

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Hajarmurya (2010) melakukan penelitian tentang pembagian beban pada operasi paralel generator set yang optimal dengan simulasi beban resistif. Hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa pembagian beban *ishocronous* dan *speed droop* suatu generator paralel mengacu pada frekuensi sinkron pada sistem.

2.1.2 Esa (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh arus eksitasi terhadap daya reaktif pada generator sinkron yang bekerja paralel. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penambahab arus eksitasi menyebabkan daya reaktif semakin besar. Ketika terjadi penambahan arus eksitasi 180 A menjadi 185 A dan daya reaktif meningkat dari 0,87 MVA_r menjadi 1,25 MVA_r.

2.1.3 Patri Andari (2009) melakukan penelitian tentang analisis pengoprasian *speed droop governor* sebagai pengaturan frekuensi pada sistem kelistrikan PLTU Gresik. Hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkam pengaturan *speed droop* perubahan frekuensi

2.1.4 Marda Prasetya (2016) melakukan studi penelitian tentang pengaruh arus eksitasi terhadap keluaran daya reaktif generator sinkron 13,8 kv 37 MVA. Dari hasil studi yang dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa pengaturan daya reaktif untuk menjada faktor daya generator

2.2 Generator Sinkron

Sebagian besar energi listrik yang dipergunakan oleh konsumen untuk kebutuhan sehari hari dihasilkan oleh generator sinkron fasa banyak (*polyphase*) yang ada di pusat pembangkit tenaga listrik. Generator sinkron yang dipergunakan ini mempunyai rating daya dari ratusan sampai ribuan mega Volt Ampere (MVA). Disebut mesin sinkron, karena bekerja pada kecepatan dan frekuensi konstan di

bawah kondisi "Steady state". Mesin sinkron bisa dioperasikan baik sebagai generator maupun motor. Mesin sinkron bila difungsikan sebagai motor berputar dalam kecepatan konstan. Apabila dikehendaki kecepatan yang bersifat variabel, maka motor sinkron dilengkapi dengan dengan pengubah frekwensi seperti *inverter* atau *cyclo-converter*.

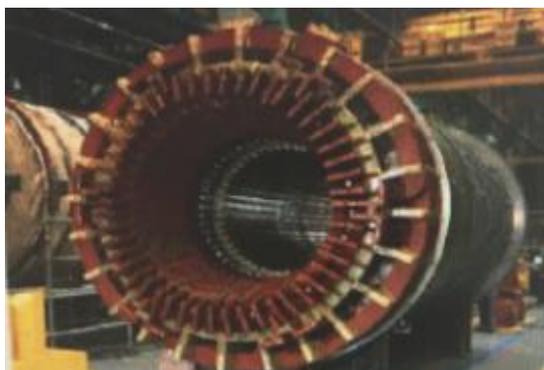
2.2.1 Kontruksi Generator Sinkron

Kontruksi generator sinkron terbagi menjadi dua bagian yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang gerak). Untuk lebih jelasnya. Berikut akan dibahas bagian-bagian dari generator :

1. Rangka stator
2. Inti stator
3. Kumparan stator
4. Rotor
5. Celah udara (*air gap*)
6. Poros
7. Penjajar poros
8. Rumah generator
9. Bantalan sikat
10. Cincin geser (*slip ring*)

2.2.1.1 Rangka stator

Rangka stator berfungsi untuk untuk memegang inti jangkar maupun stator. Rangka stator merupakan perangkat keras dan terbuat dari elemen dengan plat baja. Rangka ini ditopang pondasi pelat beton didalam rumah pembangkit (*power house*). Pemasangan rangka stator dilakukan dengan cermat agar diperoleh kedudukannya yang tepat dan mampu menahan hal-hal atau kondisi yang tidak menguntungkan baik pada saat gangguan seperti hubungan singkat atau bencana alam. Gambar dibawah memperlihatkan rangka stator pada generator.



Gambar 2.1 Rangka stator

(Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016)

2.2.1.2 Inti Stator

Inti stator terbuat dari segmen-segmen setiap segmen tersebut terdiri dari laminasi lembaran plat baja silikon yang memiliki sifat kemagnetan sangat baik(permeabilitasnya sangat tinggi). Inti stator terdiri dari lembaran-lembaran plat baja dilasutkan diantara satu dengan carapernis resistansi pijar. Lembaran- lembaran dikaitkan menjadi satu sehingga membentuk stator. Laminasi (pelapisan) bertujuan mengurangi arus eddy (*Eddy Current*). Gambar dibawah memperlihatkan inti stator pada generator.



Gambar 2.2 Inti stator

(Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016)

2.2.1.3 Kumparan Stator

Kumparan stator tersebut dari lapisan-lapisan tembaga berpenampang segi empat (copper strips) dan memiliki knduktifitas yang tinggi dan baik dan dililit memakai pita isolasi diseluruh permukaannya sehingga membentuk batang solid yang terisolasi. Batang tembaga yang berisolasi ini kemudian ditempatkan pada alur (slot) inti stator dan dikunci dengan pasak yang terbuat dari bahan isolasi.

Setiap Kumparan stator terdapat alur atau slot yang terletak pada intistator, kualitas kumparan ini dirancang agar mempunyai konduktifitas yang sangat baik. Tujuannya pada kumparan untuk rugi-rugi yang ditimbulkan oleh arus sinkron dapat di minimalisir. Sehingga pada lilitan kumparan tidak terdapat kebocoran yang tidak diinginkan. Maka dari itu generator dapat mengurangi atau menahan kerusakan pada kumparan stator dan isolasinya.

Maka dari itu alur tempat kumparan stator dirancang dan dibentuk sedemikian rupa sehingga lilitan ataupun kumparan dapat dipotong, dimasukan, dan dilepaskandengan mudah disaat perbaikan atau penggantian.

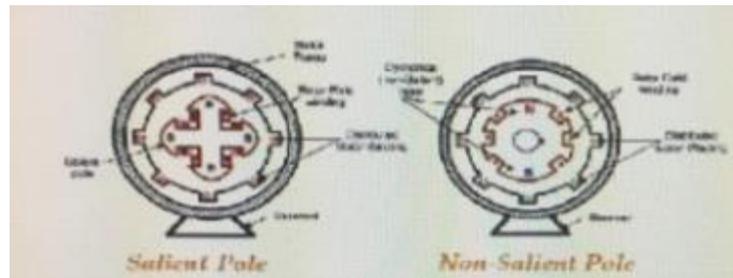


Gambar 2.3 Kumparan stator

(Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016)

2.2.1.4 Rotor

Rotor sebagai tempat ketika medan magnet dibangkitkan. Rotor generator dibagi menjadi dua bagian yaitu inti rotor dan kumparan rotor.



Gambar 2.4 a. Rotor kutub salient, b. Rotor silinder

Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016

1. Rotor kutub salient (*salient pole*)
2. Rotor silinder (*cylindrical rotor*)

Rotor kutub salient (*salient pole*) mengakibatkan rugi angin yang sangat besar ketika putarannya tinggi dan juga rotor kutub salient ini menimbulkan suara yang sangat bising. Biasanya rotor jenis ini digunakan pada generator yang mempunyai penggerak utama dengan kecepatan rendah ataupun menengah. Rotor ini mempunyai lembaran-lembaran besi, berfungsi untuk mengurangi panas akibat arus eddy.

