

2. TEORI PENUNJANG

2.1. Generator

Pada dasarnya generator adalah suatu alat yang dapat menghasilkan tenaga listrik arus bolak-balik, yaitu dengan mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Untuk menghasilkan energi mekanis dapat dipergunakan mesin diesel, mesin uap, mesin bensin, turbin air, dan lain-lain. Sedangkan untuk menghasilkan energi listrik biasanya dipergunakan mesin sinkron.

Rotor generator ada 2 jenis yaitu:

- Rotor kutub silindris untuk putaran tinggi.
- Rotor kutub menonjol untuk putaran sedang dan menengah.



Gambar 2.1. Generator

Sumber: AVK Deutschland GmbH & Co. KG. *Self regulating brushless generator series DSG*. feb 2002, p.1. 27 Agustus 2008.
<http://www.scribd.com/doc/7252645/Brushless-Generators-Series>

2.1.1. Prinsip Kerja

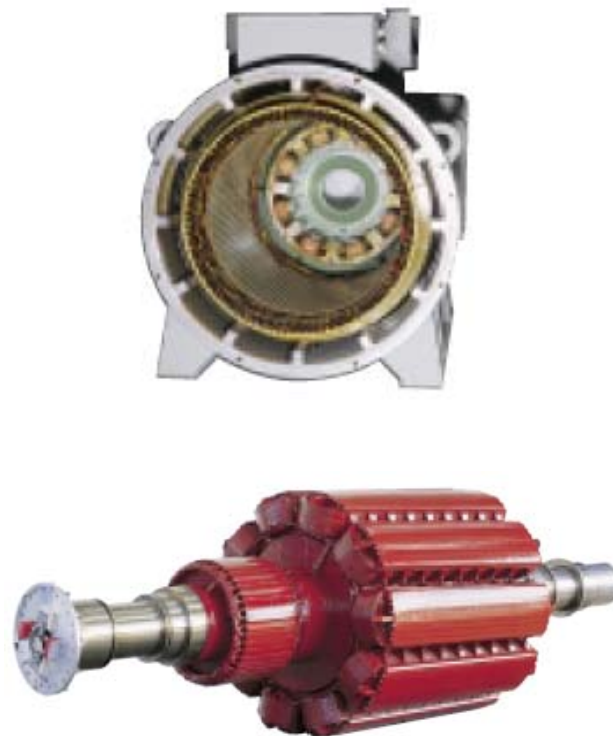
Generator terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

- Kumparan medan pada rotor

Rotor adalah bagian yang berputar dan didesain model *salient pole* yaitu rotor dengan kutub yang menonjol. Rotor terbuat dari besi yang dilaminasi untuk mengurangi arus *eddy*.

- Stator

Inti stator dibuat dari lembaran-lembaran besi elektris yang terlaminasi satu dengan yang lain. Lembaran-lembaran ini kemudian diikat menjadi satu membentuk stator. Laminasi di sini berguna agar rugi arus *eddy* menjadi kecil. Inti stator mempunyai alur-alur di mana kumparan stator diletakkan.



Gambar 2.2. Gambar Stator dan Rotor.

Sumber: AVK Deutschland GmbH & Co. KG. *Self regulating brushless generator series DSG*. feb 2002, p.10. 27 Agustus 2008.

<<http://www.scribd.com/doc/7252645/Brushless-Generators-Series>>

Pada dasarnya pembangkitan tenaga listrik arus bolak-balik biasanya menggunakan mesin sinkron yang bekerja sebagai generator. Prinsip pembangkitan dinyatakan oleh Faraday: Bila ada penghantar yang bergerak pada medan magnet dengan suatu kecepatan, maka akan timbul tegangan pada penghantar tersebut.

Bagian rotor adalah kumparan medan yang dialiri arus searah sehingga menimbulkan medan magnet yang berputar, sedangkan bagian stator adalah kumparan jangkar. Besar tegangan induksi yang dihasilkan pada kumparan jangkar adalah:

$$E_a = 4.44 \cdot K_c \cdot K_d \cdot T \cdot f \cdot \phi \quad (2.1)$$

dimana:

- E_a : tegangan efektif per fasa (volt)
- K_c : faktor jarak kumparan
- T : jumlah lilitan per fasa
- f : frekuensi (hertz)
- ϕ : fluks per kutub (webber)

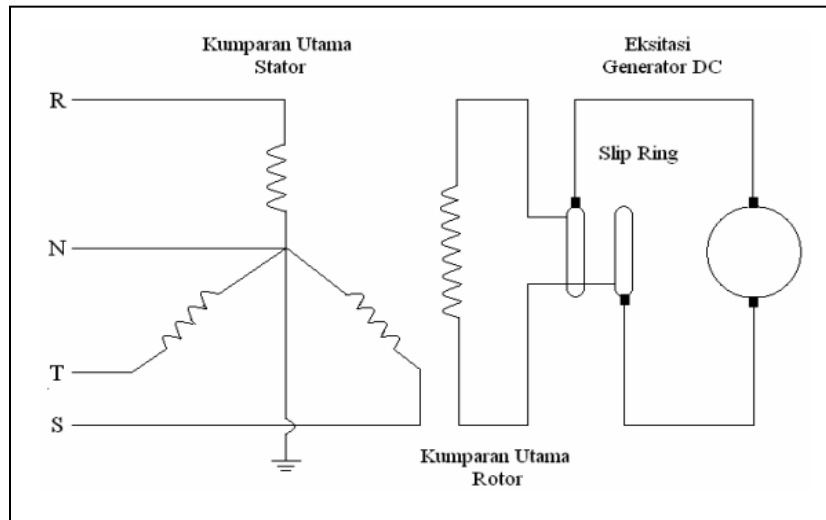
2.1.2. Jenis Generator

Ada beberapa jenis generator yang dikenal secara umum, yaitu:

1. Generator arus bolak-balik konvensional.

Yang dimaksud dengan konvensional adalah menggunakan *slip ring* dan sikat arang untuk mengalirkan arus listrik pada satu bagian yang berputar. Bagian yang berputar adalah kumparan medan atau kumparan pada rotor yang dialiri arus searah agar menimbulkan medan magnet. Untuk jenis yang konvensional ini dipergunakan generator arus searah kecil sebagai sumber arus searah, yang biasa disebut *exiter*. Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah diberikan kepada rotor melalui *slip ring* dan sikat arang. Maka arus searah mengalir ke

dalam kumparan medan atau rotor yang diperlukan untuk menimbulkan tegangan arus bolak-balik.

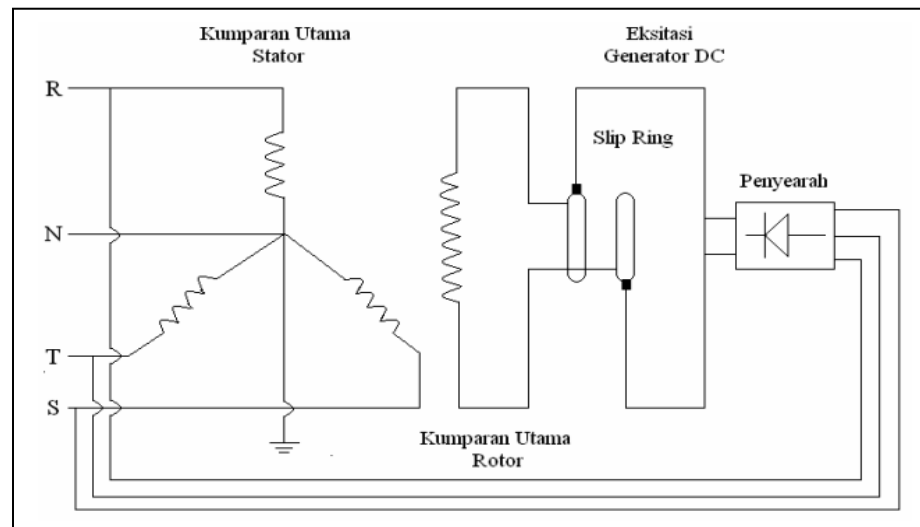


Gambar 2.3. Generator AC Konvensional

Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd, 2000, p.983.

2. Generator arus bolak-balik dengan *static exciter*

Karena generator konvensional kurang begitu handal disebabkan butuh perawatan untuk generator arus searah, maka dikembangkan jenis *static exciter* tegangan arus searah yang diperlukan untuk membangkitkan medan magnet pada rotor diperoleh dengan menggunakan penyearah (*rectifier*) yang tegangannya disuplai dari *output* arus bolak-balik generator utama sendiri. Pada *rectifier* ada juga pengaturnya sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Alat pengontrol tersebut yang disebut AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

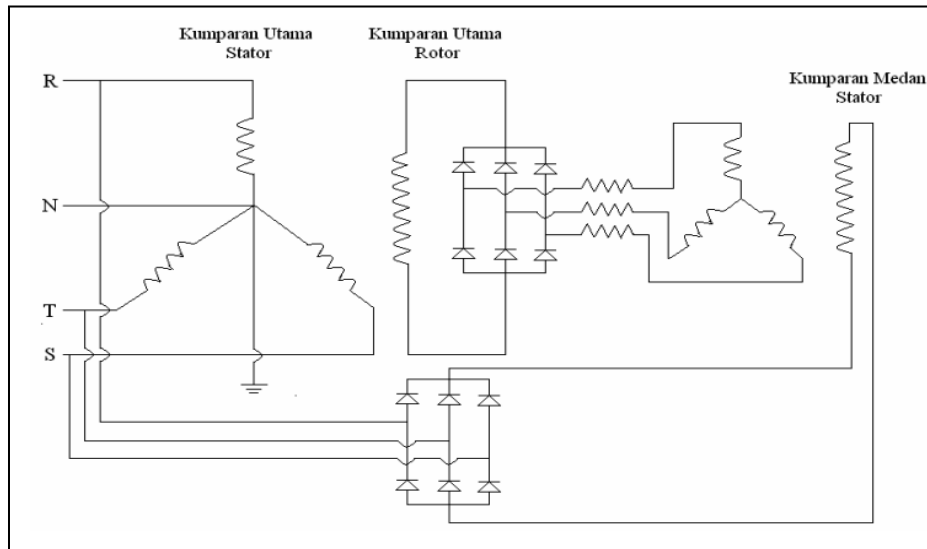


Gambar 2.4. Generator AC dengan *Static Exciter*

Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd, 2000, p.985.

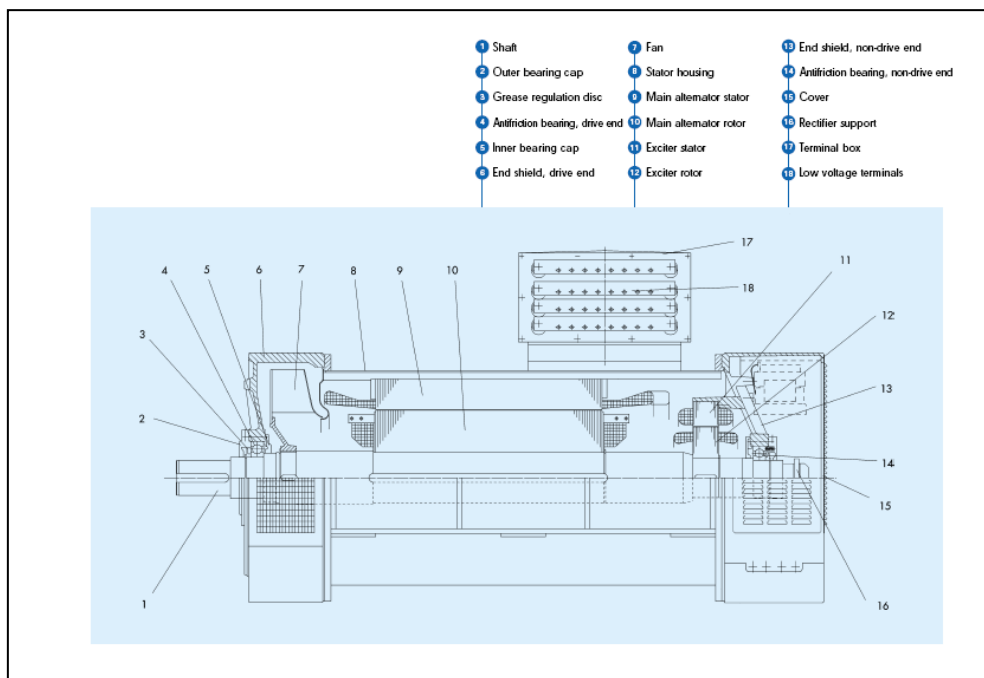
3. Generator *brushless*

Pada prinsipnya generator *brushless* menggunakan generator arus bolak-balik kecil sebagai *exciter*. Generator kecil ini mempunyai kutub luar, artinya arus searah diberikan pada bagian stator untuk menimbulkan medan magnet, sedangkan rotor terdiri dari kumparan bolak-balik. Tegangan yang timbul pada rotor generator bolak-balik kecil dilewatkan *rectifier* dan diteruskan ke rotor generator utama sehingga pada stator generator dapat dihasilkan tegangan arus bolak-balik sesuai dengan nominal.



