

BAB II

GENERATOR SINKRON

2.1 Dasar Teori

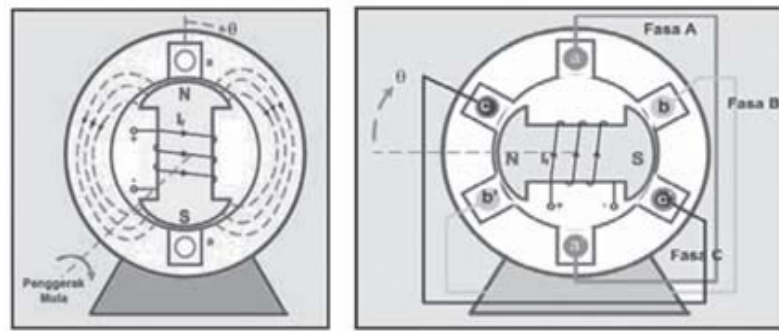
Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (altenator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (prime Mover), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan defenisi sinkronya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor.

Generator arus bolak – balik dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

- a. Generator arus bolak – balik 1 fasa
- b. Generator arus bolak – balik 3 fasa

Gambar diagram kedua bentuk generator arus bolak – balik tersebut dapat dilihat pada gambar berikut :



(a)

(b)

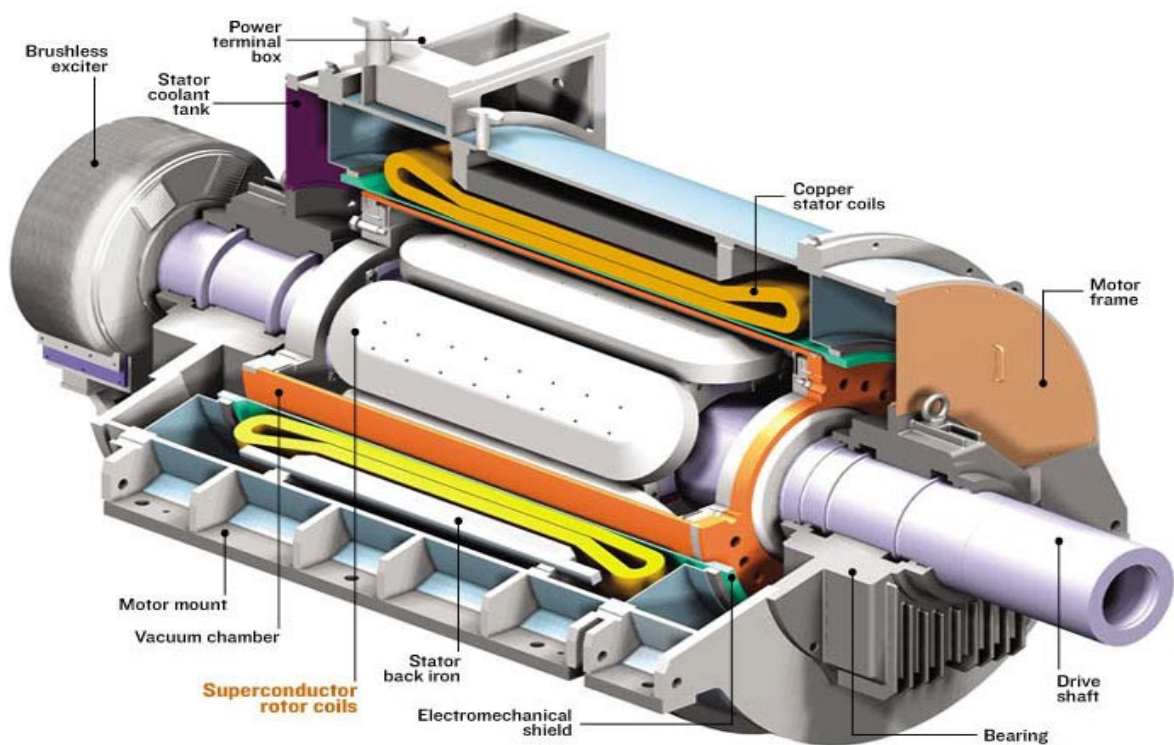
Gambar 2.1 (a) Generator AC Satu Fasa Dua Kutub

(b) Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub

Generator sinkron sering dijumpai pada pusat – pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relative besar) . misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain – lain selain generator dengan kapasitas besar, mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set.