Rotor silinder (*cylindrical rotor*) biasanya digunakan pada generator dengan tipe penggerak utama yaitu turbin uap, turbo alternator yang mempunyai putaran yang sangat tinggi. Rotor ini berbentuk silinder dimana kelilingnya terdiri dari alur-alur sebagai tempat kumparan medan.

Rotor ini di desain untuk berbagai jumlah kutubnya yang disesuaikan dengan jenis penggerak mula generator. Rotor didesain dan dibikin sedemikian rupa sehingga kehandalannya saat pada putaran maksimum (*runway turbin*). rotor dengan kutub rotor menonjol sering kali digunakan untuk mesin dengan putaran menengah dan rendah. Inti kutub terdiri dari lempengan-lempengan besi baja, untuk dimaksudkan agar mengurangi arus eddy. Inti kutub terdapat penguat medan yang

terdiri dari lilitan kawat tembaga (*coil*) terdapat isolasi dan tersekat terhadap poros dan rotor.

2.2.1.5 Celah udara (*air gap*)

Air gap berguna untuk mengalirkan udara yang terdapat pada stator dan sepatu kutub pun sedemikian rupa sehingga distribusi fluks cukup merata dan kecepatan rotor dapat mencapai kecepatan maksimal. Celah udara selain berfungsi untuk mengalirkan udara tetapi juga dapat berfungsi pendingin sehingga mengurangi panas dan kerusakan pada bagian stator ataupun sepatu kutub.

2.2.1.6 Poros

Membangkitkan tenaga listrik, dalam pengoprasian pada poros generator dikopel dengan poros turbin. Menopang poros digunakan pelengkap bantu berupa bantalan. Putaran kritis yang dari kedua porosnya sekaligus seluruh bagian yang berputar di isyaratkan maksimal sedikitnya 30% dari putaran liar turbin. Kekuatan poros pun dapat diuji dengan peralatan khusus.

Poros ini berfungsi sebagai mengubah energi kinetik aliran air yang mengalir keluar dari sudu-sudu gerak menjadi energi mekanik yaitu berupa putaran poros turbin. Poros ini ditempatkan secara vertikal dipusat turbin dan merupakan bagian berputar yang terbuat dari baja stainless. Pada sudu gerak turbin berjumlah 17 buah dengan poros dikopel bersama-sama oleh baut tanam yakni 18 buah dan muring yang dikencangkan sehingga bisa terkait dengan pengencang baut hidrolik



Gambar 2.5 Poros

Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016

2.2.1.7 Penjajar Poros

Untuk menopang kelurusan ataupun peletakan yang sesuai pada poros, maka saat dioperasikan dilengkapi dengan *guide bearing*, untuk menopang generator digunakan *thrust bearing*.



Gambar 2.6 Penjajar poros

Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016

2.2.1.8 Rumah Generator (*Generator Room*)

Pada rumah *generator room* ini terdiri dinding konstruksi beban bertulang. Bagian-bagian konstruksi berfungsi untuk ruang pembangkit (*power house*). Ruangan dirancang dengan sistem tertutup bebas dari udara luar, atau tertutup sehingga pada udara pendingin ini bersih. *Power house* berbentuk oktagon dilengkapi dengan peralatan sistem pendingin / *cooler* generator.

2.2.1.9 Bantalan Sikat

Bantalan sikat berfungsi untuk tempat sikat arang. Arus dc yang dihubungkan atau dialiri ke rotor melalui bantalan sikat.

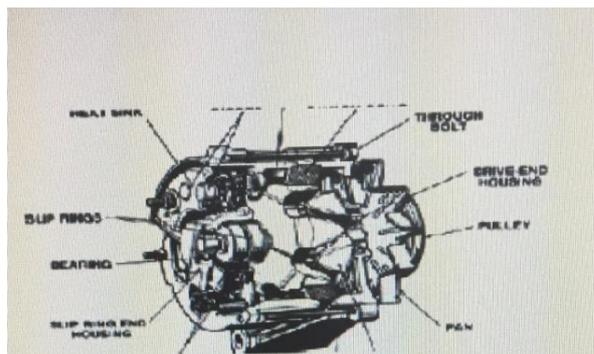


Gambar 2.7 Bantalan sikat

Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016

2.2.1.10 Cincin Geser

Cincin geser terbuat dari bahan yang tahan, atau kuat terhadap panas dan tidak mudah aus atau rusak karena cincin geser berfungsi sebagai mengaliri arus dc menuju kumparan medan.



Gambar 2.8 Cincin geser

Sumber : Rizal setiawan, Generator Sinkron 2016

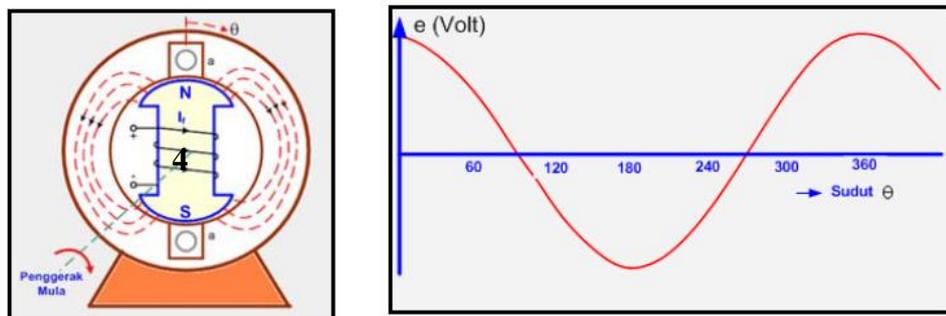
2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Memiliki kumparan jangkar pada stator dan medan pada rotor. Kumparan jangkarnya berbentuk sama dengan mesin induksi, sedangkan kumparan medannya dapat berbentuk sepatu kutub atau kutub dengan celah udara sama rata. Arus searah (DC) untuk menghasilkan fluks pada

kumparan medan dialirkan ke rotor melalui cincin.

Apabila kumparan jangkar dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa akan menimbulkan medan putar pada stator. Kutub medan rotor yang diberi penguat DC mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama (sinkron). Dilihat dari segi adanya interaksi dua medan magnet maka fungsi sudut kopelnya (θ).

$$T = Br Bs \sin \theta \quad (2.1)$$

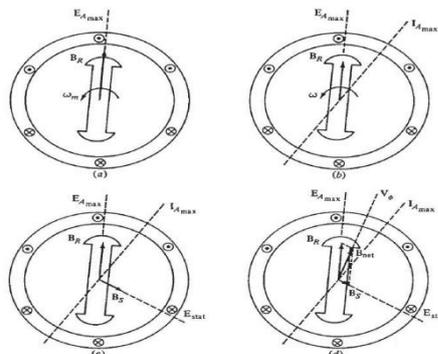


Gambar 2.9 Prinsip generator sinkron

Sumber : Ida Kartawijaya, Generator Sinkron 2016

2.2.3 Reaksi Jangkar

Apabila generator sinkron melayani beban maka pada kumparan jangkar stator mengalir arus; dan ini akan menimbulkan fluks jangkar. Fluks jangkar yang ditimbulkan arus (I_A) akan berinteraksi dengan kumparan medan rotor (I_f), sehingga menghasilkan resultan fluks (I_R). Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar.