Gambar 2.5. Generator *Brushless*

Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd, 2000, p.987



Gambar 2.6. Bagian-Bagian Generator.

Sumber: AVK Deutschland GmbH & Co. KG. *Self regulating brushless generator series DSG*. feb 2002, p.7. 30 Agustus 2008.

<http://www.scribd.com/doc/7252645/Brushless-Generators-Series>

Shaft : poros generator

Outer bearing cap : bearing sebelah luar

Antifriction bearing : bearing *antifriction*

Inner bearing cap : bearing bagian dalam

End shield : pelindung bagian ujung generator

Fan : kipas

Stator housing : rumah stator

Main alternator stator : stator utama generator

Main alternator rotor : rotor utama generator

Eksiter stator : stator eksiter

Exiter rotor : rotor eksiter

Cover : penutup

Terminal box : kotak terminal

Low voltage terminal : terminal tegangan rendah

2.1.3. Kecepatan (RPM) dan Frekuensi (Hz) Generator.

Syarat kecepatan untuk generator AC ditentukan oleh:

- Frekuensi dari beban.
- Jumlah *pole* dari generator.

Dengan menggunakan rumus:

$$Frequency (Hz) = \frac{N (Kecepatan) \times P (Jumlah Poles)}{60 (Detik)} \quad (2.2)$$

Hal ini dapat dilihat lebih jelas melalui tabel dibawah:

Tabel 2.1. Frekuensi dan Kecepatan

<i>Frequency (Hz)</i>	<i>Speed (R.P.M)</i>	<i>No. of Poles (rotor coils)</i>
50	1500	4
60	1800	4
50	1000	6
60	1200	6
50	3000	2
60	3600	2

Tabel Frekuensi dan Kecepatan

Sumber: Newage International Ltd. *Fault Finding Manual for exited and Separately Exited Generator*. 2000, p.4. 2 september 2008.
<http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/www/en/common/pdfs/other/fault_finding_manual_8.pdf>

Dari tabel di atas, menghasilkan rumus untuk menghitung kecepatan dari frekuensi.

Mesin 4 *pole* 1 putaran (Hz) = 30 R.P.M.

Mesin 6 *pole* 1 putaran (Hz) = 20 R.P.M.

Mesin 2 *pole* 1 putaran (Hz) = 60 R.P.M.

2.1.4. *Power Factor* (Faktor Daya).

Daya pada listrik bolak-balik (AC) memiliki dua buah komponen: daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Resultan antara keduanya disebut sebagai daya nyata (S) yang merupakan daya yang dari PLN sebagai pemasok daya.

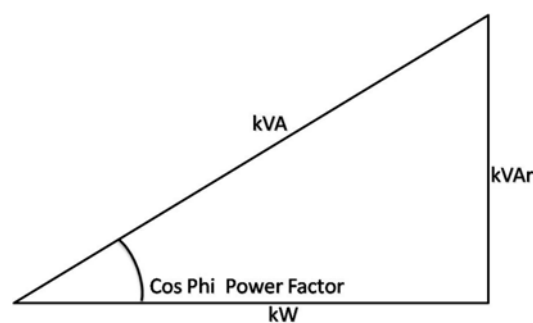
Daya reaktif (Q) dapat terjadi karena induktansi atau kapasitansi. Induktansi diakibatkan oleh komponen berbentuk kumparan (misalnya motor listrik atau transformator *step down* pada adaptor). Sedangkan kapasitansi diakibatkan oleh komponen kapasitor. Sifat induktansi dan kapasitansi ini saling

berlawanan pada diagram segitiga daya, komponen induktansi memiliki arah ke bawah sedangkan komponen kapasitansi memiliki arah ke atas.

Pada beban induktif, arus *lagging* atau tertinggal terhadap tegangan. Begitu pula sebaliknya pada beban kapasitif, arus *leading* atau mendahului tegangan. *Cos phi* ini menyebabkan rugi daya beban, yang seharusnya energi listrik tersebut sepenuhnya untuk energi gerak pada motor listrik misalnya, ada sebagian energi yang berubah menjadi energi panas.

Daya aktif (P) adalah daya sebenarnya yang dibutuhkan oleh beban. Tetapi daya yang perlu dipasok oleh PLN adalah daya nyata (S). Untuk meminimalkan daya yang perlu dipasok PLN, maka sebisa mungkin daya reaktif (Q) harus dieliminasi. Jika beban bersifat induktif, maka perlu ditambahkan kapasitor; dan jika beban bersifat kapasitif, maka perlu ditambahkan induktor sedemikian sehingga daya reaktif (Q) mendekati nol. Karena beban pada lingkungan perumahan sebagian besar bersifat induktif.

Motor induksi dengan beban penuh dapat memberikan faktor daya tinggi seperti tercantum dalam papan namanya (*name plate*) sekitar 0,8 sampai dengan 0,9. Namun bila motor berbeban kecil maka faktor daya akan turun, dan bahkan bila tanpa beban, faktor daya motor bisa mencapai 0,3. Kondisi ini dapat diatasi bisa dilakukan pengaturan tegangan motor yang selalu dapat disesuaikan dengan besarnya beban setiap saat.



Gambar 2.7. Segitiga Daya.

Sumber: Newage International Ltd. *Fault Finding Manual for excited and Separately Excited Generator*. 2000, p.5. 2 september 2008.
http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/www/en/common/pdfs/other/fault_finding_manual_8.pdf

kW dapat dihitung dengan rumus:

$$kW = \frac{\text{Volts} \times \text{Amperes} \times \text{Power Factor}}{1000} \quad (2.3)$$

kVA (kilo Volt Ampere), dapat dihitung dengan rumus:

$$kVA = \frac{\text{Volts} \times \text{Amperes}}{1000} \quad (2.4)$$

Penghitungan keduanya dikalikan dengan $\sqrt{3}$ (1.732) untuk mesin 3 fasa.

2.1.5. Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan dari generator didefinisikan sebagai perubahan tegangan dari beban nol ke beban penuh dengan menjaga eksitasi tetap dan putaran tetap. Pengaturan tegangan dilakukan oleh AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dengan membandingkan harga tegangan yang dihasilkan oleh generator dengan tegangan dari sistem. AVR bertugas untuk menjaga tegangan yang dihasilkan oleh generator tetap konstan (dengan toleransi 5%).

$$\% \text{ regulasi} = \frac{E_0 - V}{V} \times 100\% \quad (2.5)$$

Untuk faktor daya yang mendahului, tegangan terminal turun sehingga diperoleh regulasi positif.

Untuk menentukan regulasi generator yang besar dapat dilakukan dengan beberapa cara:

- Metode impedansi sinkron (EMF).
- Metode MMF.
- Metode *portier* atau faktor daya nol.
- Metode-metode tersebut tidak dibahas dalam penulisan tugas akhir ini.

2.1.6. Panel Kontrol Generator.

Generator AC didesain untuk menghasilkan tegangan yang cocok berdasarkan besarnya beban yang dihubungkan. Dan panel kontrol didesain secara otomatis untuk mengontrol level tegangan sesuai dengan kondisi beban naik maupun beban turun. Juga ketika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba, maka panel kontrol juga berfungsi untuk mengembalikan kondisi agar dapat kembali stabil dengan waktu yang singkat.

Arus dari generator AC dapat digambarkan dengan menjumlahkan semua beban yang terpasang. Arus menghasilkan temperatur. Jika arus *full load* melebihi arus yang dihasilkan oleh stator maka akan terjadi *overheating*.

Bagian kontrol generator

Rating:

- Tegangan: 380V
- Frekuensi: 50Hz
- Kelas proteksi: IP 42

Panel kontrol generator terdiri dari:

- 1 voltmeter *selector switch*
- 1 frekuensi meter
- 3 ammeter
- 1 kW meter → dihubungkan untuk pengukuran dan proteksi
- Monitor dan kontrol generator yang berfungsi untuk:
 - Memilih operasi generator dengan *mode*.
 - Otomatis, *manual* atau *off*.
 - Memulai dan menghentikan operasi generator.
 - Penyesuaian kecepatan dan tegangan.
 - Mengatur generator CB *On/Off*.

Panel kontrol tersebut berfungsi untuk:

- Pengukuran
Tegangan generator, frekuensi generator, arus generator, daya aktif/reaktif, faktor daya.
- Proteksi
Over current, reverse power, over/under voltage generator, over/under frekuensi generator.
- Sinkronisasi
Sinkronisasi otomatis → termasuk kestabilan tegangan dan frekuensi.
Untuk memberikan indikasi error dalam proses sinkronisasi.

2.2. Automatic Voltage Regulator (AVR).

AVR adalah pengatur tegangan yang berfungsi untuk mengontrol kerja sinkronisasi generator baik dalam keadaan operasi tunggal maupun paralel dengan generator yang lain.

Input AVR adalah tegangan generator dan tegangan *set point*, sedangkan *outputnya* adalah mengatur sistem eksitasi generator. Jadi prinsip utama kerja AVR adalah dengan membandingkan nilai tegangan dari generator lalu dibandingkan dengan nilai tegangan *set point*. Apabila nilai tegangan generator kurang dari nilai tegangan *set point* maka AVR akan menaikkan tegangan dari generator dengan cara menambah tegangan eksitasi. Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut:

Pada saat generator beroperasi, rotor utama dari generator akan berputar dan menghasilkan tegangan DC.

Melalui celah udara rotor utama akan menginduksi stator utama generator. Di stator utama tegangan DC akan berubah menjadi tegangan AC.

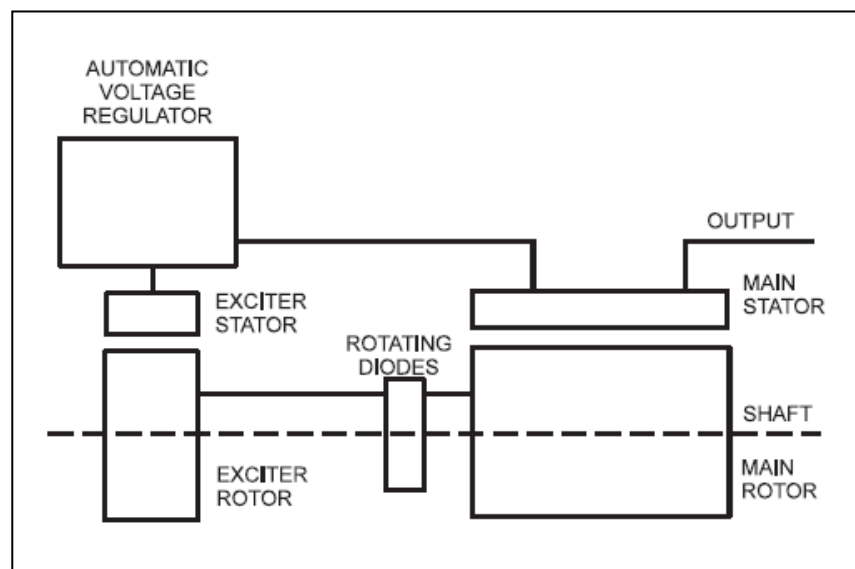
Tegangan AC dari stator utama generator dihubungkan dengan AVR. Di AVR tegangan dari stator utama akan dibandingkan dengan tegangan dari *set point* AVR.

Dan bila tegangan dari generator di bawah dari tegangan *set point* maka AVR akan merespons dengan mengontrol bagian stator eksiter. Tegangan AC dari AVR akan masuk ke dalam stator eksiter.

Stator eksiter akan menginduksi rotor eksiter untuk berputar dan menghasilkan arus eksitasi (arus AC).

Agar supaya arus eksitasi dari rotor eksiter (arus AC) dapat masuk ke dalam rotor utama (tegangan DC) maka diperlukan *rotating diode*.