2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Pada generator sinkron arus DC diterapkan lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh primer mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksikan tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator.



Gambar 2.2 konstruksi generator sinkron

Bagian-bagian utama generator sinkron :

1. Stator, merupakan bagian yang tidak bergerak pada generator tempat dililitkannya kumparan jangkar (armature winding). Kumparan jangkar berfungsi sebagai tempat diimbaskannya gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan oleh generator.

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

- a. Rangka stator

Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

b. Inti stator

Inti stator terbuat dari laminasi – laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus terpasang ke rangka stator.

c. Alur (slot) dan Gigi

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.3 Bentuk – bentuk alur

d. Kumparan stator (kumparan jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

2. Rotor adalah bagian yang bergerak pada generator dimana terdapat kumparan medan (field winding). Kumparan medan adalah tempat dialirkannya arus penguat (eksitasi) untuk menghasilkan medan magnet.

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

a. Slip ring

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasang ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

b. Kumparan rotor (kumparan medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

c. Poros rotor

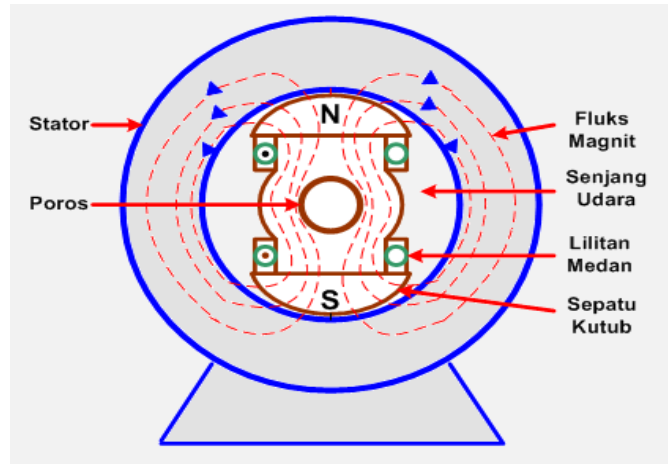
Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah dibentuk slot – slot secara parallel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder).

1. Jenis kutub menonjol (salient pole)

Pada jenis salient pole, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor belitan – belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk

kutub berlawanan. Gambar bentuk kutub menonjol generator sinkron seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.4 Rotor kutub menonjol

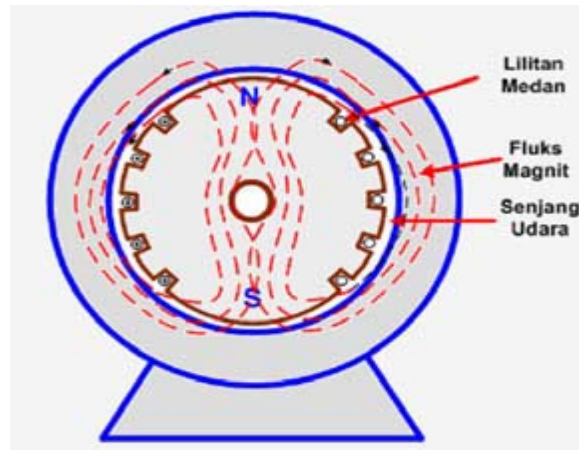
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120 – 400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena :

- Kutub menonjol akan mengalami rugi – rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

2. Jenis kutub silinder (non salient pole)

Pada jenis non salient pole, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang

berbentuk silinder yang mempunyai alur – alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh eksiter. Gambaran bentuk silinder generator sinkron tampak seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.5 Rotor kutub Silinder

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena :

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinusoida sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron adalah menggunakan prinsip induksi elektromagnetik dimana disini rotor berlaku sebagai kumparan medan (yang

menghasilkan medan magnet) dan akan menginduksi stator sebagai kumparan jangkar yang akan menghasilkan energi listrik. Pada belitan rotor diberi arus eksitasi DC yang akan menciptakan medan magnet. Rotor ini dikopel dengan turbin putar dan ikut berputar sehingga akan menghasilkan medan magnet putar. Medan magnet putar ini akan memotong kumparan jangkar yang berada di stator. Oleh karena adanya perubahan fluks magnetik pada tiap waktunya maka pada kumparan jangkar akan mengalir gaya gerak listrik yang diinduksikan oleh rotor. Kecepatan sudut putar rotor

$$n = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dimana :

n = kecepatan putar rotor (rpm)

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

2.4 Karakteristik Generator

Karakteristik generator ketika melayani beban yang diberikan kepadanya dijelaskan pada uraian berikut :

2.4.1 Karakteristik Tanpa Beban (Beban Nol)

Apabila generator sinkron diputar pada kecepatan sinkron dan pada kumparan medan diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan stator akan terinduksi tegangan sebesar :

$$E_0 = c . n . \phi \dots\dots\dots (2-2)$$

Keterangan :

E_0 = Tegangan induksi (volt)

c = Konstanta mesin

n = Putaran sinkron (rpm)

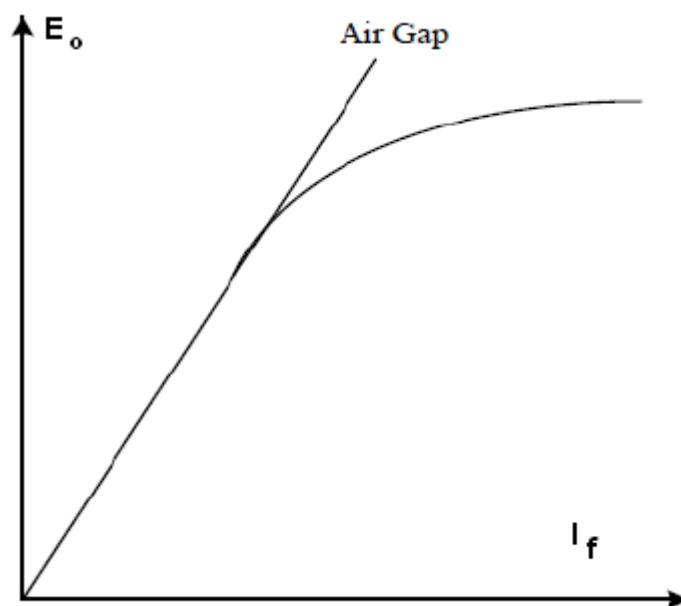
ϕ = Fluks yang dihasilkan oleh I_f

Prosedur percobaan ini adalah dengan mengatur generator pada kecepatan nominal (rated speed) yang terminalnya tidak dibebani, serta menyetel arus medannya hingga nol. Setelah itu akan terlihat arus medan diatur bertahap dari nol hingga pada saat bersamaan timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar stator generator yang juga semakin meningkat, sesuai dengan persamaan diatas, dimana peningkatan arus medan I_f sebanding dengan fluks (ϕ) yang timbul.

Perubahan (peningkatan) arus medan dan tegangan induksi tersebut dicatat secara bersamaan untuk melihat hubungan antara keduanya.

Pada saat terminal generator tidak dibebani (open circuit), arus jangkar $I_A=0$, sehingga tegangan terminalnya (V_t) akan sama dengan tegangan induksinya (E_0).

Dalam keadaan tanpa beban, arus jangkar tidak akan mengalir pada belitan stator sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).