Gambar 2.10 Model Reaksi Jangkar

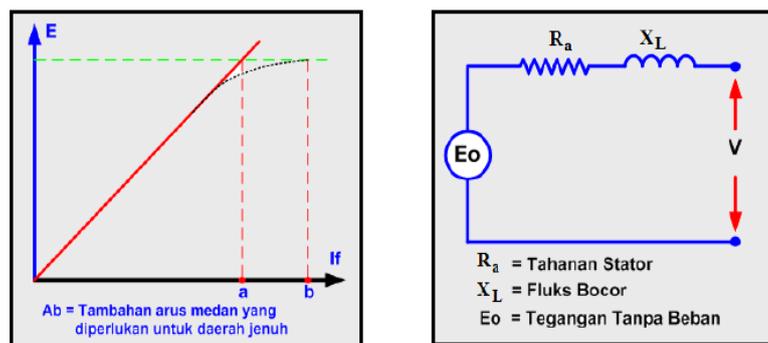
(Sumber: Ennopati, Generator Sinkron 2009)

Keterangan gambar di atas adalah sebagai berikut:

- Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_{Amax} .
- Tegangan resultan menghasilkan arus *lagging* saat generator berbeban induktif.
- Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri B_S dan tegangan E_{stator} pada belitan stator.
- Vector penjumlahan B_S dan B_R yang menghasilkan B_{net} dan penjumlahan E_{stator} dengan E_{Amax} menghasilkan V_F pada outputnya.

2.2.4 Generator Tanpa Beban

Dengan memutar generator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f); tahanan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Dalam keadaan tanpa beban, arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Apabila arus medan (I_f) diubah-ubah nilainya maka akan diperoleh nilai E_o seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Celah udara kurva kemagnetan merupakan garis lurus.



Gambar 2.11 a. Kurva Hubungan celah udara, b. Penjelasan hubungan celah udara

Sumber : Ida Kartawijaya, Generator Sinkron 2016

AB = tahanan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh

R_a = tahanan stator

X_L = fluks bocor

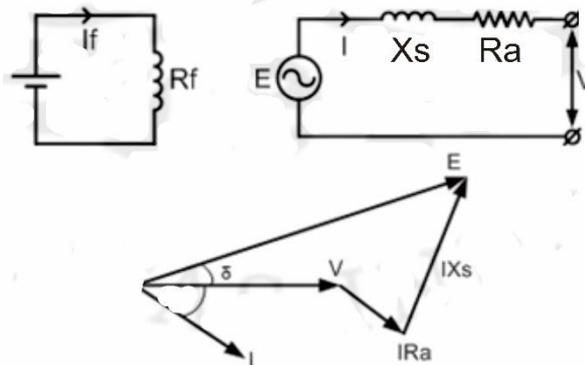
$E_o = V$ (keadaan tanpa beban)

2.2.5 Generator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi pemagnet (X_m). X_m ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

Model rangkaian dan diagram vector dari generator berbeban induktif (pf lagging) terdapat pada gambar di bawah ini.

$$E = V + IR_a + jX_s; X_s = X_m + X_a$$



Gambar 2.12 Rangkaian dan vektor beban induktif

Sumber : Muhammad Fajar M, Generator sinkron 2010

Secara umum sifat beban yang dipikul oleh alternator dapat bersifat resistif, induktif dan kapasitif. Bentuk hubungan beban ini akan mempengaruhi arus yang mengalir pada alternator. Arus ini bisa menjadi sefasa. Tertinggal, atau mendahului dari tegangan dari jenis beban yang

diberikan pada terminal alternator. Adapun diagram fasor alternator pada faktor daya satu, terbelakang dan mendahului seperti gambar dibawah ini :

- a. Beban resistif (sefasa)
- b. Beban induktif (terbelakang)
- c. Beban kapasitif (mendahului)

Dengan memisalkan alternator dihubungkan ke sistem besar (*busbar*), pada gambar (a) yang merupakan diagram vektor dari alternator dengan faktor daya I_A sejauh 90° . Seperti persamaan berikut ini :

$$I_A \cdot Z_S = I_A \cdot R_A + j I_A \cdot X_S$$

$$E_A = V_t + j I_A \cdot X_S$$

Dimana : E_A = tegangan generator berbeban (V)

V_t = tegangan terminal (V)

I_A = arus alternator (A)

R_A = tahanan alternator (Ω)

Z_S = impedansi sistem (Ω)

X_S = reaktansi sinkron (Ω)

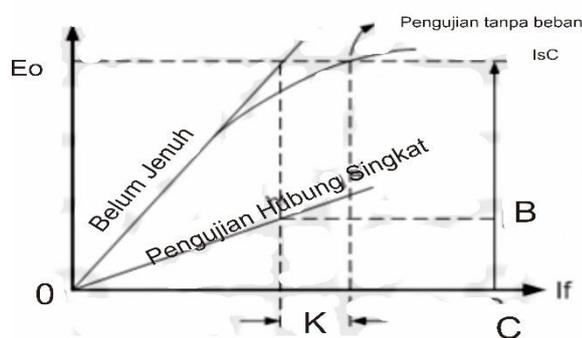
Jika arus penguatan alternator dinaikan dari penguatan normal pada faktor daya satu (sefasa), maka E_A akan bertambah sedangkan jumlah vektor antara V_t dan $I_A \cdot X_A$ tetap tidak berubah ($E_A \neq V_t + I_A \cdot X_S$). Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang dimana daya keluaran pada alternator tidak berpengaruh sehingga tidak menimbulkan jatuh tegangan $I_R \cdot Z_S$ yang mendahului 90° dari $I_R \cdot Z_S$.

Pada gambar (b) terdapat diagram vektor, dimana bila diberi pengaturan yang lebih (*over excited*) maka alternator bekerja pada faktor daya terbelakang (*lagging*) sehingga menyebabkan arus akan terbelakang dari tegangan yang mengakibatkan generator sinkron mengakibatkan daya reaktif induktif. Namun bila arus penguat dikurangi (*under excited*). E_A tentu akan menjadi kecil, sehingga terdapat perbedaan jumlah vektor V dan

IA. Z_s tetap tidak berubah. Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang sehingga menimbulkan jatuh tegangan $I_R \cdot Z_s$ yang mendahului 90° dari $I_R \cdot Z_s$. Pada gambar (c) terdapat diagram vektor, dimana bila arus penguatan dikurangi, maka alternator bekerja pada faktor daya mendahului (*leading*) sehingga menyebabkan arus akan mendahului dari tegangan yang mengakibatkan daya reaktif kapasitif. pada alternator daya keluaran konstan, maka jatuh tegangan $I_A \cdot Z_s$ akan konstan pula. Jika arus penguatannya diberi bervariasi, maka I_A akan tetap tidak berubah, tetapi I_R dan $I_A \cdot Z_s$ akan berubah nilainya.