Rotating diode rectifier berfungsi untuk mengubah arus AC ke DC. Hal ini dilakukan agar supaya arus eksitasi dapat masuk dalam rotor utama generator.



Gambar 2.8. Rangkaian AVR Generator

Sumber: Newage International Limited. *Installation, Service & Maintenance Manual for AC generators with the following prefixes: HCI; HCM; HCK 4,5,6,7..2000*, p.5. 4 september 2008.

<<http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/www/en/common/pdfs/manuals/HC4-7English.pdf>>.

Fungsi AVR:

- Mengatur tegangan *output* dari generator.
- Mengatur pembagian KVA reaktif antara unit yang bekerja paralel.

- Mengatur arus eksitasi terutama dalam kondisi gangguan. Agar supaya gangguan cepat untuk dihilangkan dan generator tidak keluar dari sistem sinkronisasi.
- Menurunkan tegangan. Apabila secara tiba-tiba beban generator terlepas dan terjadi *over voltage*.

Dalam pengoperasian generator tunggal, nilai tegangan dari generator harus konstan, karena akan mempengaruhi daya, frekuensi dan temperatur dari generator. Dan ketika beroperasi paralel dengan sistem maupun dengan generator yang lain maka akan dihasilkan daya reaktif yang stabil.

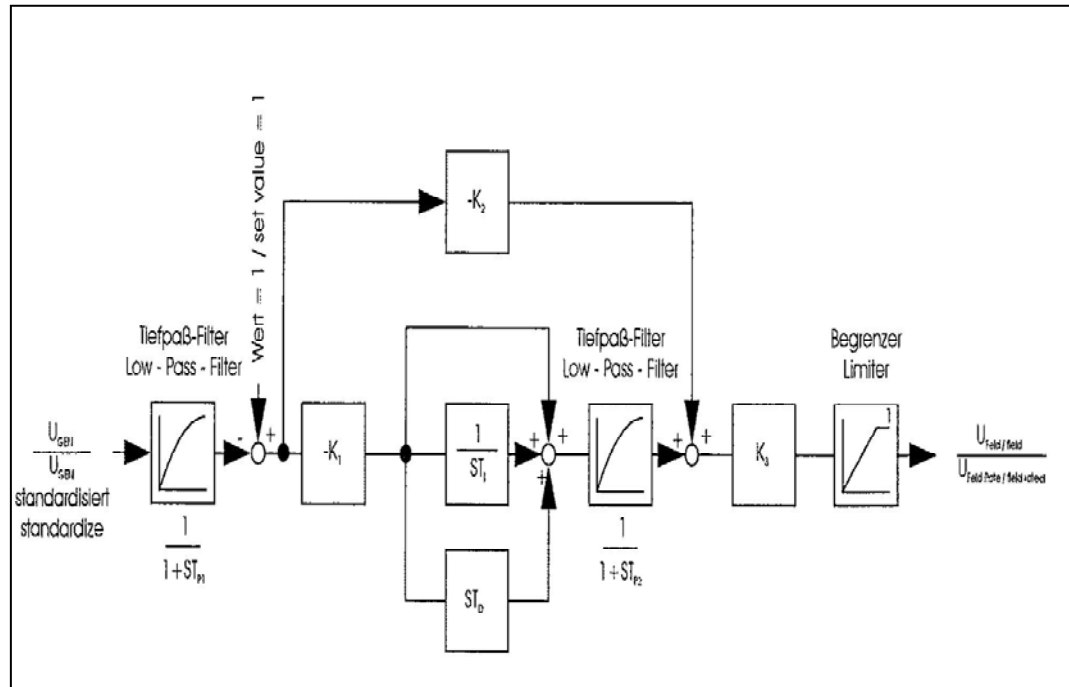
AVR terdiri dari 3 bagian utama, yaitu:

- komponen untuk memonitor tegangan *output* dari generator.
- komponen untuk menentukan harga tegangan *set point* dan
- komponen yang dapat membandingkan tegangan *output* generator dengan tegangan *set point* → komponen ini akan menghasilkan *error signal* yang akan menjadi acuan AVR untuk mengeluarkan perintah menambah atau mengurangi arus eksitasi.

AVR bekerja dengan menggunakan prinsip dasar *Error Detection*. Saat generator bekerja maka AVR akan membandingkan harga tegangan generator dengan harga tegangan *set point*. Harga tegangan dari generator dan *set point* haruslah terus konstan. Proses perbandingan dari tegangan generator dan *set point* tersebut akan menghasilkan *error signal*.

- Jika tegangan *output* tinggi maka *error signal* akan positif (+) lalu secara otomatis akan memberi perintah untuk mengurangi arus eksitasi (I_f).
- Jika tegangan *output* generator cocok dengan harga tegangan *set point* maka *error signal* nol (0), AVR tidak memberikan perintah apapun (*no command*).

- Jika tegangan *output* rendah maka *error signal* akan negatif (-) lalu secara otomatis akan memberi perintah untuk menambah arus eksitasi (If).

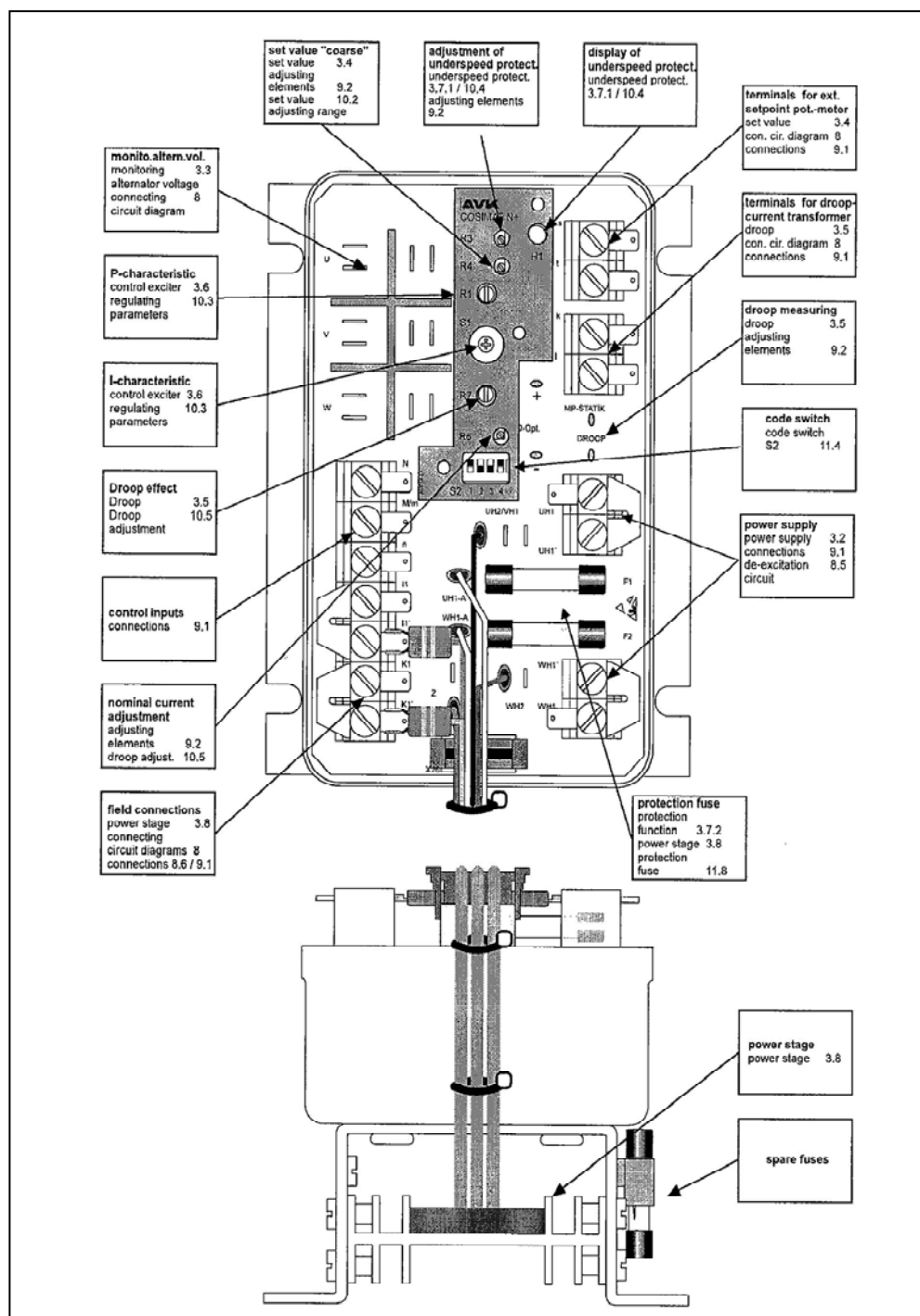


Gambar 2.9. *Transfer Function AVR.*

Sumber: Newage AVK SEG. *Description and adjustment instructions "COSIMAT N+" voltage regulator for DSG and DIG alternators.* 2000.p.12. 4 September 2008 <<http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/products/avk/voltageregulators/#cosimatc+.pdf>>

Pada generator tegangan tinggi kita harus memonitor tegangan dan arus. Untuk dapat memonitor tegangan dan arus kita harus menggunakan *Power Transformer* dan *Current Transformer*. Hal ini disebabkan karena untuk dapat menghubungkan generator dengan alat pengukuran kita harus menurunkan harga tegangan dan arus.

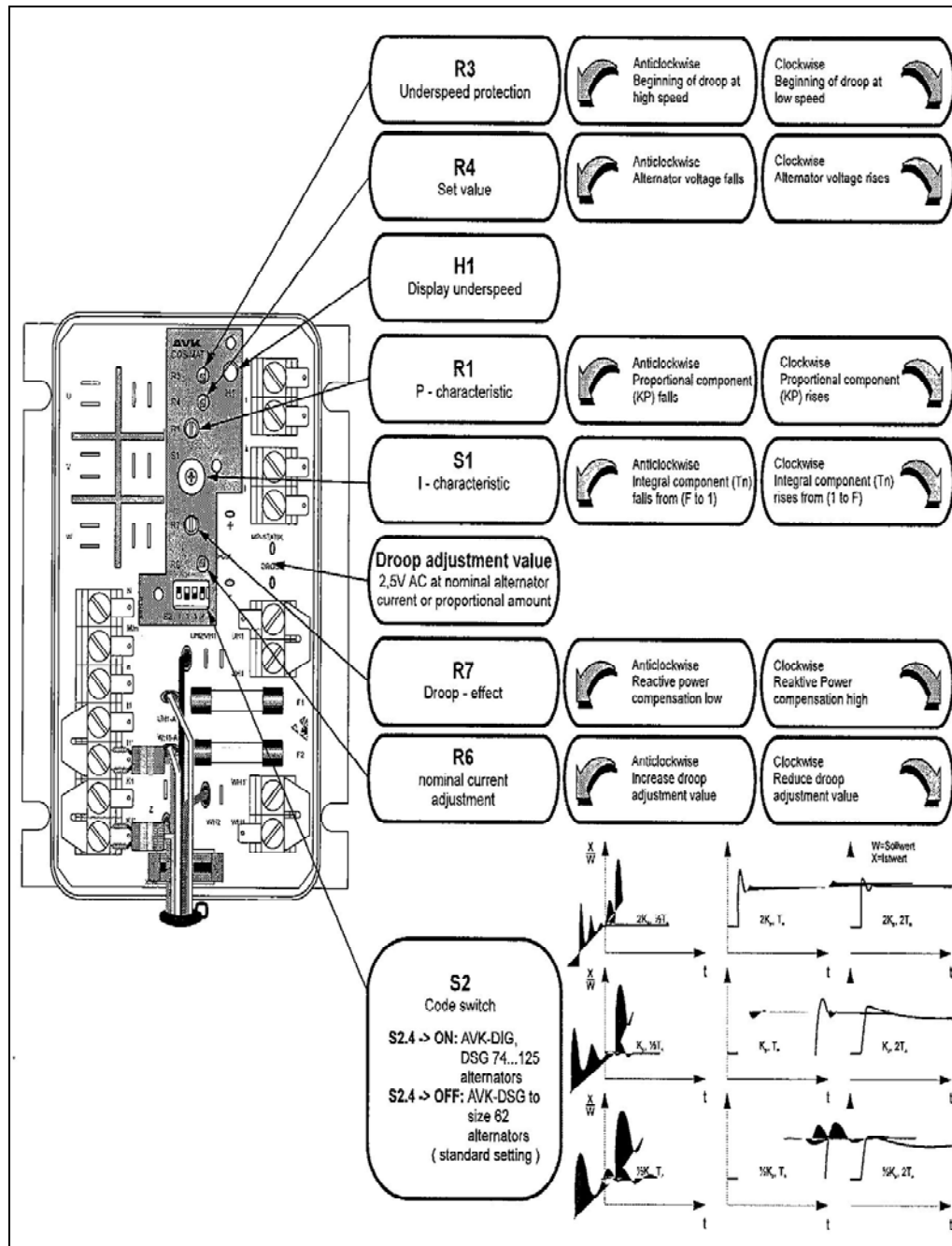
2.2.1. Bagian-Bagian dari AVR.



