sumber (*Voltage Regulator 6-B Manual Caterpillar RENR2480-02 USA*)

2.2.7. Governor

2.2.7.1. Definisi Governor

Governor adalah sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengatur bahan bakar atau fluida yang masuk untuk menghasilkan energi kinetik didalam turbin. Perangkat ini penting karena mengontrol output kecepatan atau daya output mesin. *Governor* adalah system pengaturan kecepatan penggerak (*prime mover*) dengan mengontrol *fuel* (atau bahan bakar uap) untuk menjaga kecepatan (atau beban) tetap pada *set point*. Semua *governor* memiliki komponen dasar:

- Pengaturan kecepatan (driver menetapkan set poin kecepatan yang diinginkan)
- Sebagai sensor kecepatan . (driver mengacu pada speedometer).
- Sebuah cara untuk membandingkan kecepatan yang sebenarnya untuk kecepatan yang diinginkan. (driver membandingkan dua kecepatan.)

2.2.7.2. Bagian governor:

- *Speed Governor*

Yaitu peralatan yang mendeteksi sinyal *error* pada *load frekuensi control*.

- *Governor Control Valve*

Kendali *valve input* fluida turbin, dikendalikan oleh *speed control mechanism*.

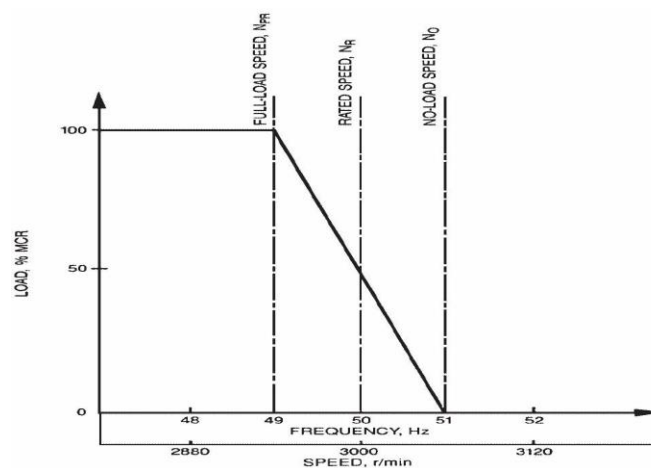
- *Speed Control Mechanism*

Peralatan pendukung *control seperti lever, linkage, servomotor, amplifying device* dan relay yang ditempatkan diantara *speed governor* dan *governor control valve*.

- *Speed Changer*

Menggerakkan *speed governing system* untuk mengatur kecepatan turbin generator dalam keadaan operasi

2.2.7.3. Karakteristik Governor



Gambar 2.50. Karakteristik Frekuensi Terhadap Putaran

Sumber (*Woodward AGLC Manual 82004 USA*)

$$R_s = \frac{N_o - N}{N_r} \times 100$$

Keterangan:

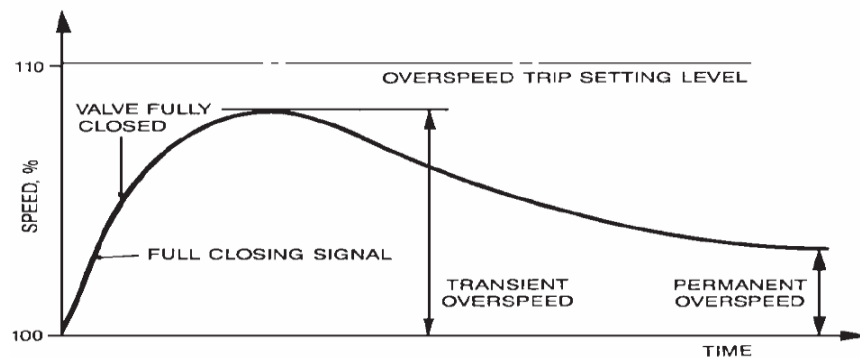
R_s = perubahan kecepatan

N_o = Sistem kontrol satu loop tertutup (*one closedloop*), *feedback* utamanya adalah kecepatan shaft turbin.

speed at no load

N = *speed at full load* N_r = *rated speed*

Acceleration feedback digunakan dengan alasan mencegah *overspeed* saat *load rejection*. *Governor* yang menggunakan *acceleration feedback* akan mampu untuk mengirimkan sinyal seketika percepatan (*acceleration*) dideteksi set point. *Valve* akan bekerja dengan *actuator* yang diperintah oleh *governing system*.