2.2.6 Reaktansi Sinkron

Harga X_s didapat dari dua macam percobaan yakni percobaan tanpa beban dan hubung singkat. Dari percobaan tanpa beban diperoleh harga E_o sebagai fungsi arus medan (I_f). Hubungan ini menghasilkan kurva kemagnetan yang berharga liniernya (*unsaturated*). Kelebihan arus medan pada keadaan jenuh sebenarnya dikompensasi oleh adanya reaksi jangkar. Percobaan hubung singkat menghasilkan hubungan antara arus jangkar (I) sebagai fungsi arus medan (I_f), dan ini merupakan garis lurus (I_{hs}).



Gambar 2.13 Reaktansi sinkron

(Sumber : Muhammad Fajar M, Generator sinkron 2010)

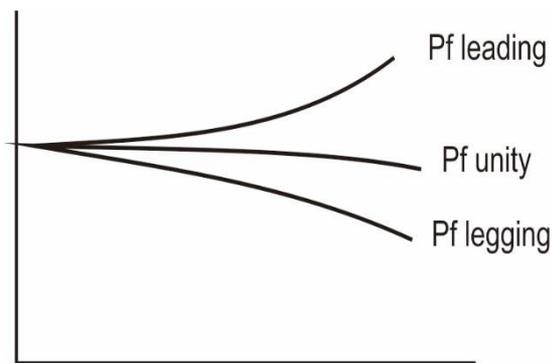
Jadi, nilai reaktansi sinkron adalah:

$$X_s = \frac{E_o}{I_{hs}} = \frac{OA}{BC}$$

2.2.7 Pengaturan Tegangan

Gambar di bawah ini, terjadi perbedaan antara tegangan terminal V dalam keadaan berbeban, dengan tegangan E_o pada saat tanpa beban, dipengaruhi selain oleh faktor kerja juga oleh besarnya arus jangkar (I).

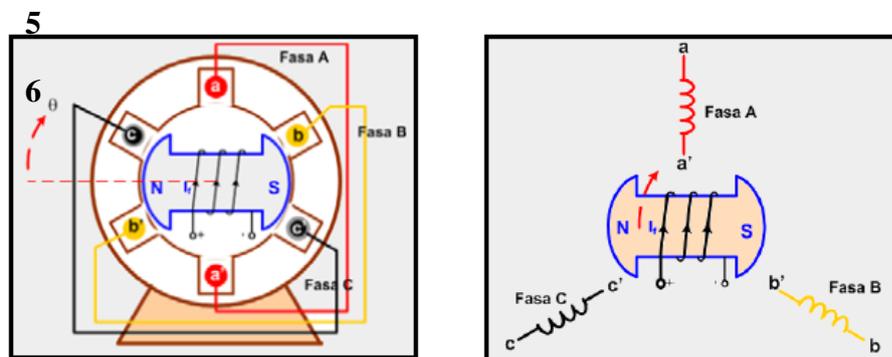
Dengan perubahan tegangan V untuk faktor kerja berbeda-beda pada vektor di atas, karakteristik tegangan terminal V terhadap arus jangkar I dapat digambarkan pada grafik di bawah ini. Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal generator antara keadaan tanpa beban dan beban penuh dinyatakan. Pengaturan tegangan = $\frac{E_o - V}{V}$



Gambar 2.14 Hubungan pf dengan tegangan output

(Sumber : Muhammad Fajar M, Generator sinkron 2010)

2.2.8 Generator Tiga Fasa



Gambar 2.15 Generator tiga fasa dua kutub

(Sumber : Ida Kartawijaya, Generator Sinkron 2016)

Generator tiga fasa lebih handal karena konduktor dalam sistem tiga fasa hanya membutuhkan $\frac{3}{4}$ tembaga dari sistem satu fasa untuk menyalurkan daya yang sama. Efisiensi 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.

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

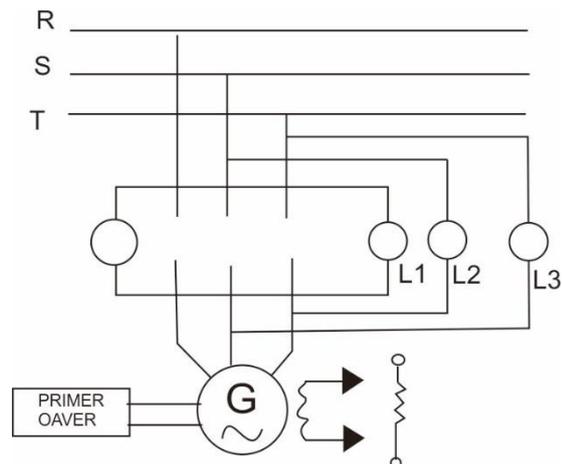
$$F \text{ (Hz)} = \frac{(\text{Jumlah Kutub}) \cdot (\text{RPM})}{2 \cdot 60}$$

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.

2.2.9 Paralel Generator

Untuk melayani beban yang meningkat, ada kondisi dimana kita harus memparalel 2 atau lebih generator dengan maksud menambah kapasitas daya dan dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada generator yang harus dimatikan misalnya untuk *maintenance* atau *standby*. Adapun syarat paralel generator adalah:

- a. Tegangan (GGL) sesaat harus sama.
- b. Frekwensi harus sama
- c. Urutan fasa harus sama
- d. Fasa harus sama



Gambar 2.16 Sinkronisasi manual

(Sumber : Muhammad Fajar M, Generator sinkron 2010)

R, S, dan T adalah urutan fasa tegangan jala–jala. U, V, dan W adalah urutan fasa tegangan generator. Saat memparalelkan, lampu L1 mati sedangkan L2 dan L3 nyala sama terangnya, dan keadaan ini berlangsung agak lama. Posisi semua fasa sistem tegangan jala-jala berhimpit dengan semua fasa sistem tegangan generator.

Ada kontroler yang digunakan pada aplikasi generator guna mencocokkan kecepatan dan fasa tegangan sebelum memparalel dengan generator yang lain atau bus bar yang sedang *online*.

Paralel generator memiliki beberapa keuntungan :

- a. Dari generator paralel mampu memberikan daya yang lebih lebih besar dibandingkan satu generator
- b. Dengan cara memparelkan generator mampu meningkatkan sistem kerja realibilitas sistem tenaga listrik.
- c. Dengan cara memparelkan generator, dapat melakukan perawatan (*maintanace*) salah satu generator.
- d. Jika hanya satu generator berkapasitas besar yang dioperasikan dan generator tersebut tidak dibebani secara penuh maka hal ini tidak efisien. Berbeda dengan mengopraikan beberapa generator yang ebih

kecil, sebagian generator dapat dioperasikan pada kapasitas penuhnya dan yang lain sebagai pengendalian beban.

2.2.10 Syarat-Syarat Paralel Generator

Syarat paralel generator sebagai berikut :

- a. Frekuensi harus sama

Artinya frekuensi pada generator satu maupun paralel memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi 50 Hz. Samalahnya tegangan. Pada nilai frekuensi pun juga rentan terhadap perubahan erat kaitannya pengaruh terhadap perubahan putaran generator.