Gambar 2.10. Bagian-Bagian dari AVR

Sumber: Newage AVK SEG. *Description and adjustment instructions "COSIMAT N+" voltage regulator for DSG and DIG alternators.* 2000.p.3. 12 September 2008
http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/products/avk/voltageregulator_s/#cosimatc+.pdf

- *Terminal for ext. set point* potensiometer : berfungsi untuk memasukkan nilai tegangan *set point* yang akan menjadi acuan perbandingan nilai tegangan dari generator.
- *Terminal for droop current transformer* : berfungsi untuk *input* pengaturan *droop* dari CT.
- *Droop measuring* : pengukuran nilai *droop*.biasanya dihubungkan dengan AVO meter
- *Code switch* : switch untuk fungsi-fungsi tambahan dari AVR (S2.2→ untuk *ON/OFF underspeed protection*, S 2.4→ untuk menambah parameter D).
- *Power supply* : sebagai sambungan/koneksi power supply untuk AVR.
- *Protection or Fuse* : sekering proteksi AVR.
- *Field connections* : untuk koneksi dengan arus medan (eksitasi).
- *Nominal current adjustment* : untuk pengukuran nilai arus nominal.
- *Control input* : masukan untuk pengaturan.
- *Droop effect* : efek dari droop.
- *I characteristic* : sebagai kontrol karakteristik parameter I (*Integrated*).
- *P characteristic* : sebagai kontrol karakteristik parameter P (*proportional*).
- *Monitor alternator voltage* : memonitor/ kontrol tegangan generator.
- *Set value “course”* : setting nilai course.
- *Adjustment of underspeed protection* : untuk input proteksi *underspeed*.
- *Display of underspeed protection* : untuk menunjukkan proteksi *underspeed*. pada AVR.



Gambar 2.11. Setting AVR

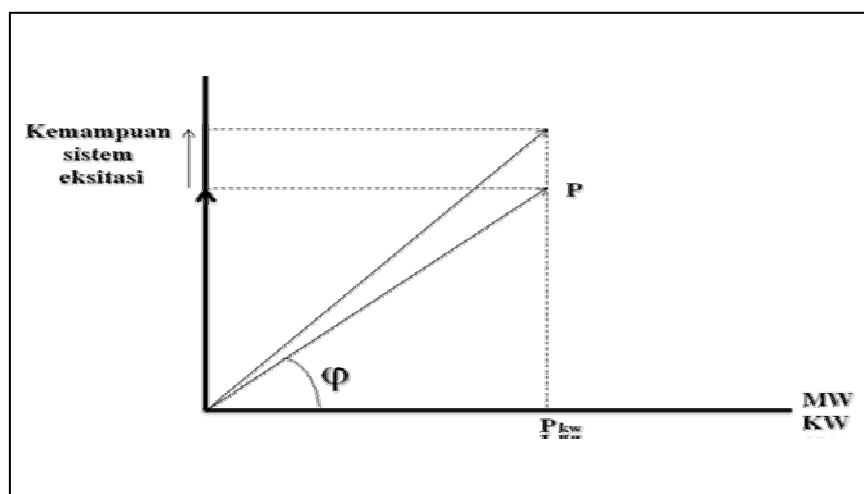
Sumber: Newage AVK SEG. "Description and adjustment instructions" COSIMAT N+ "voltage regulator for DSG and DIG alternators.2000. p.4.4 September 2008 <<http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/products/avk/voltage regulators/#cosimat+>>

2.2.2. Sistem Eksitasi

Pembebanan beban resistif dan beban induktif dapat menyebabkan tegangan generator turun. Dan untuk mengembalikan tegangan generator yang turun pada harga tegangan semula, generator harus menambah arus eksitasi (*over excitation*). Namun jika beban kapasitif naik maka akibat dari pembebanan tersebut tegangan generator akan naik pula. Oleh sebab itu harus mengurangi arus eksitasi (*under excitation*). Kesimpulannya bila kita melakukan pengaturan tegangan generator berarti kita juga harus mengatur arus penguatan (arus eksitasi). Jika arus eksitasi naik maka tegangan generator juga akan naik. Begitu pula sebaliknya.

Fungsi dari eksitasi adalah untuk menghasilkan medan magnet yang berputar. Dengan adanya medan magnet pada kumparan yang berputar (pada rotor eksiter), maka akan menghasilkan arus eksitasi.

Jika beban induktif terus naik dan sumber eksitasi sudah tidak mampu lagi untuk menambah arus eksitasi (melewati batas kemampuan dari sistem eksitasi) maka akan terjadi kerusakan sumber eksitasi. Lihat gambar 2.12



Gambar 2.12 Diagram Kemampuan Sistem Eksitasi

Sumber: Newage AVK SEG. *Description and adjustment instructions "COSIMAT N+" voltage regulator for DSG and DIG alternators*.2000.p.8. 10 September 2008
<http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/products/avk/voltageregulators/#cosimatc+.pdf>

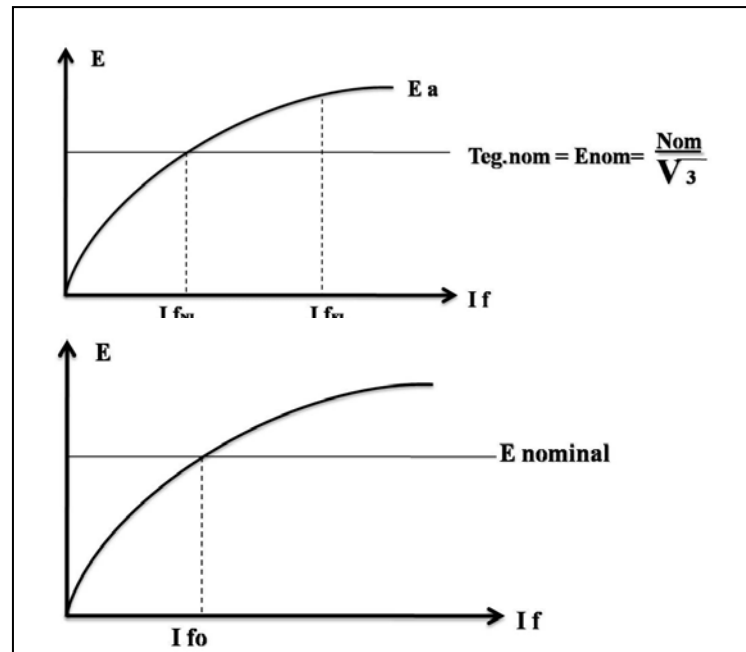
Jika $\cos \alpha$ lebih besar maka akan melampaui kemampuan sistem eksitasi. Dalam hal ini disebut "*Loss Of Field*". Kondisi dimana generator akan mendapatkan tegangan dari sistem sehingga generator akan menjadi motor sinkrun yang juga berarti generator menjadi beban. Untuk itu diperlukan *Reverse Power Relay* untuk mencegah kondisi tersebut.

Untuk generator brushless eksitasi berasal dari AC *exciter*. Yang terdiri dari kumparan magnet yang statis dan kumparan AC yang berputar. Kumparan AC yang berputar menghasilkan arus AC yang disuplai ke *rotating rectifier diode*. *Rotating diode* akan mengubah arus AC menjadi arus DC. Sehingga arus eksitasi dapat masuk ke dalam main rotor dari generator.

Kumparan magnet yang ada di luar tidak berputar/statis. Kumparan magnet dibagi menjadi 2 bagian:

- Bagian yang pertama *Voltage dependent* untuk menyediakan eksitasi primer. Yang mana arusnya berasal dari PT.
- Bagian yang kedua *Current Dependent (armature reaction)* untuk menyediakan eksitasi tambahan (diatur oleh AVR).dimana arusnya berasal dari CT.

2.2.3 Besarnya Arus Eksitasi



Gambar 2.13 kurva karakteristik beban kosong dengan kurva karakteristik beban penuh.

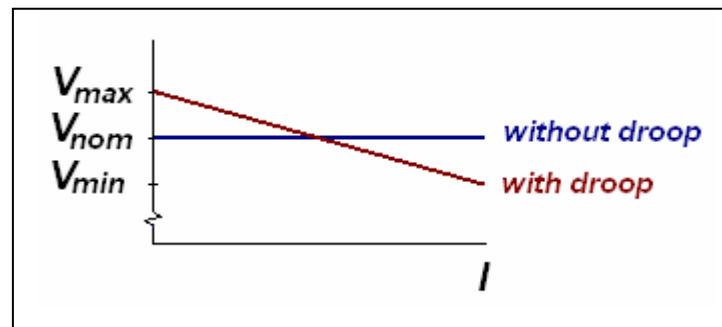
Sumber: Newage AVK SEG. *Description and adjustment instructions* "COSIMAT N+" voltage regulator for DSG and DIG alternators. 2000.p.9. 16 Oktober 2008 <http://www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/products/avk/voltageregulators/#cosimatc+.pdf>

Waktu beban kosong besarnya arus eksitasi ditentukan oleh tegangan dari generator ($E_a = V\alpha$). Dalam kondisi ini AVR belum bekerja.

Jika ada beban yang terpasang pada generator dengan $\cos \alpha$ induktif. Maka tegangan intern lebih besar dari tegangan generator ($E_a > V\alpha$). Dalam kondisi ini arus eksitasi harus ditambah (*over excitation*). Besarnya arus eksitasi pada saat beban penuh adalah 2-2,5 arus eksitasi pada saat beban kosong ($I_{f FL} = 2-2,5 I_{f NL}$). Untuk lebih jelas dapat dilihat dari kurva karakteristik beban kosong dengan kurva karakteristik beban penuh diatas.

Besarnya arus eksitasi yang digunakan untuk generator unit besar adalah 0,5% dari output generator. Dan tegangan eksitasi diusahakan sekecil mungkin. Untuk unit besar generator tegangan eksitasi maksimum 400 V DC dan untuk unit kecil tegangan untuk eksitasi maksimum 24,48,60,100 V DC.

2.2.4 Voltage Droop.



Gambar 2.14 Diagram fungsi Droop dengan tegangan

Sumber: Wikimedia Foundation, Inc. *Droop_behaviour*. Desember 2007.16 Oktober 2008.

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/1/15/Droop_behaviour.png>

Voltage droop adalah turun atau berkurangnya nilai tegangan generator akibat dari adanya pemasangan beban.

Ketika generator beroperasi dan terhubung dengan beban maka akan terjadi penurunan tegangan dari generator. Dan pengatur tegangan (AVR) harus menyesuaikan tegangan generator tersebut dengan cara menambah arus eksitasi. Tetapi fluktuasi yang terjadi pada tegangan sistem pembebanan akan menyebabkan generator menghasilkan arus reaktif $> I$ Nominal. Dan untuk menstabilkan arus reaktif dari generator kita perlu untuk mengukur variable dari arus reaktif tersebut dan menyatukan magnitude dari arus dan daya reaktif (induktif atau kapasitif). Pengukuran dari variable tersebut dikenal sebagai *additional point* dari *control amplifier circuit*.

Hal ini menghasilkan *static droop characteristic*, dimana hal ini menunjukkan bahwa jika perubahan tegangan generator berhubungan dengan tegangan nominal maka jika terjadi perubahan arus reaktif generator maka hal itu juga berhubungan dengan arus nominal.

Droop voltage dinyatakan dengan garis miring yang ada pada kurva dan nilainya didapat dari 0 sampai 6% yaitu dengan menggunakan potensiometer.

Contoh: Dalam kasus arus induktif adalah 100% dari arus nominal generator dan terdapat droop diatur sampai 6%.Maka tegangan dari generator akan berkurang 6%.