Gambar 2.6 Kurva Karakteristik Tanpa beban

2.4.2 Karakteristik Hubung Singkat

Selain karakteristik tanpa beban, maka ada karakteristik lainnya yaitu karakteristik hubung singkat. Karakteristik ini diperoleh dari percobaan hubung singkat dengan syarat-syarat sebagai berikut :

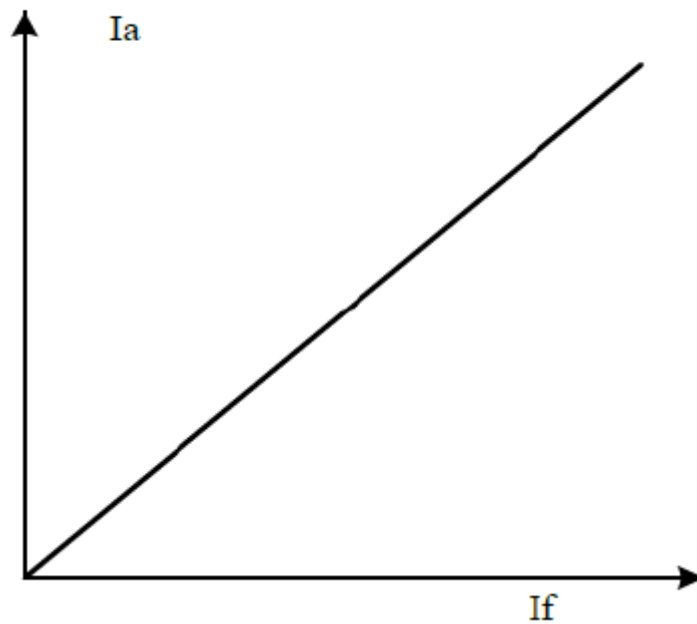
1. Putaran konstan.
2. Beban ($R = 0$), terminal generator dihubungkan singkat.
3. Arus penguatan (I_f) secara bertahap diatur mulai dari nol hingga arus jangkar mencapai nilai maksimum.

Apabila generator sinkron melayani beban, maka pada belitan jangkar akan mengalir arus. Arus ini akan menimbulkan fluks jangkar di dalam rangkaian stator yang bersifat reaktif.

Percobaan dilakukan dengan mengatur generator pada kecepatan nominal (rated speed), dimana terminalnya dihubungkan singkatkan melalui Ampermeter, serta menyetel arus medannya hingga nol. Setelah itu akan terlihat arus medan akan meningkat secara bertahap, begitu pula dengan arus jangkarnya. Kemudian arus medan dan arus jangkarnya diukur bersamaan.

Pada kondisi hubung singkat, tegangan terminal (V_t) = 0 dan arus jangkar sama dengan arus hubung singkat ($I_A = I_{sc} = I$), sehingga dapat dirumuskan :

$$E_0 = IR_A = jIX_s \dots\dots\dots (2-3)$$



Gambar 2.7 Kurva Karakteristik Hubung Singkat

2.5 Paralel Generator

Jika beban pada suatu pusat pembangkit menjadi sedemikian besar, maka perlu penambahan generator lain secara paralel untuk menaikkan penyediaan daya dari pusat pembangkit tersebut. Selain itu paralel generator dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada generator yang harus dikeluarkan dari jaringan karena ada gangguan ataupun perbaikan.

Dalam melakukan paralel generator, maka harus memenuhi syarat sebagai berikut :

1. Tegangan harus sama

Tegangan antar terminal generator yang diparalelkan harus sama. Untuk menyamakannya, tegangan generator tersebut diatur dengan cara mengubah

arus eksitasi. Apabila tegangan generator lebih tinggi dari tegangan sistem jaringan, maka generator akan mengalami sentakan beban MVAR lagging (induktif). Dalam hal ini generator mengirim daya reaktif ke sistem jaringan. Sebaliknya, apabila tegangan generator lebih rendah daripada tegangan sistem jaringan, generator akan mengalami sentakan beban MVAR leading (kapasitif). Dalam hal ini menyerap daya reaktif dari sistem jaringan.