- b. Urutan sudut phase harus sama

Urutan U, V, dan W dari generator urutannya sama dengan phase R, S, dan T jaringan jala-jala. Urutan phase ini berkaitan dengan konstruksi awal dari penyambungan paralel phase generator dengan jaringan.

- c. Sudut phase harus sama

Sudut phase dari generator dan jaringan sama, perbedaan sudut phase akan menimbulkan beda tegangan dari phase yang sama.

- d. Tegangan rms harus sama

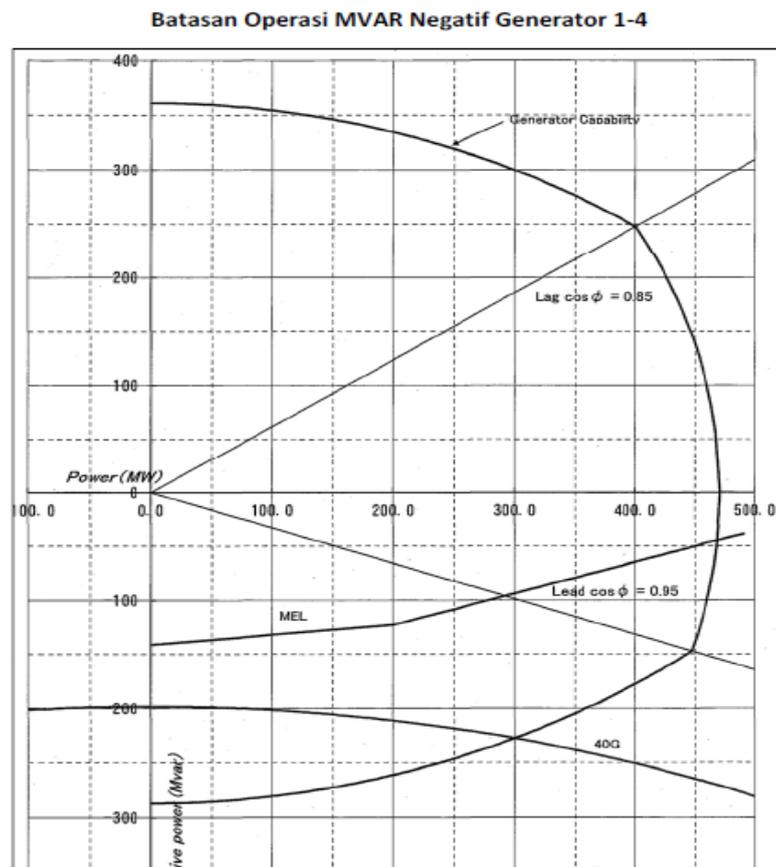
Pada tegangan sinusoidal memiliki nilai sama yang baik tegangan yang ada pada jaringan maupun yang dibangkitkan dari generator. Saat proses sinkronisasi perbedaan tegangan yang berbeda sangat sensitif dan rentan terhadap perubahan. Pengaturan generator dapat dilakukan dengan cara pengaturan arus eksitasi yang masuk pada kumparan medan (field winding) generator.

2.3 Kurva Kapabilitas

Kurva kapabilitas generator merupakan kurva yang menjelaskan pada pola operasi generator. Dari kurva ini didapatkan atau ditentukan titik operasi terbaik generator. Dilihat dari sisi pendinginnya. Gambar 2.9 memperlihatkan kurva

kapabilitas dari suatu generator yang diinginkan dengan gas hidrogen.

Maka dari itu parameter parameter tekanan gas hidrogen sebagai media pendingin diperlihatkan pada Gambar 2.9 semakin besar tekanan gas hidrogen, semakin besar efek pendinginnya sehingga dapat digunakan arus penguat yang lebih besar maka dapat dihasilkan daya reaktif yang lebih besar pula. Generator mampu menyerap atau memberikan daya reaktif, namun kemampuan ini dibatasi oleh kurva kapabilitas reaktif yang dimiliki oleh setiap generator.



Gambar 2.17 Kurva kapabilitas

(Sumber : PLTU Suralaya, Generator sinkron 2010)

Jika generator memberikan ataupun menyuplai daya reaktif, bisa dikatakan generator bersifat induktif, namun jika eksitasinya kurang (*Under Excitation*) maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan statornya.

Kondisi *Over Excitation* dan *Under Excitation* pada saat pengoprasian harus dihindari, seperti disebutkan diatas dan eferk domino yang diakibatkan tidaklah kecil, karena pemanasan yang berlebihan mengakibatkan kerusakan laminasi dari lilitan-lilitan tersebut rusak maka tidak menutup kemungkinan akan menjadi hubung singkat antar fasa atau dengan *body* generator.

2.4 Faktor Daya

Atau disebut juga cosinus sudut ($\cos \phi$) 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.

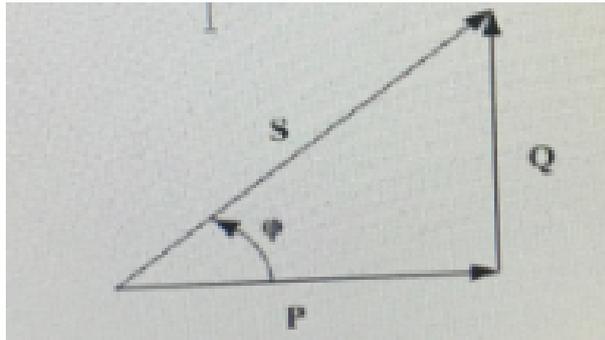
Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya (pf) selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Secara teori, jika seluruh beban daya memiliki $pf = 1$, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistim pendistribusian. 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.

Persamaan untuk perhitungan atau perbandingan faktor daya tampak Gambar 2.10. Dimana :

$\cos \phi = \text{Faktor daya}$

$P = \text{Daya aktif (Watt)}$

$S = \text{Daya semu (VA)}$



Gambar 2.18 Segitiga daya

(Sumber : Bindar Marda Prasetya, Segitiga daya 2016)

Pada sistem arus bolak-balik, daya listrik tidak sederhana pada sistem arus searah. Pada arus bolak-balik terdapat tiga jenis daya, yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif.

2.4.1 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.