Dalam operasi paralel generator pengaturan dari generator sinkrun dapat menggunakan *droop sensing signal*. Dan jika dalam operasi tunggal, pengukuran dilihat dengan melakukan test dari beban reaktif. droop diatur sampai 4%.

2.3 Governor

Governor adalah Alat yang bertugas menjaga kecepatan motor agar tetap konstan sehingga frekuensi generator tetap stabil. Energi listrik yang dibangkitkan oleh generator harus mempunyai frekuensi yang tetap sehingga kecepatan putaran motor harus konstan.

Fungsi-fungsi pokok dari *governor* adalah:

- Pengaturan kecepatan sebelum kerja paralel.
Untuk sinkronisasi, diperlukan frekuensi yang sama antara generator dan busbar. Permasalahannya frekuensi dari jaringan tidak selamanya konstan. Sehingga frekuensi dari generator harus menyesuaikan dengan frekuensi jaringan. Perubahan frekuensi erat hubungannya dengan perubahan kecepatan.
- Pengaturan kecepatan untuk merubah frekuensi dalam keadaan kerja paralel.
- Penghentian operasi pada saat ada gangguan.



Gambar 2.15 Governor



Gambar 2.16 Governor

Generator harus mempunyai kecepatan yang konstan dan seharusnya tidak beroperasi di atas 4% dari kecepatan yang terukur, atau di bawah 1% dari kecepatan yang terukur.

Perubahan dari beban akan membuat kecepatan generator berubah, tetapi generator harus tetap dalam keadaan stabil. Suatu alat pengatur kecepatan yang baik harus dengan teliti mengikuti perubahan dari beban dan keadaan putaran dari generator, lalu dengan segera menyesuaikan dengan keadaan agar kecepatan putaran generator tetap konstan.

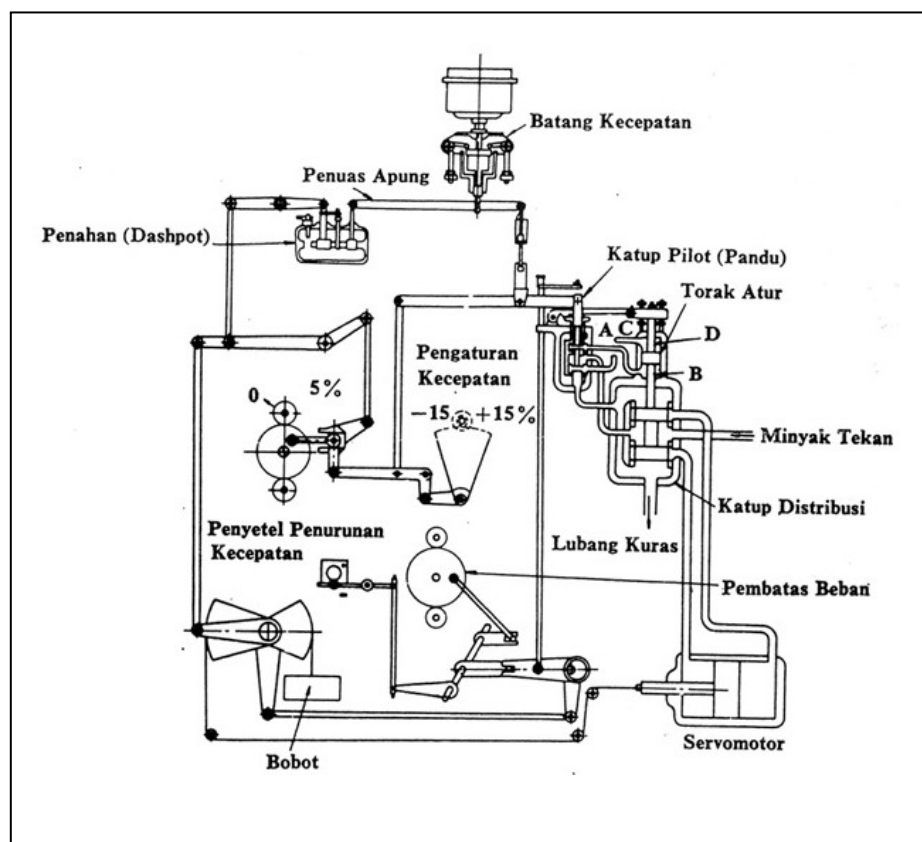
Dengan demikian suatu alat pengatur kecepatan harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- Bila timbul perubahan, harus dapat sesegera mungkin mencapai kecepatan normalnya.
- Perubahan kecepatan harus dalam waktu yang sesingkat mungkin

2.3.1 Cara Kerja dari Pengatur Kecepatan (*Governor*).

Jika ditinjau dari prinsip kerjanya *governor* mempunyai berbagai tipe :

- Mekanik



Gambar 2.17 Governor tipe mekanik

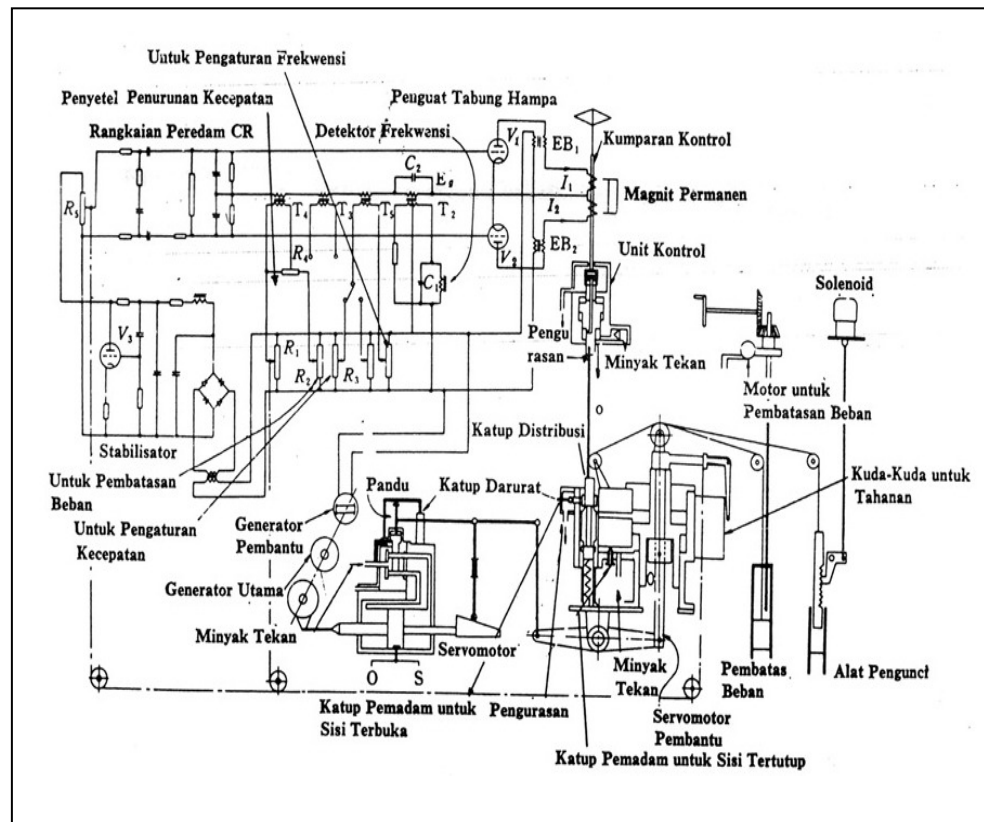
Sumber : Arismunandar A.,Dr., Kuwahara S.,Dr.,”*Teknik Tenaga Listrik*”,Jilid1: Pembangkitan listrik dengan tenaga air. Jakarta : PT Prandnya Paramita,2000, p.19.

Input dari governor adalah frekuensi dari generator. Frekuensi dari generator haruslah tetap stabil. Untuk menaikkan frekuensi maka governor harus mengatur putaran penggerak utama (prime mover) → kecepatan putaran dari penggerak utama harus ditambah → Cara menambah putaran prime mover yaitu dengan cara mengatur valve bahan bakar, makin banyak bahan bakar yang ditambahkan maka kecepatan dari prime mover akan meningkat → dan frekuensi dari generator juga akan naik.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari skema fungsi dari pengatur kecepatan diatas. Bila frekuensi sistem turun maka batang kecepatan (*speed rod*) akan naik dan katub pilot akan naik. Minyak diruangan A menahan katub pilot distribusi sekunder melalui katub atur (*control valve*). Karenanya, minyak tekan masuk dalam *servomotor* sudut antar.dan sudut antar pun akan terbuka. Pada saat yang sama "bushing" katup pandu akan terangkat dan katub pandu akan kembali pada kedudukan netral. Kemudian, minyak tekan akan berhenti mengalir. Karena *control piston* berhenti pada kedudukan yang sesuai dengan perubahan frekuensi, minyak tekan mengalir mengalir ke *servomotor* dan motor ini terus membuka bagian bukaan (*lubang nozzle*). Agar supaya gerakan servo motor tetap stabil, maka dipakai kopensator primer untuk menggerakkan titik penunjang D dan mengembalikan katub pandu ke tempat kedudukan netral.

Kesimpulannya apabila beban listrik naik frekuensi akan menjadi turun, *piston control* akan turun dan oli di sebelah kanan piston dari *servomotor* mendorong. Dan stang dari *servomotor* bergerak ke kiri membuka lubang *nozzle*.

- o *Elektronik - hidrolis* atau magnetik



Gambar 2.18 *Governor type Elektronik - hidrolis*

Sumber : Arismunandar A.,Dr., Kuwahara S.,Dr.,”*Teknik Tenaga Listrik*”, Jilid 1 : Pembangkitan listrik dengan tenaga air. Jakarta : PT Prandnya Paramita,2000, p.21.

Pengatur kecepatan *elektro – hidrolis* terdiri dari pengatur (*regulator*), penjalan (*actuator*) dan katub distribusi (*distribution valve*).

Pengatur mendeteksi frekuensi *governor* yang langsung dirangkaikan dengan generator, dan meneruskan ke *servo motor*. Pada saat yang sama,berbagai macam pengontrolan dilakukan pula oleh alat pengatur.

Detektor frekuensi adalah pendeteksi frekuensi dengan rangkaian yang mengubah frekuensi pengatur generator menjadi tegangan. Rangkaian resonansi dipasang agar beresonansi pada frekuensi dasarnya.Maka dari itu, arus listrik tidak mengalir dalam rangkaian primer trafo T2, dan tegangan terminal pada *condenser* C2 dalam rangkaian sekunder adalah nol

pada frekuensi dasar. Besarnya tegangan terminal adalah sebanding dengan dan mengikuti frekuensi dari sistem.

Pada rangkaian pendeteksi fasa (*phasa detector circuit*), tegangan arus bolak balik pada generator pengatur diberikan pada anoda tabung hampa V1 dan V2 dengan perbedaan fasa satu dengan yang lain sebesar 180. Arus anoda I1 dan I2 tergantung pada sudut fasa dan besarnya tegangan masuk (*input*), yaitu tegangan terminal pada C2. Bila tegangan masuk adalah sefasa dengan tegangan anoda, maka arus anoda (*output*) besar. Bila ada perbedaan fasa 180 antara tegangan input dengan tegangan anoda, maka arus output menjadi kecil. Arus I1 dan I2 bekerja secara differensial pada kumparan control (*control coil*). Jadi bila tegangan terminal pada C2 adalah nol, maka I1 dan I2 menjadi sama dan kumparan tetap pada kedudukan netral. Bila tegangan terminal timbul, kumparan control beralih kedudukannya sesuai dengan besarnya tegangan. Arah perpindahannya ditentukan oleh sudut fasa tegangan. Bila frekuensi turun, sudut fasa tegangan terminal berbeda 180 dari sudut sudut fasa tegangan anoda V1, dan menjadi sefasa dengan V2. Maka dari itu, I1 menjadi lebih kecil dari I2 dan kumparan control diturunkan. Bila frekuensi naik, menjadi lebih besar dari I2 dan kumparan kontrol dinaikkan.