2. Frekuensi harus sama

Frekuensi harus dijaga tetap konstan, frekuensi generator dan frekuensi sistem jaringan harus memiliki nilai yang sama. Untuk menyamakan, frekuensi generator dapat diatur dengan cara mengatur pembukaan governor valve. Apabila frekuensi generator lebih tinggi dari frekuensi sistem jaringan, daya yang disuplai generator berpolaritas positif dan generator menyuplai daya MW ke sistem. Sebaliknya, apabila frekuensi generator lebih rendah dari frekuensi sistem jaringan, daya yang disuplai generator berpolaritas negatif atau generator bertindak sebagai motor. Oleh karena itu, untuk memastikan bahwa generator menyuplai daya dan bukan mengkonsumsi, frekuensi generator diatur lebih tinggi daripada frekuensi sistem. Namun, kebanyakan generator memiliki sistem proteksi yang akan mentripkan generator apabila terjadi daya balik (generator berperan sebagai motor). Jika generator mulai mengkonsumsi daya, hubungan generator dengan sistem akan segera diputus.

3. Sudut fasa dan urutan fasa harus sama

Untuk memonitor dan mengamati beda fasa ini, digunakan frekuensi meter atau sinkonoskope. Sedangkan untuk mengamati urutan fasa incoming generator dan urutan fasa busbar melalui alat indikator urutan fasa.

2.6 AVR (Automatic Voltage Regulator)

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

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

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

2.7 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi mempunyai fungsi dasar yaitu untuk memberikan arus searah sebagai arus penguatan pada kumparan medan generator, sehingga timbul tegangan induksi pada bagian stator generator. Fungsi lainnya adalah melakukan fungsi penting dalam melakukan pengontrolan terhadap tegangan generator dan aliran daya reaktif dalam meningkatkan kestabilan sistem, sedangkan fungsi pengamanan adalah untuk menjamin agar generator dan sistem eksitasi tidak melebihi dari batas kemampuannya yang dapat menyebabkan kerusakan pada salah satu atau keduanya. Oleh karena itu, eksitasi harus mempunyai respon tinggi apabila terjadi gangguan, sehingga sistem tetap stabil.

Sistem eksitasi yang beroperasi pada generator sinkron yang beroperasi sendiri pada dasarnya berfungsi sebagai pengaturan tegangan keluaran generator sinkron, dengan cara mengatur besar kecilnya arus eksitasi yang akan diberikan kepada generator. Arus eksitasi yang akan menentukan kuat medan magnet didalam generator, umumnya arus eksitasi dialirkan melalui belitan medan (field winding) yang terletak pada rotor generator.

2.8 Faktor Yang Mempengaruhi Pemanasan

Suhu kerja dari suatu generator sangat erat hubungannya dengan usia, karena keausan dari isolasinya merupakan fungsi waktu dan suhu. Keausan merupakan gejala kimiawi yang melibatkan adanya oksidasi lambat dan pengerapuhan yang menyebabkan terjadinya penyusutan mekanis dan kekuatan listrik. Kenaikan suhu juga disebabkan oleh rugi-rugi yang merupakan faktor

utama dalam menentukan usia pada generator. Oleh sebab itu, pemanasan pada generator harus dibatasi dan tidak boleh melampaui batas-batas yang telah ditentukan agar usia generator menjadi panjang.

2.9 Efisiensi

Dalam mengkonversikan energi mekanis menjadi energi, generator mengalami kehilangan daya (losses). Hal berkaitan dengan efisiensi masing-masing generator. Efisiensi generator dapat dituliskan dengan rumus :

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2-4)$$

Keterangan :

P_{in} = daya masukan (watt)

P_{out} = daya keluaran (watt)

2.10 Kurva Kapabilitas Generator

Kurva kapabilitas generator digunakan untuk menggambarkan kemampuan dari sebuah generator dalam menyalurkan daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVAR) ke jaringan.