Gambar 2.51. Respon Turbin Terhadap Pelepasan Beban

Sumber (*Woodward AGLC Manual 82004 USA*)

2.2.7.4. Pengatur Kecepatan Acuan (*Governor Speed Reference*)

Input utama yang digunakan untuk mengontrol turbin, khususnya saat sinkronisasi dengan cara mengatur kecepatan acuan. Kecepatan

acuannya biasanya dinaikan hingga 4% agar proses (sinkronisasi) dapat berlangsung.

2.2.7.5. Overspeed Testing

Test overspeed digunakan untuk membuktikan nilai *overspeed* sebenarnya saat trip terjadi. Tentu saja test ini dilakukan saat unit tidak tersinkronasi. *Automatic Run-Up and Loading Systems* Tujuan *automatic run-up and loading systems* adalah

- Membantu operator dalam melakukan rangkaian kerja yang rumit, khususnya saat star-up
- Melakukan pembebanan yang aman dan konsisten.

2.2.7.6. Prinsip Kerja Governor

Governor mengatur aliran fuel dengan memanfaatkan feedback secara loop dalam sistem kontrol yang mengatur jumlah fuel untuk mengatur kecepatan putaran. *Governor* memiliki tugas untuk menjgs kecepatan mesin dengan cara membandingkan kecepatan aktual dengan kecepatan yang diharapkan (kecepatan setpoint).

Governor berprinsip kerja dengan sistem kendali close loop. Sistem kendali loop tertutup (*closed-loop control system*) adalah sistem kendali yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung terhadap aksi pengendaliannya. Dengan kata lain sistem kendali loop tertutup adalah sistem kendali berumpan-balik. Sinyal kesalahan penggerak, yang merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan-balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran dan turunannya), diumpankan ke elemen kendali untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati nilai yang diharapkan.

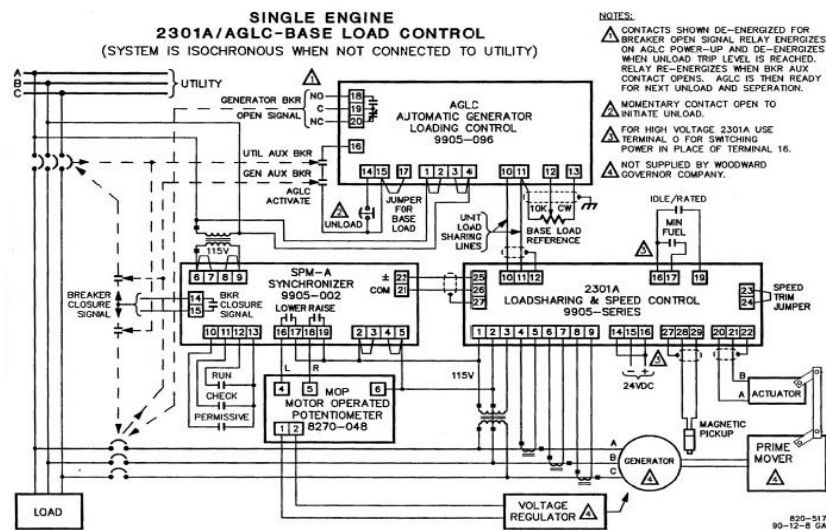
Diagram yang menyatakan hubungan antara masukan dan keluaran dari suatu sistem loop tertutup. Sementara untuk memahami konsep sistem

kendali loop tertutup, perhatikan sistem pengaturan tegangan keluaran generator dc dengan penggerak turbin uap sesuai hasil pengukuran. Melalui penglihatan mata operator terhadap voltmeter yang terpasang pada terminal keluaran generator, sistem dengan cepat mengetahui penyimpangan (kesalahan) jarum penunjuk tegangan dari tegangan kerja yang diharapkan dan secepat itu pulalah ia harus segera bertindak untuk mengatasi perubahan nilai kedudukan agar kembali ke posisi normalnya.