Bila tegangan diterapkan pada rangkaian masuk penguat (*amplifier*), maka kumparan kontrol bekerja. *Transformer* T2 dipakai untuk rangkaian pendeteksi fasa, T3 dipakai untuk rangkaian distribusi beban dan T4 dipakai untuk rangkaian pengatur kecepatan. Kontak geser (*sliding contact*) dari R1 dihubungkan dengan *servo motor* pembantu, *servo motor* ini berhenti pada kedudukan dimana tegangan sekunder T4 kembali pada tegangan semula karena kontak geser tahanan R1 dihubungkan dengan *servomotor* pembantu. T5 dipakai untuk mengatur frekuensi. Mengubah frekuensi tertentu pada alat pengatur frekuensi dilaksanakan dengan menggerakkan kontak geser tahanan R3. Pada saat itu, servo motor bergerak sedemikian sehingga jumlah tegangan sekunder T5 dan tegangan

sekunder T4 ada dalam keadaan isometric serta terbalik arah dari tegangan sekunder T2.

Bila perubahan tegangan terjadi dalam *grid circuit* karena perubahan frekuensi, maka rangkaian ini mengambil perubahan tegangan ini dengan bantuan tahanan R5 yang disambungkan dengan *servomotor* pembantu dan memasukkan isyarat katub yang telah diubah ke rangkaian kisi V1 dan V2 melalui rangkaian CR. Gerakan R5 mencegah larinya (*hunting*) mesin dengan cara menambah tegangan pada rangkaian kisi tabung hampa dengan arah yang menahan gerakan servo motor. Rangkaian peredam (*damping circuit*) CR diperlengkapi dengan dua macam rangkaian, yaitu satu untuk peredam tanpa beban dan satu lagi untuk peredaman selama *service dumping*.

Dalam tugasnya *governor* dapat diatur untuk tetap pada posisinya dengan mode *speed setting*, *load limit*, *speed droop*, *compesating*.

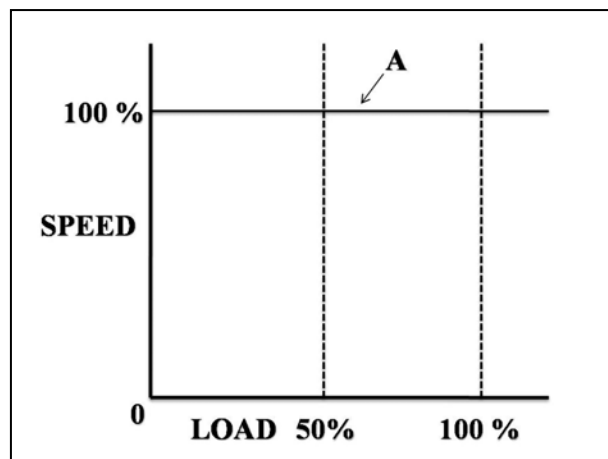
Speedsetting digunakan untuk menentukan pada putaran berapa yang dipertahankan, *load limit* berfungsi untuk membatasi posisi maksimum dari beban, *speed droop* untuk mengatur perubahan putaran terhadap perubahan beban dari generator dan *compesating* untuk mengatur dan membuat keadaan stabil putaran generator akibat perubahan beban.

Salah satu pertimbangan utama dalam kerja paralel adalah keberhasilan generator dibebani dengan beban yang sesuai (yang diinginkan). Hal ini dapat tercapai dengan adanya *governor speed droop*.

Hubungan antara pengaturan untuk pembagian beban sebaiknya diterangkan dengan melihat hubungan kecepatan dengan kurva beban dari *governor*. Pada posisi kecepatan normal 100% dan beban penuh pada posisi 100%, dalam pengontrolan sistem kita akan berkonsentrasi pada dua jenis operasi dari *governor*, yaitu: isokronis dan *speed droop*.

Operasi dari *governor* isokronis (*0% speed droop*) adalah suatu keadaan dimana frekuensi tetap dan konstan, dan generator speed drop adalah nol. Untuk lebih jelasnya dapat diterangkan dengan membandingkan kecepatan dengan beban seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.

Jika *governor* mulai menjaga kecepatan yang diwakili garis A dan terhubung dengan peningkatan beban, kecepatan akan konstan. Keadaan ini dinamakan keadaan isokronis. Governor isokronis akan menjaga *output* frekuensi yang diinginkan, dengan mengabaikan perubahan beban jika kapasitas dari motor tidak terlewati.



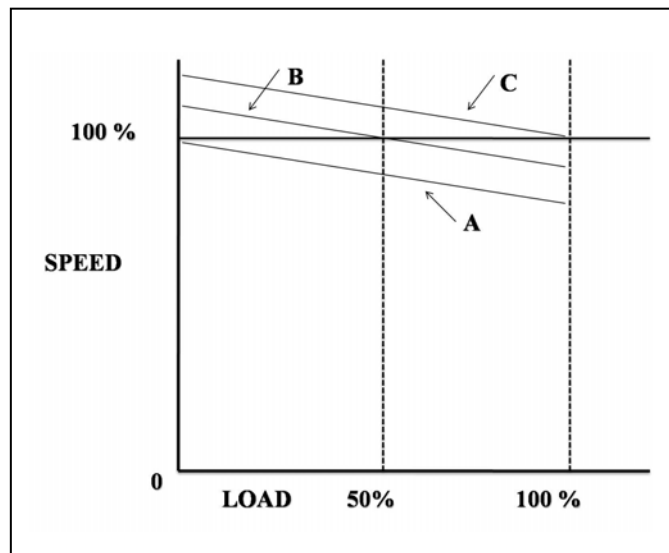
Gambar 2.19 Kurva *governor isochronous*

Sumber: Leduc.Martin.British Columbia Institute of Technology Pacific Marine Training Campus. *Propulsion Plant Simulator*, July 1998. 20 Oktober 2008 (telah diolah kembali)

<http://www.dieselduck.net/library/library_pictures/lab7.8.gif>

Speed droop governor (*100% speed droop*) mempunyai kurva yang hampir sama dengan *governor* isokronis, tetapi kurvanya merosot, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.20. Jika *speed droop governor* dihubungkan dengan suatu peningkatan beban, kecepatan akan turun (garis A pada gambar) sampai kapasitas generator yang maksimum tercapai. Apabila kita menghubungkan *speed droop governor* dengan *busbar* yang kapasitasnya sangat besar, di mana motor tidak dapat mengubah frekuensi bus. Perlu diingat bahwa kecepatan dari motor

tidak ditentukan oleh *speed setting*, tetapi yang menentukan adalah frekuensi bus. Dalam hal ini, jika kita mengubah *speed setting*, akan menyebabkan perubahan pada beban yang akan ditanggung, bukan pada kecepatan.



Gambar 2.20 Kurva Speed Droop Governor

Sumber: Leduc.Martin.British Columbia Institute of Technology Pacific Marine Training Campus. *Propulsion Plant Simulator*, July 1998.20 Oktober 2008 (telah diolah kembali)

<http://www.dieselduck.net/library/library_pictures/lab7.8.gif>

Untuk *parallel generator set*, kita memerlukan *speed setting* pada garis A di mana kecepatan *no load* sama dengan frekuensi bus. Jika kita meningkatkan kecepatan pada garis B, kita tidak mengubah kecepatan, tetapi mengambil perkiraan seperdua beban. Peningkatan yang lain dalam *speed setting* pada garis C akan secara penuh membebani motor tersebut.

Jika generator dibebani secara penuh, kecepatan *no load* akan 4% *synchronous speed*.

Governor ini digambarkan mempunyai 4% *speed droop*. *Setting speed* yang lebih tinggi dibanding dengan frekuensi bus akan menyebabkan motor akan melayani beban penuh. Dengan cara yang sama, jika *speed setting* di bawah *synchronous speed*, maka motor akan menuju posisi *no load*. Pengaturan *governor*

hidrolik *speed droop* di atas terpenuhi dengan menyesuaikan tombol *speed droop* yang berada pada *governor*.

2.3.2 *Speed Drop*

Jika generator dibebani maka frekuensi akan menurun. Karakteristik ini disebut *voltage droop*. Untuk paralel maka *speed droop* kedua generator harus sama agar diperoleh pembagian beban yang sama atau seimbang.

Suatu diesel generator jika dibebani, maka frekuensi outputnya akan turun. Hal ini disebabkan karena putaran diesel juga menurun. Penurunan tersebut dapat diatasi dengan pengaturan *governor*, dengan cara *speed drop*.

Speed droop adalah perubahan persentase dalam penyesuaian kecepatan pada pergerakan penuh katup *output governor* (dari kecepatan penuhnya sampai posisi kecepatan zero). Hal ini adalah karakteristik dari operasi *governor* untuk mencapai kestabilan dan yang penting pada saat dua atau lebih mesin yang terhubung dengan *governor speed sensing* bekerja dalam suatu kerja paralel, untuk membagi beban secara proposional.

Jika diesel generator menanggung beban penuh, frekuensi output diesel generator akan turun. Penurunan frekuensi output dibatasi oleh *speed drop* sebesar sekitar 2% - 4% dari frekuensi output pada waktu tidak terbeban. Sebuah regulasi khusus untuk jenis *speed droop* adalah 3%. Misalkan bila kecepatan dan frekuensi pada beban penuh adalah 1500 rpm dan 50hz, maka beban kosong adalah 1545 rpm dan 51,5 hz. Bila beban ditambah atau dikurangi, kecepatan dan frekuensi akan berubah sesaat antara satu sampai tiga detik, *governor* akan menyebabkan mesin berpindah pada kecepatan tertentu pada beban baru. Adapun hubungan antara frekuensi dan *speed drop* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Speed drop} = \{(F_{n1} - F_{f1}) : F_{f1}\} \times 100\% \quad (2.6)$$

Pada saat diesel genrator dibebani lebih kecil dari beban penuh, maka frekuensi outputnya dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$S_p = P_{fl} : (F_{nl} - F_{fl}) \quad (2.7)$$

$$P_x = S_p \times (F_{nl} - F_{fl}) \quad (2.8)$$

Dimana :

F_{fl} = Frekuensi baban penuh

F_{nl} = Frekuensi baban kosong

F_x = Frekuensi beban tertentu

S_p = Sloop

P_{fl} = Daya beban penuh

P_x = Daya beban tertentu

2.4. Transformator Arus/ *Current Transformer (CT)*

Transformator arus (*CT*) merupakan jenis transformator yang digunakan untuk memperkecil atau menurunkan besaran arus dari sisi primer (tegangan tinggi/ menengah) ke sisi sekunder (tegangan rendah), sesuai dengan *range* peralatan yang dipasang pada sisi sekunder.



Gambar 2.21. *Current Transformer (CT)*

Sumber: Curtis, Bob. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration *Electric Power eTool: Illustrated Glossary*. U.S. 10 November 2008. <http://www.osha.gov/SLTC/etools/electric_power/illustrated_glossary/substation_equipment/current_transformers.html>

Di gardu induk *CT* digunakan untuk keperluan *relay* proteksi, selain untuk keperluan pengukuran. Untuk keperluan *relay* proteksi, ketelitian (*accuracy*) yang diperlukan sampai beberapa kali arus *rating*. *Relay* proteksi yang menggunakan arus sekunder *CT* antara lain:

- *Distance Relay*.
- *Synchron Relay*.
- *Directional Relay*.
- *Differential Relay*.
- *Restricted Earth Fault Relay*.
- *Standby Earth Fault*.
- *Over Load Relay*.

Istilah *ratio* pada *CT* berarti perbandingan antara arus primer dan arus sekunder. Misalnya trafo arus pada *incoming* 150 kV dengan *ratio* 1000/ 5 artinya pada sisi 150 kV arus sebesar 1000 A diturunkan pada sisi sekunder menjadi 5 A. Istilah lain pada *CT* adalah *class* yang menyatakan ketelitian (*accuracy*) atau kesalahan pengukuran pada arus *rating* atau *accuracy limit*. Terdapat beberapa *class* untuk keperluan *relay* proteksi antara lain: 5p, 10p dan sebagainya. *CT* mempunyai batas kemampuan yang disebut *CT burden* dalam satuan VA (*Volt Ampere*) antara lain: 150 VA, 30 VA dan sebagainya. Ada suatu kondisi dimana *CT* tidak dapat mentransformasikan arus primer menjadi arus sekunder sesuai dengan *ratio*-nya, karena tegangan yang timbul di *terminal* sekunder melebihi tegangan kejenuhannya. Kondisi ini dinamakan kejenuhan (*saturation level*).

2.5 Transformator Tegangan/ *Potential Transformer (PT)*

Transformator tegangan (*PT*) merupakan jenis transformator yang digunakan untuk memperkecil atau menurunkan besaran tegangan dari sisi primer (tegangan tinggi/ menengah) ke sisi sekunder (tegangan rendah), sesuai dengan *range* peralatan yang dipasang pada sisi sekundernya.