Secara matematis, daya semu merupakan perkalian antara tegangan dan arus efektif. $S = V.I$

2.4.2 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:

$$P = V.I \times \cos \phi$$

$$1 \text{ phasa } P = V \times I \times \cos \phi \text{ (W) dimana } Z = R$$

$$3 \text{ fasa } P=3 \times V_{L-L} \times I_L \times \cos \phi \text{ (W)}$$

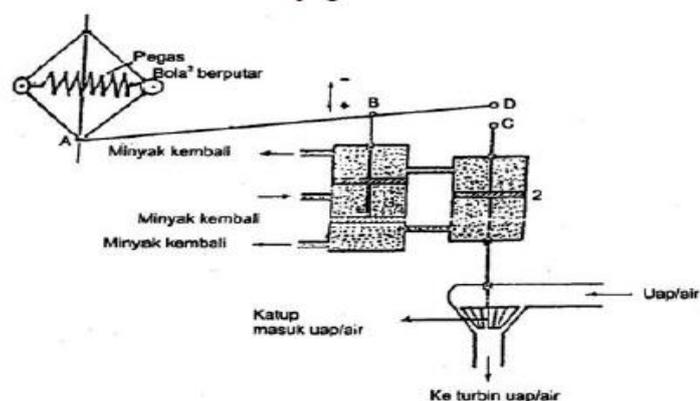
2.4.3 Daya Reaktif (*Reactive Power*)

Pada dasarnya daya reaktif ini (faktor Q) disebabkan oleh 2 karakteristik beban yaitu beban induktif dan kapasitif. Adanya beban induktif membuat perbedaan phase 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. Secara matematis, daya reaktif merupakan perkalian antara tegangan efektif, arus efektif, dan nilai $\sin \theta$.

$$Q= V.I \sin \theta$$

2.5 Prinsip Kerja Governor

Turbin uap dilengkapi dengan *mover frequency control* dan merupakan pengaturan *control valve*. *Control valve* akan membuka untuk menambah kapasitas uap/ bahan bakar ketiak frekuensi turun dari nominal atau sebaliknya, akan menutup untuk mengurangi kapasitas uap/bahan bakar ketika frekuensi naik. Pengertian ini dikenal *speed Governor*.



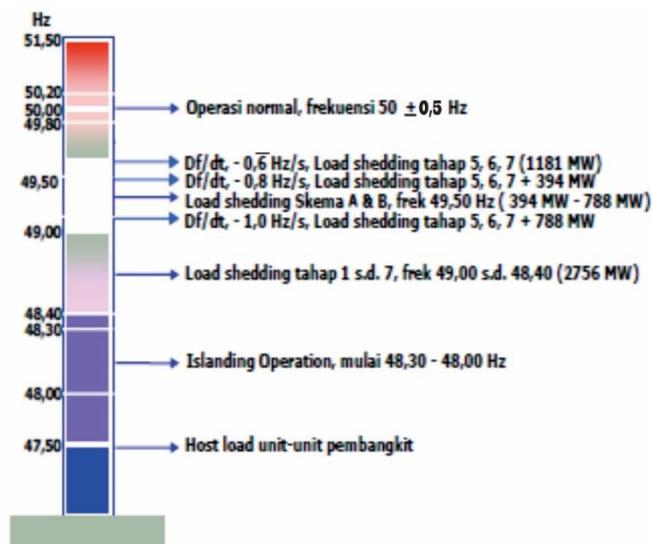
Gambar 2.19 Skema Governor

(Sumber : Patriandari , Skema Governor 2009)

2.6 Batasan Nilai Frekuensi

Sistem dibatasi untuk penurunan frekuensi maksimal 2.5 Hz dari batas nominal 50 Hz, Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12 Tongkat Frekuensi. Dari nilai 2,5 Hz didapatkan dari droop pada generator 5%, maka dapat dihitung :

$$5\% = 0,05 \times 50 \text{ Hz} = 2,5 \text{ Hz}$$

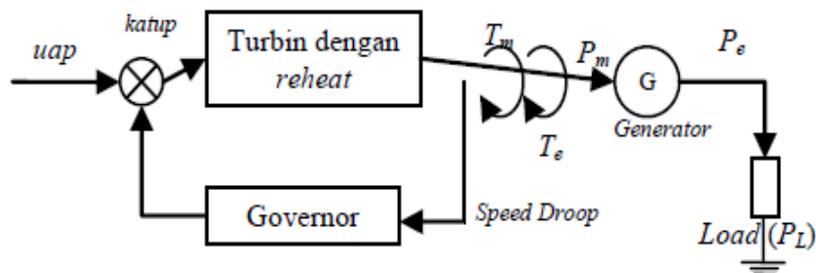


Gambar 2.20 Tongkat Frekuensi

(Sumber : patriandari , Tongkat Frekuensi 2009)

2.7 Operasi Load Sharing

Fungsi pembebanan yaitu kecepatan *prime mover* berubah sesuai tingkat pembebanan. Baik dengan aplikasi *single operation prime mover* atau operasi paralel dua atau lebih *prime*.



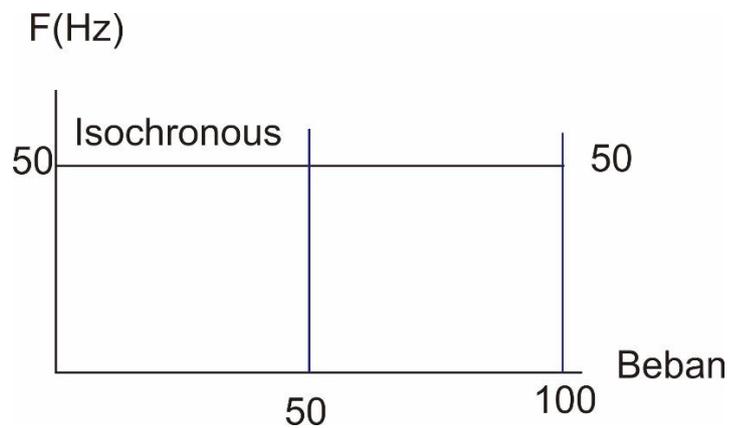
Gambar 2.21 blok diagram sistem pembangkit listrik (Load Sharing)

(Sumber : patriandari , blok diagram sistem pembangkit listrik Load Sharing 2009)

Speed droop menentukan hubungan antara sinyal pengatur putaran (*governor*) dengan output beban yang dibangkitkan oleh generator. *Speed droop* merupakan perbandingan beban dengan frekuensi.

2.7.1 Sistem Isochronous

Metode *isochronous* atau dengan istilah *speed droop* 0% digunakan untuk kecepatan tetap konstan pada *prime mover* di berbagai tingkat pembebanan baik aplikasi single operation, atau dua atau lebih *prime mover* yang dikontrol oleh *load sharing control*.