Sistem governing harus berusaha membuat penyimpangan atau kesalahan jarum penunjuk voltmeter sekecil mungkin bahkan nol, dengan memutar *handle valve* pengatur *carburetor* kekanan atau ke kiri tergantung arah simpangan jarum penunjuk yang sesekali lebih besar atau lebih kecil dari tegangan yang ditetapkan. Mengingat balikan keluaran (tegangan generator dc) selalu dibandingkan dengan masukan acuan dan aksi pengendalian terjadi melalui aksi operator, maka sistem ini disebut sistem kendali manual berumpan-balik (*manual feedback control system*) atau sistem kendali manual loop tertutup (*manual closed-loop control system*).

Governor yang baik dapat membandingkan frekuensi secara akurat, sering mengakibatkan pengaturan frekuensi yang sangat lambat. Saat terjadi, waktu yang dibutuhkan untuk pengaturan frekuensi dapat mengakibatkan waktu sinkronisasi cepat. Metode ini kemudian diperbaiki. *Synchronizer* akan mengatur unit frekuensi dengan bus, setelah frekuensi itu cocok sinyal pengaturan kecepatan menyesuaikan kecepatan generator untuk sekitar 0,5% di atas kecepatan sinkron. Motor potensio akan mengatur kecepatan kemudian kembali ke sekitar 0,2% di bawah kecepatan sinkron. Tindakan ini diulang sampai sinkronisasi sudut fasa terjadi dan pemutus sirkuit itu kemudian ditutup. Sebuah sinkronisasi modern yang membandingkan frekuensi dan fasa dari dua tegangan, dan mengirimkan sinyal koreksi ke titik penjumlahan *governor*.

Sistem kendali tersebut menjadi otomatis, yang biasa disebut sistem kendali otomatis ber feed back. Posisi *valve* pengatur laju aliran uap (elemen kendali) otomatis akan mengatur jumlah fuel untuk mendapat putaran turbin dan poros generator sehingga didapat tegangan keluaran yang diharapkan



Gambar 2.52. Sistem Kendali Governor Oleh AGLC

Sumber (*Woodward AGLC Manual 82004 USA*)

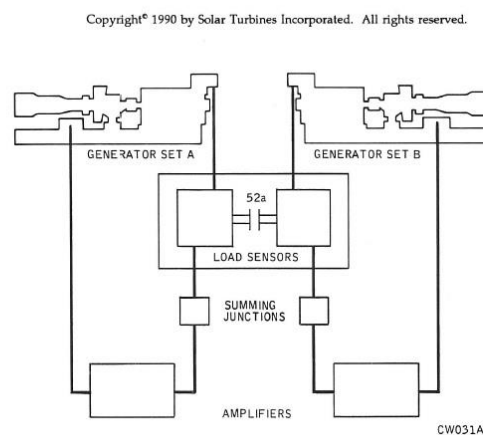
Tegangan output generator diukur dengan menggunakan voltmeter untuk dibandingkan dengan tegangan set point (sinyal referensi) sehingga dihasilkan sinyal kesalahan penggerak. Sinyal kesalahan yang dihasilkan elemen kendali otomatis diperkuat, dan keluaran elemen kendali dikirim ke *actuator* mengubah posisi katup aliran pada carburetor yang mengatur jumlah fuel pengatur putaran turbin, gas engine dan poros generator untuk mengoreksi tegangan keluaran yang sebenarnya. Jika tidak terdapat penyimpangan atau kesalahan tegangan, maka tidak terjadi perubahan posisi katup pengatur aliran catu uap. Sistem kendali manual berumpun-balik dan sistem kendali otomatis berumpun-balik tersebut di atas memiliki prinsip

kerja yang sama. Analoginya mata operator analog dengan detektor kesalahan, otaknya analog dengan elemen kendali otomatis dan tangannya analog dengan aktuator.