Gambar 2.22. *Potential Transformer (PT)*

Sumber: Curtis, Bob. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration *Electric Power eTool: Illustrated Glossary*. U.S. 10 November 2008. <http://www.osha.gov/SLTC/etools/electric_power/illustrated_glossary/substation_equipment/potential_transformers.html>

Di gardu induk *PT* digunakan untuk keperluan *relay* proteksi, selain untuk keperluan pengukuran. *Relay* proteksi yang menggunakan tegangan sekunder *PT* antara lain:

- *Distance Relay* (rele jarak).
- *Synchron Relay* (rele sinkron).
- *Directional Relay* (rele berarah).
- *Frequency Relay* (rele frekuensi).
- *Voltage Relay* (rele tegangan).

2.6. Kerja Paralel Pada Generator

Kerja paralel banyak dilakukan pada pusat pembangkit tenaga listrik, karena untuk memenuhi keadaan sebagai berikut:

- o Efisiensi

Generator mempunyai efisiensi maksimum jika mengirimkan beban penuh. Saat beban ringan sebaiknya satu generator yang beroperasi dan saat beban sudah berat generator dioperasikan paralel dengan yang lainnya.

- o Kontinuitas

Jika ada kerusakan pada generator, maka beban tetap mendapat suplai listrik.

- o Perbaikan dan pemeliharaan

Generator perlu diperiksa secara periodik sehingga dapat terpelihara dengan baik.

- o Penambahan daya

Jika generator yang terpasang tidak mampu menanggung perkembangan beban, maka kerja paralel perlu dilakukan.

Generator jika dioperasikan secara paralel dengan generator lain disebut sinkronisasi.

Generator-generator yang bekerja secara paralel pada suatu sistem mempunyai sistem yang hidup, dengan tegangan dan frekuensi yang konstan.

Pada umumnya generator yang akan dihubungkan pada suatu sistem, di mana sistem itu sebelumnya sudah mempunyai begitu banyak generator sehingga berapapun daya yang akan diberikan oleh generator yang baru masuk tidak mempengaruhi tegangan dan frekuensi pada sistem tersebut. Dalam hal ini generator dapat dikatakan terhubung dengan sistem yang kuat sekali (*infinite bus-bar*).

Generator sinkron dalam keadaan diam tidak boleh sekali-kali dihubungkan pada sistem karena pada saat diam emf yang terinduksi pada stator adalah 0, maka bila dihubungkan ke sistem akan diperoleh keadaan hubungan singkat. Pada pengoperasian generator secara paralel sebaiknya hanya satu

generator yang diketanahkan, hal ini untuk menghindari harmonisa ketiga antar generator dengan generator lain.

2.6.1. Persyaratan Sinkronisasi

Dalam melakukan sinkronisasi perlu dipenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- Tegangan generator harus sama dengan tegangan *busbar* (jaringan).
- Frekuensi dari generator harus sama dengan frekuensi *busbar* (jaringan).
- Urutan fasa dari generator dan *busbar* harus sama.
- Beda sudut fasa dari generator dengan busbar tidak boleh lebih dari 30°
- Generator tersebut harus didesain untuk kerja paralel serta mempunyai AVR dan *governor*.

Dalam prakteknya, persyaratan sinkronisasi tersebut mempunyai toleransi yaitu:

- Frekuensi dari generator lebih besar 0.2 % dari frekuensi *busbar*.
- Perbedaan tegangan efektif tidak boleh lebih dari 10 %.
- Perbedaan fasa 5 %.

2.6.2. Tegangan

Tegangan generator harus sama dengan tegangan *busbar*. Hal ini dapat diamati pada voltmeter ganda. Tegangan generator diatur melalui sistem eksitasi. Jika tegangan di busbar lebih besar dari tegangan *incoming* generator, maka *incoming* generator dalam hal ini berfungsi sebagai motor dengan arah dan kecepatan putar yang sama. Keadaan ini dapat dideteksi dengan menggunakan *relay* daya balik.

2.6.3. Frekuensi

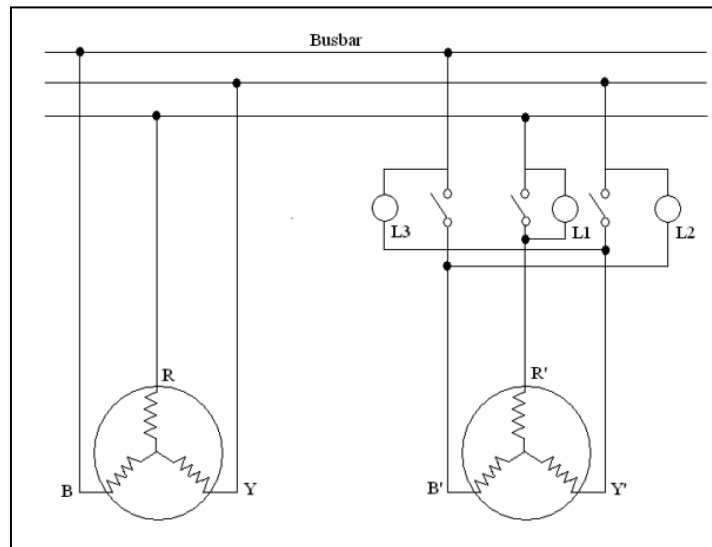
Frekuensi dari generator harus lebih besar sedikit dari frekuensi *busbar* dan frekuensi generator dapat diatur melalui *governor*.

Hal ini dapat dilihat dengan menggunakan:

- o Lampu sinkronisasi

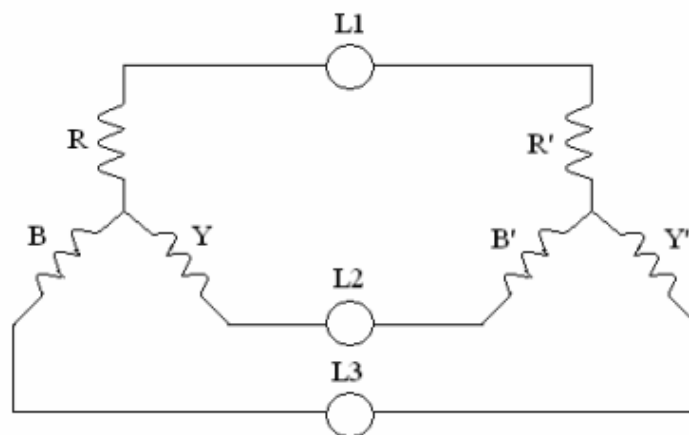
Lampu sinkronisasi terdiri dari 3 buah lampu yang dihubungkan dalam keadaan tidak simetris. Lampu L2 dan L3 dihubungkan pada fasa yang berbeda, agar keadaan menjadi jelas saat fasa kedua generator tepat sama.

Jika ketiga lampu dihubungkan pada fasa yang sama, maka ketiga lampu akan gelap pada saat fasa kedua generator tepat sama.



Gambar 2.23. Hubungan Generator Paralel

Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd,2000,p.217..



Gambar 2.24. Lampu Sinkronisasi

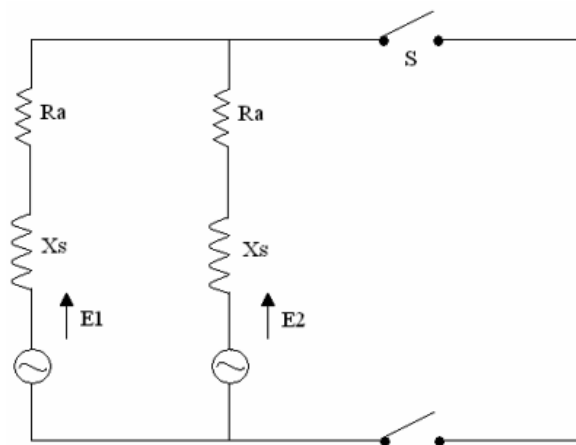
Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd,2000,p.219.

○ *Synchroscope*

Frekuensi antara *busbar* dan *incoming* generator dapat pula diamati dengan menggunakan *synchroscope*. *Synchroscope* selalu menunjukkan kondisi dari generator yang terhubung dengan *busbar*. Jika frekuensi generator lebih tinggi dari frekuensi bus, maka jarum akan mengarah pada tanda *fast*. Sebaliknya jika frekuensi generator lebih rendah dari bus, maka jarum akan menunjuk ke posisi *slow*. Saat jarum berada tepat di tengah antara *fast* dan *slow*, hal ini menunjukkan bahwa frekuensi dari generator dan *busbar* sama. Generator dapat diparalel saat tercapai kondisi jarum *synchroscope* tepat di tengah. Cara ini lebih banyak digunakan dan lebih mudah dalam segi pembacaan dan keakuratan.

2.6.4. Arus Sinkronisasi

Apabila *incoming* generator sudah dalam keadaan sinkron dengan *busbar*, maka keduanya akan cenderung berada dalam keadaan sinkron. Jika salah satu generator akan lepas dari keadaan sinkron, maka torsi sinkronisasi akan membawanya kembali dalam keadaan sinkron. Dua generator mempunyai besar tegangan terminal yang sama dan berpolaritas terbalik terhadap rangkaian lokal generator, tetapi berpolaritas sama terhadap rangkaian beban



Gambar 2.25. Rangkaian Generator Paralel

Sumber: Theraja, B. L. *Text Book of Electrical Technology*. Mumbai: S Chand & Company Ltd, 2000, p.227.

Karena besar tegangan sama dan arah berlawanan, maka tidak ada tegangan resultan, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rangkaian lokal.

Perubahan *governor* generator dua menyebabkan tegangan E2 tertinggal sebesar sudut α derajat listrik, tetapi $[E1] = [E2] = [E]$, sehingga ada tegangan resultan E_r yang menyebabkan arus sinkronisasi I_{sy} yang tertinggal sebesar sudut θ terhadap tegangan E_r yang mengalir pada rangkaian lokal generator.

$$E_r = \alpha \cdot E \quad (2.9)$$

$$I_{sy} = \frac{E_r}{Z_s} \quad (2.10)$$

$$\text{tg } \theta = \frac{X_s}{R_a} \quad (2.11)$$

Keterangan:

- E_r : tegangan resultan.
- I_{sy} : arus sinkronisasi.
- Z_s : impedansi sinkron dua generator.
- X_s : reaktansi sinkron dua generator.
- R_a : tahanan jangkar dua generator.
- α : sudut pergeseran tegangan generator.
- θ : sudut antara I_{sy} dengan E_r .

Karena R_a kecil, maka $\theta \approx 90^\circ$. Jadi I_{sy} tertinggal sebesar 90° terhadap E_r dan hampir sefasa dengan E_1 . Di sini terlihat bahwa I_{sy} merupakan arus yang dihasilkan generator 1 dan merupakan arus yang digunakan oleh generator 2 yang berfungsi sebagai motor. Arus I_{sy} menghasilkan torsi sinkronisasi yang cenderung memperlambat putaran generator 1 dan mempercepat putaran generator 2. Arus sinkronisasi I_{sy} menyebabkan generator 1 menghasilkan daya sinkronisasi yang

digunakan generator 2 dan rugi-rugi tembaga kedua generator. Besar daya sinkronisasi per fasa adalah:

$$P_{sy} = \frac{\alpha \cdot E^2}{2 \cdot X_s} \quad (2.12)$$

$$T_{sy} = \frac{P_{sy}}{2 \cdot \pi \cdot N_s / 60} \quad (2.13)$$

Keterangan:

P_{sy} : daya sinkronisasi per fasa (watt).

T_{sy} : torsi sinkronisasi per fasa (N-m).

X_s : reaktansi generator (ohm).