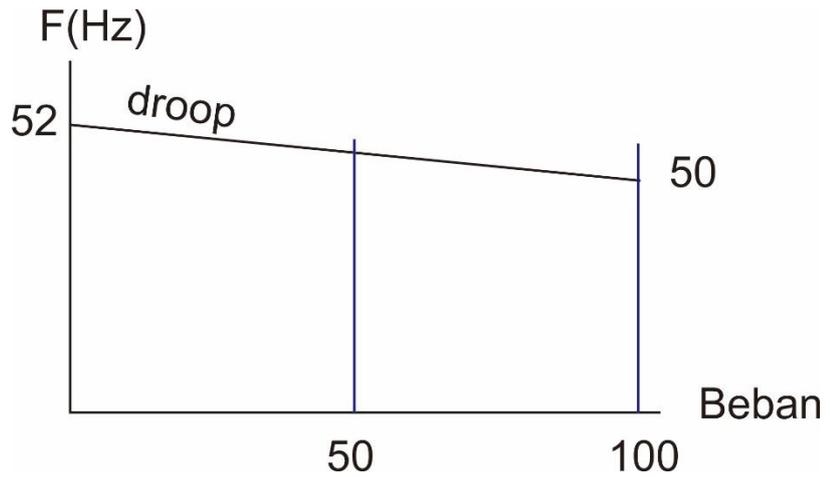


Gambar 2.22 Sistem *Ishocronous*

(Sumber : Muhammad Fajar M, *Sistem Ishocronous* 2010)

2.7.2 Sistem *Speed droop*

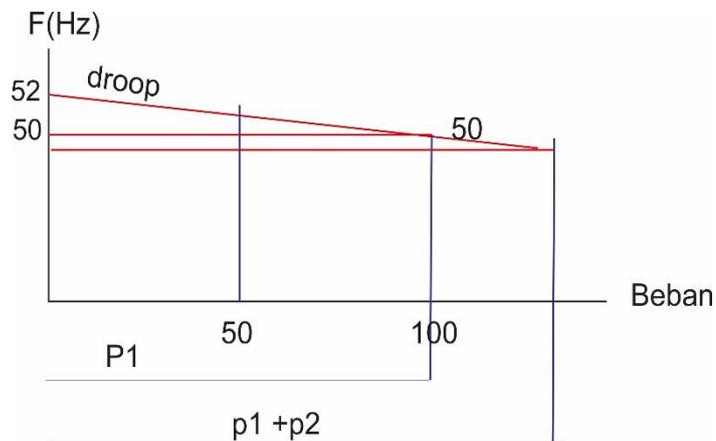
Speed droop adalah bilangan persentase yang menyatakan kecepatan turbin meresponden perubahan frekuensi. Semakin kecil nilai *Speed droop*, maka semakin peka terhadap perubahan frekuensi, demikian pula sebaliknya semakin besar nilai *Speed droop*, maka semakin malas perubahan frekuensi.



Gambar 2.23 Sistem Speed droop

(Sumber : Muhammad Fajar M , *Speed droop* 2010)

2.7.3 Hubungan Antara *Speed Droop* dan Pembagian Beban



Gambar 2.24 Sistem Speed droop

(Sumber : Muhammad Fajar M, Sistem Ishocronous

dan pembagian beban (2010)

Terdapat dua buah unit pembangkit yang bekerja secara paralel dan melayani beban sebesar P , hanya saja untuk pembangkit 2, garis beban berarah ke kiri dan sumbu frekwensinya ada di kanan untuk memudahkan penggambaran bahwa beban P selau sama dengan jumlah daya yang

dibangkitkan yakni P_1 ditambah P_2 . Unit pembangkit 1 mempunyai *speed droop* S_1 sedangkan pembangkit 2 *speed droop*-nya S_2 .

Mula-mula masing-masing unit mempunyai beban P_1 dan P_2 sedangkan frekwensinya F_1 dan jumlah beban adalah P . Kemudian terjadi kenaikan beban menjadi P^1 sehingga beban masing-masing unit pembangkit menjadi P_1^1 dan P_2^1 dimana penjumlahan keduanya adalah P_1 dan frekwensinya turun menjadi F_2 . Terlihat bahwa unit pembangkit 1 yang mempunyai *speed droop* S_1 lebih kecil daripada S_2 mengalami penambahan beban yang lebih besar daripada penambahan beban pada unit pembangkit 2 yang sebesar $P_2^1 - P_2$.

Sistem yang terdiri dari banyak unit pembangkit sesungguhnya dapat dianalogikan dengan sebuah unit pembangkit besar yang memiliki *speed droop* tertentu

2.8 Sistem Eksitasi

Eksitasi pada generator sinkron adalah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga dihasilkan tegangan listrik bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor, semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan oleh sebuah generator.

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi terdiri dari dua jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) yang terdiri dari sistem eksitasi konvensional dan eksitasi statis dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*) yaitu

menggunakan sistem permanen magnet generator. Berikut adalah penjelasan jenis-jenis dari sistem eksitasi tersebut:

2.8.1 Sistem Eksitasi Konvensional

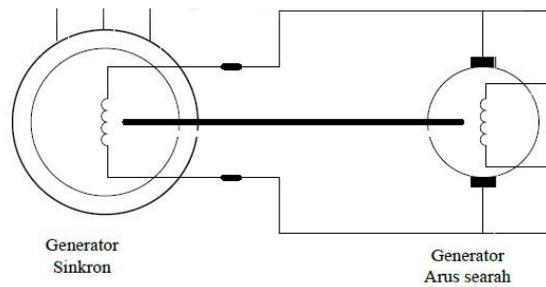
Untuk sistem eksitasi konvensional, arus searah yang diinjeksikan ke kumparan diperoleh dari generator arus searah yang memiliki kapasitas yang kecil yang disebut dengan eksiter. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, yang menyebabkan putaran antara kedua generator tersebut sama.

Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter ini diberikan ke kumparan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan *slip ring*. Akibatnya arus mengalir ke rotor dan menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik.

Pada sistem eksitasi konvensional ini memiliki beberapa kekurangan yaitu:

- a. Generator arus searah akan menjadi beban tambahan bagi penggerak mula.
- b. Penggunaan *slip ring* dan sikat dapat menimbulkan masalah saat digunakan untuk mensuplai arus searah pada kumparan medan generator sinkron.
- c. Akan timbul rugi gesekan pada generator utama akibat dari sikat arang yang menekan *slip ring*.
- d. Generator arus searah memiliki keandalan yang rendah.

Dengan mempertimbangkan kekurangan di atas maka saat ini pada penguatan medan magnet kebanyakan menggunakan sistem eksitasi statis. Berikut adalah gambar dari sistem eksitasi konvensional menggunakan generator arus searah.



Gambar 2.25 Sistem Eksitasi Menggunakan Generator Arus Searah

(Sumber : Ennopati, Sistem Eksitasi 2009)

2.8.2 Sistem Eksitasi Statis

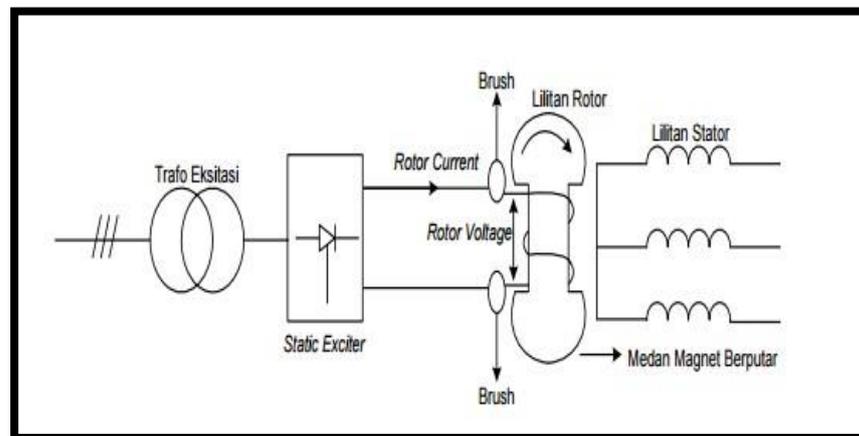
Sistem eksitasi statis yaitu sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut dian dan tidak berputar bersamaan dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis ini biasa disebut dengan *self excitation* yang merupakan sistem eksitasi yang tidak membutuhkan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator tersebut. Sumber eksitasi pada sistem ini yaitu berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang telah disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah *thyristor*.