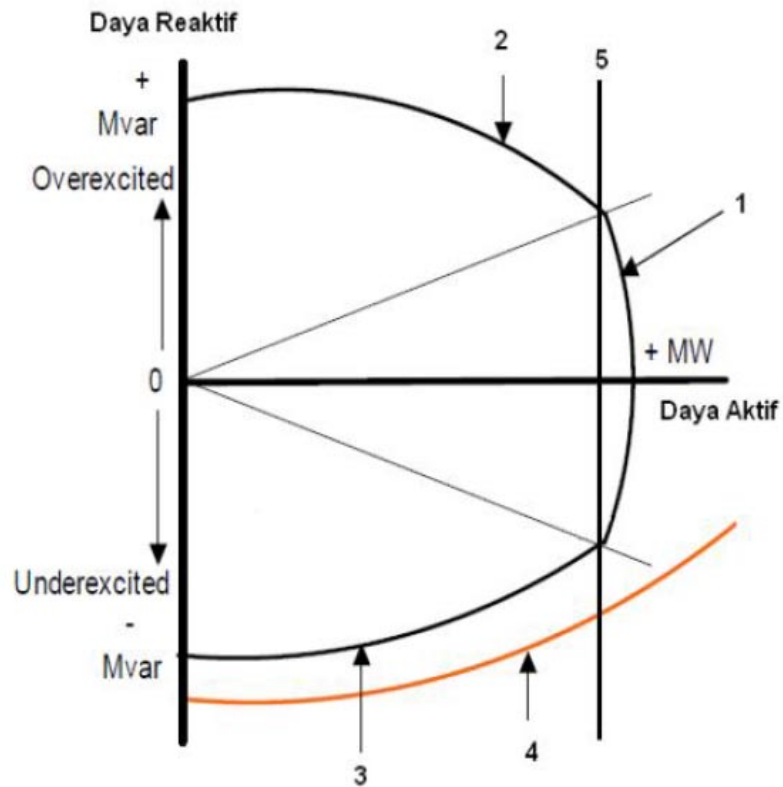
Generator sinkron memiliki keluaran maksimum daya semu (MVA) pada tegangan dan faktor daya tertentu yang dapat dipikul secara terus menerus tanpa mengalami pemanasan yang berlebihan.

Keluaran daya aktif dibatasi oleh kemampuan penggerak mula. Sedangkan, kemampuan keluaran daya reaktif dibatasi oleh empat faktor yaitu :

1. Batas pemanasan kumparan stator
2. Batas pemanasan kumparan rotor
3. Batas pemanasan ujung inti stator
4. Batas stabilitas

Dengan memperhitungkan faktor pemanasan pada kumparan jangkar dan kumparan medan dari suatu generator, maka harus diketahui secara tepat batas kemampuan operasi dari generator itu sendiri sehingga generator dapat dioperasikan dalam keadaan optimal dan tingkat keandalan yang tinggi. Keputusan yang diambil untuk menentukan batas maksimum kemampuan generator didasarkan pada perhitungan didalam kurva kapabilitas generator (generator capability curve), yaitu diagram kemampuan generator sinkron.

Dibawah ini adalah contoh gambar kurva kapabilitas generator :



Gambar 2.8 Kurva Kapabilitas Generator Sinkron

Keterangan :

- 1 = batas pemanasan kumparan stator
- 2 = batas pemanasan kumparan rotor
- 3 = batas pemanasan ujung inti stator
- 4 = batas steady state
- 5 = batasan daya penggerak mula

2.10.1 Batas Pemanasan Kumparan Stator

Arus jangkar menghasilkan rugi daya I^2R . Oleh karena itu, arus stator dibatasi oleh temperatur maksimum yang diizinkan untuk tipe material bahan isolasi yang digunakan.

Temperatur kumparan akan bergantung pada arus stator yang mengalir melalui kumparan stator tersebut, dengan anggapan bahwa temperatur masuk pendingin kumparan stator dan laju aliran pendingin konstan.

Oleh karena itu, pabrik menetapkan arus stator maksimum yang diizinkan dan hal ini berhubungan dengan temperatur maksimum yang diizinkan untuk kelas isolasi yang digunakan.

Jika generator dioperasikan dengan mengalirkan arus stator dengan nilai maksimum pada tegangan terminal generator maka nilai Daya Semu (MVA) maksimum operasi kontinyu tercapai.