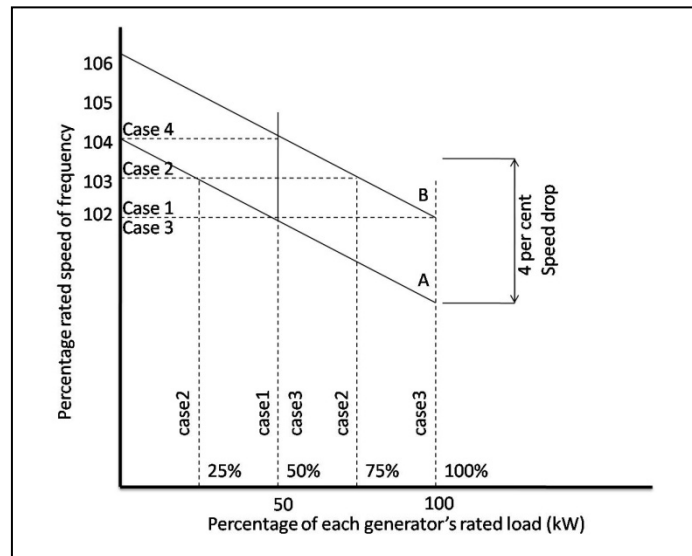
N_s : kecepatan sinkron (rpm).

A : pergeseran tegangan generator (rad).

2.7. Load sharing

Untuk operasi generator yang bekerja paralel dengan generator yang lain, *governor* berfungsi untuk mengatur *active power load sharing*. Sedangkan AVR berfungsi untuk mengatur *reaktif power sharing*. Governor harus menjaga kecepatan agar tetap konstan saat generator terhubung dengan beban dan AVR harus mengatur sistem eksitasi dari generator tersebut. Pada saat beban meningkat frekuensi sistem akan turun samapi output total dari semua generator sesuai dengan beban yang baru. Daya aktif akan dibagi diantara 2 generator set dengan syarat mempertimbangkan *speed drop* dari governor mesinnya.

Contoh kasus : 2 generator dengan speed drop yang sama (4%) bekerja paralel dalam kondisi pertama diasumsikan kedua generator bekerja pada kurva A, seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.26 Load Sharing Dua Generator Paralel dengan Speed Droop 4%

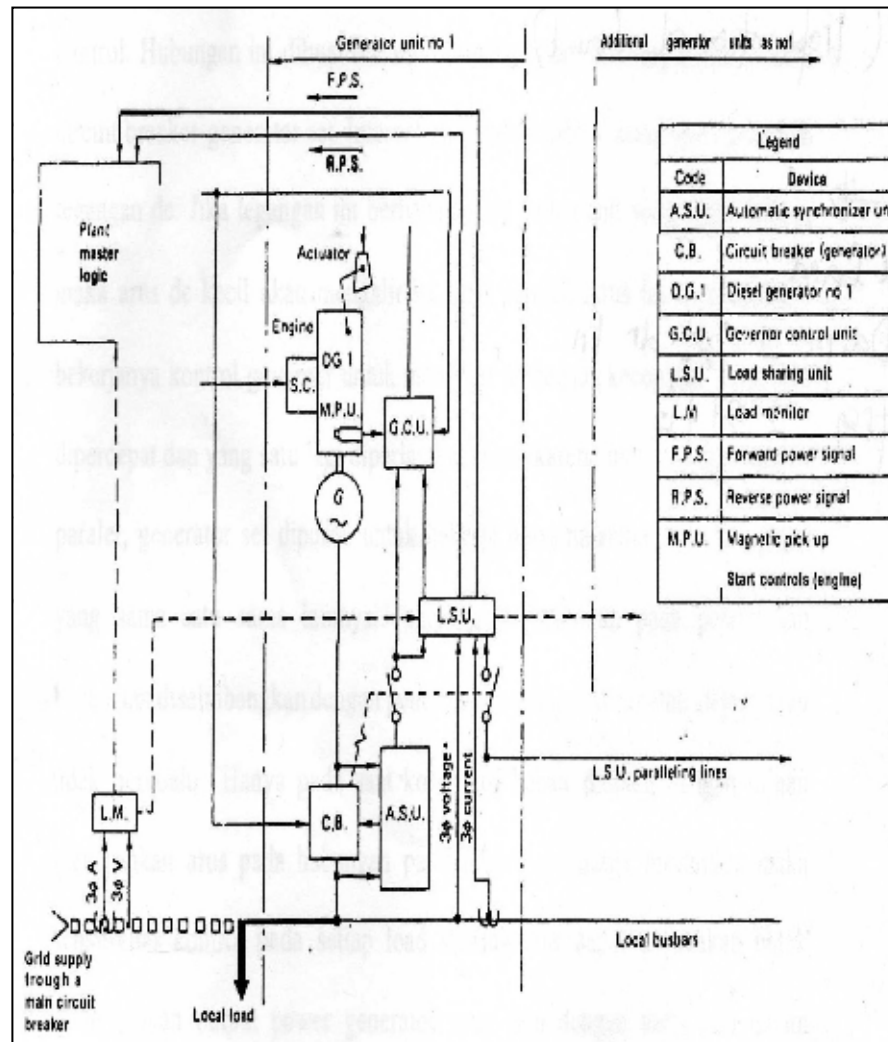
Sumber : L.J.Mahon.*Diesel Generator Handbook*.London:Butterworth-heinemann Ltd,1992.p.258

Dan beban total dibagi sama pada setiap generator. Misalnya total beban 100%, maka setiap generator menanggung beban 50% frekuensi dalam kasus yang pertama ini 102% dari frekuensi nominal. Jika 1 generator di atur pada kurva B sedangkan generator yang lain tetap pada kurva A, keduanya bekerja pada frekuensi 103% nominal (pada saat memikul beban yang sama). Peningkatan frekuensi sistem tidak sebesar peningkatan setting kecepatan pada generator kurva B, jadi kurva A akan menanggung 25% dari total beban sedangkan kurva B menanggung 75% dari total beban (kasus 2).

Apabila beban ditingkatkan menjadi 150% diasumsikan bahwa generator masih diset pada kurva A dan B, masing-masing memikul beban 50% sekarang pada saat genset kurva A memikul beban 50% beban dan B memikul 100%, maka frekuensi sistem bergerak menuju level 102% (kasus 3). Bila terjadi lagi peningkatan beban, ini akan menyebabkan genset kurva B akan kelebihan beban.

Pada saat beban total hanya 50%, maka hanya satu genset yang memikul beban yaitu genset kurva B, sedangkan genset kurva A tidak berbeban, sehingga frekuensi sistem meningkat ke 104% (kasus 4).

Sistem *governor* untuk mengamati beban dan sistem pembagian beban dapat dilihat pada blok diagram di bawah ini:



Gambar 2.27 Blok diagram pengamatan beban dan load sharing

Sumber : L.J.Mahon.*Diesel Generator Handbook*.London:Butterworth-heinemann Ltd,1992.p.271.

Komponen utama dari sistem diatas adalah *load sharing unit* (LSU). Semua *load sharing unit* di sistem ini dihubungkan secara paralel yang merupakan satu bagian antara dua *load sharing speed control*. Hubungan ini dibuat melalui *normally open auxiliary contact* pada *circuit breaker* generator set. Internal *output* dari *load sharing unit* ini adalah tegangan DC. Jika terjadi

perbedaan tegangan antara dua unit yang diparalelkan, maka arus DC akan mengalir ke garis paralel dan menyebabkan kontrol *governor* bekerja untuk membuat perbedaan kecepatan. Yang satu dipercepat dan yang satu diperlambat. Tetapi karena unit ini dihubungkan paralel, generator dipaksa untuk bekerja bersama-sama pada kecepatan yang sama antara satu dengan yang lainnya. Juga karena kenaikan pada penunjukan kecepatan diseimbangkan dengan penurunan, sehingga kecepatan sistem tetap tidak berubah. Hanya pada saat kontribusi beban berubah, dengan tujuan menurunkan arus pada saat hubungan paralel ke suatu harga minimum, Maka *sensitifitas control* pada setiap *load sharing unit* dapat digunakan untuk menyamakan *output power* generator yang satu dengan yang lain dalam sistem.

Plant power logic diprogram untuk mendeteksi *starting* dari generator. Generator yang pertama secara manual dihubungkan ke busbar. Pada saat beban bertambah dan melebihi kemampuan generator, maka kontak dari *load sharing unit* akan menutup. Sinyal ini diterima oleh *master logic*, sehingga generator yang lain harus *distart* dan dihubungkan juga ke sistem. Ketika generator yang kedua di start, *automatic synchronizer unit* (ASU) akan memparalelkan kedua generator dengan busbar.

2.8. Relay Proteksi generator dalam kerja Paralel

2.8.1. Overcurrent Relays

Relay arus lebih digunakan untuk melindungi kerusakan akibat terjadinya hubungan singkat antar hantaran yang menuju jaring-jaring atau antar fasa. Dalam keadaan normal relay arus lebih tidak bekerja. Tetapi bila terjadi hubung singkat antar hantaran yang menuju jaring-jaring atau antar fasa maka arus yang mengalir pada fasa yang mengalami hubung singkat tersebut melebihi batas nominalnya. Dengan demikian relay arus lebih bekerja.

2.8.2. Overload Relays

Proteksi beban lebih digunakan ketika adanya beban yang melebihi karakteristik dari generator. Overload dapat menyebabkan panas yang berlebih

bagi generator. Ada beberapa kemungkinan dari beban lebih dalam MVA, meskipun pengatur akan membatasi daya aktif (MW), Automatic Voltage Regulator (AVR) dapat menyebabkan mesin mengirim bagian yang tidak sebanding dengan daya reaktif (MVA). Proteksi beban lebih yang disediakan kemungkinan jenis thermal dengan karakteristik yang disamakan dengan kapasitas panas generator.

2.8.3. *Overvoltage Relays*

Overvoltage berfungsi untuk proteksi bagi generator apabila tegangan dari masukannya melampaui tegangan settingnya. Relay tegangan lebih akan bekerja bila tegangan yang dihasilkan generator melebihi batas nominalnya. Misalnya disebabkan gangguan pada penguat magnet atau pengaturan penguat magnet terlalu besar sehingga mengakibatkan tegangan yang dihasilkan generator melebihi batas

nominalnya. Tegangan lebih dapat dimungkinkan oleh mesin putaran lebih (*over speed*) atau kerusakan pada pengatur tegangan otomatis (AVR).

2.8.4. *Power Frekwensi Overvoltage*

Overvoltage seharusnya tidak terjadi pada mesin yang sesuai dengan *voltage regulator*. *Overvoltage* dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan berikut:

- Operasi yang tidak sempurna dari *voltage regulator*
- Operasi di bawah control manual dengan *voltage regulator* yang tak terawat. Sebuah variasi yang tiba-tiba dari beban, yang utama adalah komponen VAR akan memberikan perubahan besar pada kenaikan tegangan dikarenakan *voltage* regulasi besar yang melekan pada generator khusus.
- Rugi-rugi beban yang tiba-tiba, dapat menyebabkan pengaturan *overspeed*, dikarenakan pengoperasian yang relative lambat dari alat pengatur dan pintu turbin. Kecepatan berbatasan dengan nilai kemampuan bertahannya (180% untuk kecepatan normal), tapi dapat menimbulkan kenaikan tegangan yang berbahaya.

2.8.5. *Reserve Power Relays*

Relai daya balik berfungsi untuk mendeteksi aliran daya aktif yang masuk ke arah generator. Perubahan ini disebabkan oleh pengaruh rendahnya input dari penggerak mula generator. Bila input tidak dapat mengatasi rugi-rugi yang ada, maka kekurangan daya dapat diperoleh dengan cara menyerap daya aktif dari sistem. Selama penguatan masih tetap, maka aliran daya reaktif generator sama halnya sebelum generator bekerja sebagai motor. Dengan demikian pada generator bekerja sebagai motor, daya aktif akan masuk ke generator, sementara itu aliran daya reaktif mungkin masuk mungkin juga akan keluar.

Reserve Power Relays dalam operasi generator paralel dengan busbar mempunyai fungsi utama untuk mencegah *Loss Of Field* . Kondisi dimana generator akan mendapatkan tegangan dari sistem sehingga generator akan menjadi motor sinkrun yang juga berarti generator menjadi beban

2.8.6. *Frequency Relays*

Peralatan ini digunakan untuk beroperasi pada frekuensi tertentu pada beban naik ataupun beban turun. Time delay 6-30 putaran yang sering digunakan untuk melindungi operasi pada kondisi sementara/sesaat. *Frequency relays* ini kadang diperlukan untuk melindungi beberapa generator yang mengalami kelebihan putaran (*overspeeding*).

Relay ini juga digunakan untuk pembangkit yang terpisah dengan tambahan beban karena gangguan dari sistem peralatan.

Frequency relays membutuhkan pemutusan perawatan peralatan dalam suatu kondisi dimana peralatannya harus dilengkapi dengan *reclosing otomatis*.