Pada saat kondisi awak, pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, dan magnet sisa inilah yang akan menimbulkan tegangan pada stator. Tegangan yang dihasilkan tersebut akan masuk ke dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor. Akibatnya, medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan tegangan AC akan naik. Dan siklus ini akan terjadi berulang secara terus menerus hingga dicapai tegangan nominal yang dibutuhkan oleh generator untuk proses pembangkitan. Dalam proses penyearahan memiliki pengaturan sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Pengaturan tersebut biasanya dilakukan oleh peralatan yang disebut dengan AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

Sistem eksitasi statis, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional yang menggunakan generator arus searah sebagai eksiter sudah

jauh lebih baik. Yaitu pada eksitasi statis tidak ada generator arus searah yang memiliki keandalan rendah dan beban pada penggerak utama berupa generator arus searah tersebut tidak ada. Sehingga hal tersebut menyebabkan sistem eksitasi statis ini memiliki keandalan yang lebih baik. Pada sistem eksitasi statis ini untuk kondisi awal di mana generator belum mampu menghasilkan tegangan keluaran, maka energi yang digunakan untuk sistem eksitasi diambil dari baterai. Dan proses ini dinamakan dengan proses *field flashing*. Di mana pada proses *field flashing* ini baterai menginjeksikan arus inisial eksitasi ke rotor generator. Dengan adanya arus inisial eksitasi ini maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran.

Berikut ini adalah skema dari sistem eksitasi statis dengan menggunakan sikat:

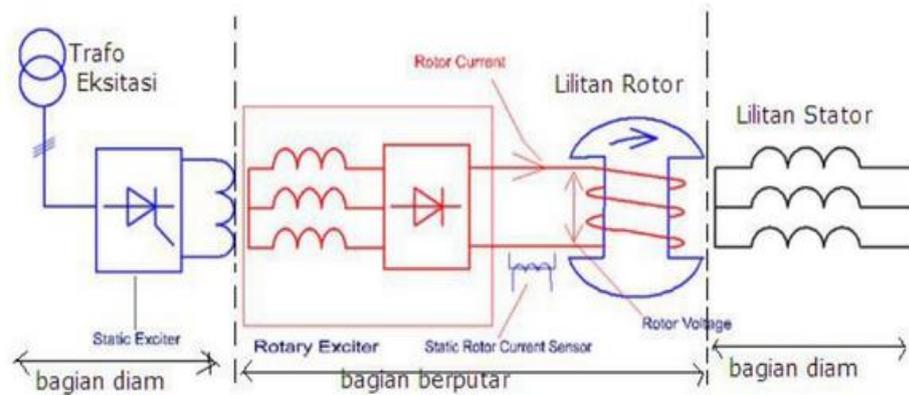


Gambar 2.26 Skema Sistem Eksitasi Dengan Sikat
(Sumber: Rajagukguk, Sistem eksitasi 2009)

2.8.3 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Perkembangan pada sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat menggunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar. Pada Gambar 2.19 menunjukkan sistem eksitasi tanpa sikat. Penggunaan sikat dan *slip ring* untuk menyalurkan arus eksitasi ke

rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang. Digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).



Gambar 2.27 prinsip kerja eksitasi *brushless excitation*

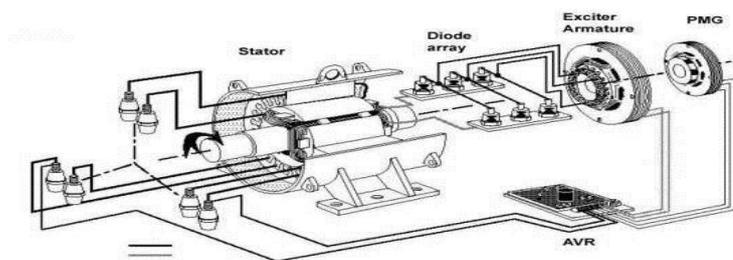
(Sumber: Eka Nur S, prinsip kerja eksitasi *brushless excitation* 2015)

Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut penguat utama (*main exciter*). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus eksitasi generator utama. *Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar yang menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik magnet yang ada pada stator main exciter. Besar arus searah yang mengalir ke kutub main exciter diatur oleh pengatur tegangan otomatis. *Automatic Voltage Regulation (AVR)*. Besarnya arus main exciter berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan *main exciter*, maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama. Pada sistem eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekeringlebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar

dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit

Pada sistem eksitasi tanpa sikat sama sekali tidak bergantung pada sumber listrik eksternal, melainkan dengan menggunakan *pilot exciter*. Dan untuk sistem penyaluran arus eksitasi ke rotor generator utama tanpa melalui media sikat arang (*carbon brush*). *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator arus bolak balik dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator. Suatu generator sinkron harus mempunyai medan magnet yang berputar supaya pada stator generator tersebut dihasilkan tegangan. Pada sistem eksitasi yang dijelaskan sebelumnya, medan magnet ini dihasilkan dari kumparan rotor yang diinjeksikan dengan sumber listrik arus searah. Dan selain cara tersebut, terdapat cara lain yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator. Cara tersebut yaitu sistem eksitasi permanen magnet generator (PMG). Cara ini yaitu dengan menggunakan magnet permanen yang diposisikan pada poros generator tersebut, sehingga berputar saat poros tersebut diputar.

Sistem eksitasi dengan menggunakan sistem eksitasi tanpa sikat yang dilengkapi dengan magnet permanen generator biasanya digunakan pada generator sinkron yang memiliki kapasitas yang besar. Hal ini bertujuan agar sistem eksitasi dari generator tersebut tidak bergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin tersebut. Berikut ini merupakan skema dari sistem eksitasi menggunakan magnet permanen:



Gambar 2.28 Sistem Eksitasi Menggunakan Permanen Magnet Generator

(Sumber: Eka Nur S, prinsip kerja eksitasi *brushless excitation* 2015)

Dapat dilihat pada gambar 2.19 merupakan skema dari sistem eksitasi menggunakan magnet permanen. PMG akan berputar saat rotor berputar, karena telah terhubung pada satu sumbu atau poros. PMG di sini bertugas untuk membangkitkan tegangan atau arus AC yang kemudian disearahkan dan dimasukkan pada AVR untuk diatur dan dikontrol. Dikarenakan tegangan atau arus AC pada PMG sangat kecil, maka arus AC yang telah disearahkan dimasukkan ke eksiter yang bertujuan untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. arus keluaran dari eksiter ini kemudian akan disearahkan menggunakan *rotating diode*. Dan selanjutnya arus eksitasi diinjeksikan ke rotor sehingga terdapat medan magnet pada generator yang akhirnya menimbulkan fluks listrik yang menghasilkan tegangan keluaran pada generator.