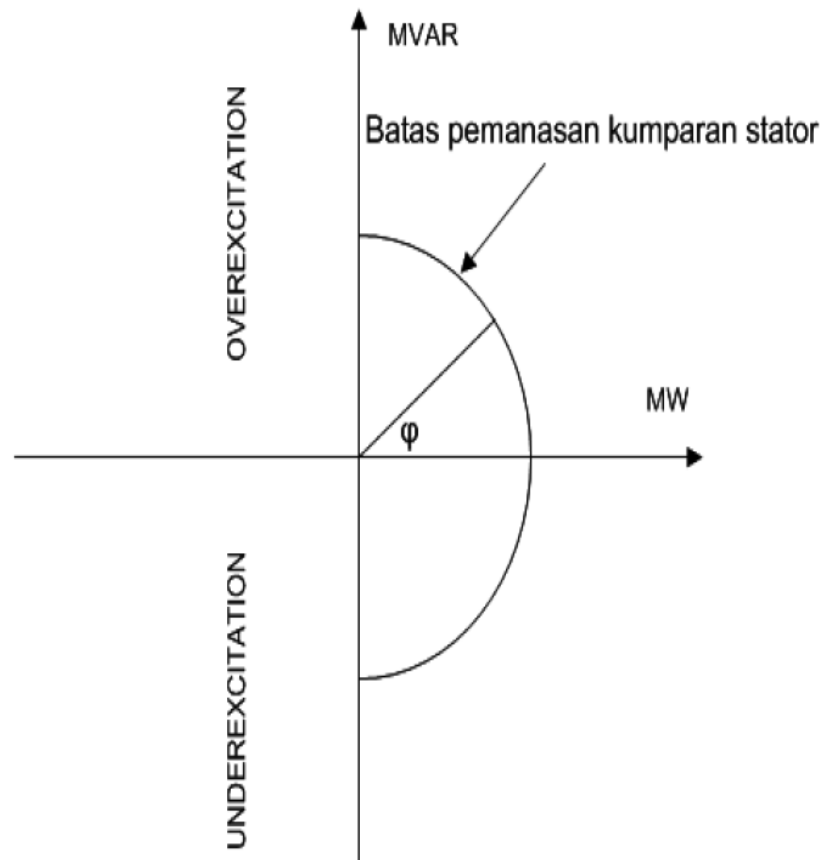
$$S = P + jQ \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan :

S = Daya Semu [MVA]

P = Daya Aktif [MW]

Q = Daya Reaktif [MVAR]



Gambar 2.9 Batas Pemanasan Kumparn Stator

2.10.2 Batas Pemanasan Kumparan Rotor

Arus medan adalah penentuan kedua pada operasi generator karena pemanasan yang dihasilkan dari rugi daya adalah $R_f I_f^2$. Batas ini ditentukan oleh tipe dan klasifikasi isolasi kumparan rotor.

Temperatur isolasi yang melebihi maksimum temperaturnya dapat membuat isolasi kumparan rusak karena panas sehingga memperpendek umur mesin yang akhirnya menimbulkan kerusakan. Oleh karena itu, temperatur operasi