Pengendalian sistem yang kompleks dengan operator manusia kurang efektif, karena terdapat beberapa timbal-balik antara beberapa variable. Kita ketahui bahwa, dalam sistem yang sangat simple pun, sistem kendali otomatis dapat menghilangkan setiap kesalahan operasi yang disebabkan oleh manusia. Artinya jika memerlukan pengendalian presisi tinggi, pengendalian sistem harus otomatis.

2.2.8. Load Sensing

Load sensing adalah sensor beban generator. Transformator arus (*CT*) untuk sensor beban. Transformator arus (*CT*) ditempatkan diseluruh output daya yang berasal dari generator. Sebagai beban diterapkan pada generator, arus bolak balik (AC) mengalir melalui garis generator dan menginduksi arus ke *CT*.

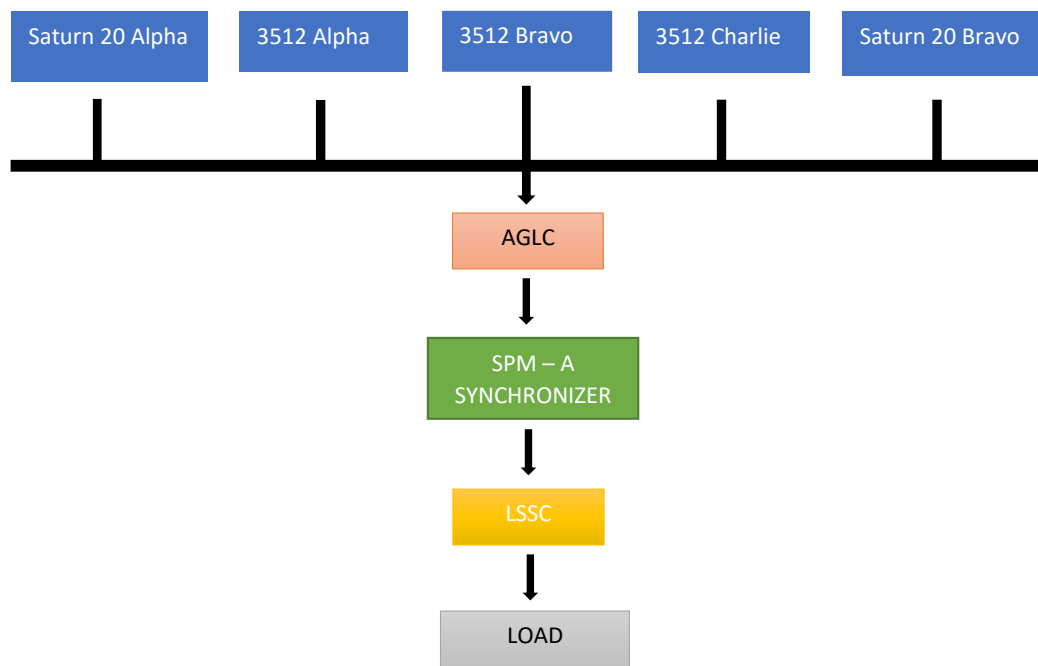


Gambar 2.53. *Load Sensing Paralel Generator*

Sumber (*Operation and Maintenance Instruction for Saturn 20 Solar Turbine Caterpilaar USA*)

Arus dalam *CT* meningkat secara proporsional dengan beban pada generator. Arus yang diinduksi dari *CT* kemudian diubah menjadi tegangan dc di sensor beban. Namun, karena hanya daya nyata yang akan digunakan dalam menentukan output sensor beban, transformator potensial juga terhubung ke output daya dari mesin generator.

Berikut diagram alir system pembangkitan listrik di Kangean Energy Indonesia Ltd Pagerungan *Operation*.



Gambar 2. 54 Diagram pembangkitan listrik di Kangean Energy Indonesia Ltd Pagerungan *Operation*.