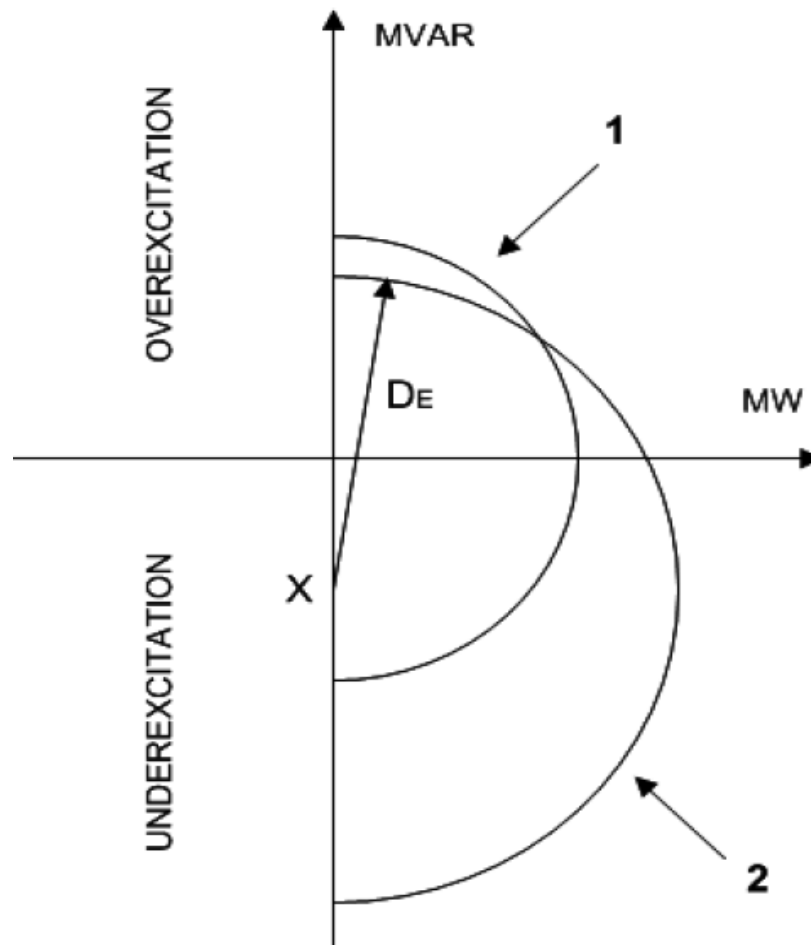
normal maksimum harus dibatasi pada suatu nilai yang akan mencegah menurunnya kemampuan. Kenaikan temperatur rotor maksimum pada generator tertentu ditentukan oleh tipe metode pendingin rotor dan susunan aliran pendingin rotor dan berdasarkan juga pada temperatur pendingin sisi dingin yang ditetapkan pada generator.

Jika temperatur gas dingin serta tekanan dan kecepatan aliran dianggap konstan, maka temperatur rotor hanya tergantung pada besarnya arus medan (I_f). Arus medan maksimum yang diizinkan biasanya ditentukan oleh pabrik dan hal ini berhubungan dengan batas temperatur rotor maksimum yang diizinkan untuk tipe isolasi yang digunakan.

- Daya nyata : $P = 3.V_{\text{fasa}} \cdot I_A \cdot \cos \varphi$ [MW]

- Daya reaktif : $Q = 3.V_{\text{fasa}} \cdot I_A \cdot \sin \varphi$ [MVAR]

- Daya semu : $S = 3.V_{\text{fasa}} \cdot I_A$ [MVA]



Gambar 2.10 Batas Pemanasan Kumparan Rotor

Keterangan :

- 1 = batas pemanasan kumparan stator
- 2 = batas pemanasan kumparan rotor
- X = titik tengah lingkaran arus medan maksimum
- D_E = jari-jari lingkaran arus medan maksimum

Jari-jari lingkaran arus medan maksimum :

$$D_E = \frac{3E_A \cdot V_{fasa}}{X_s} \dots\dots\dots (2-6)$$

Keterangan :

V_{fasa} = tegangan fasa

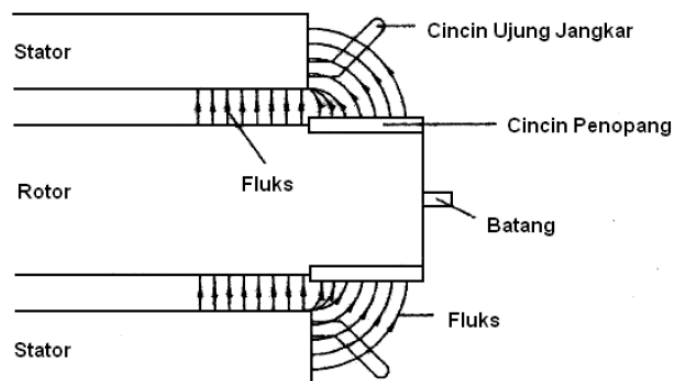
E_A = tegangan yang diinduksikan

X_s = reaktansi generator

Titik tengah lingkaran arus medan maksimum :

$$X = - \frac{3 \cdot V_{fasa}^2}{X_s} \dots\dots\dots (2-7)$$

2.9.3 Batas Pemanasan Ujung Inti Stator



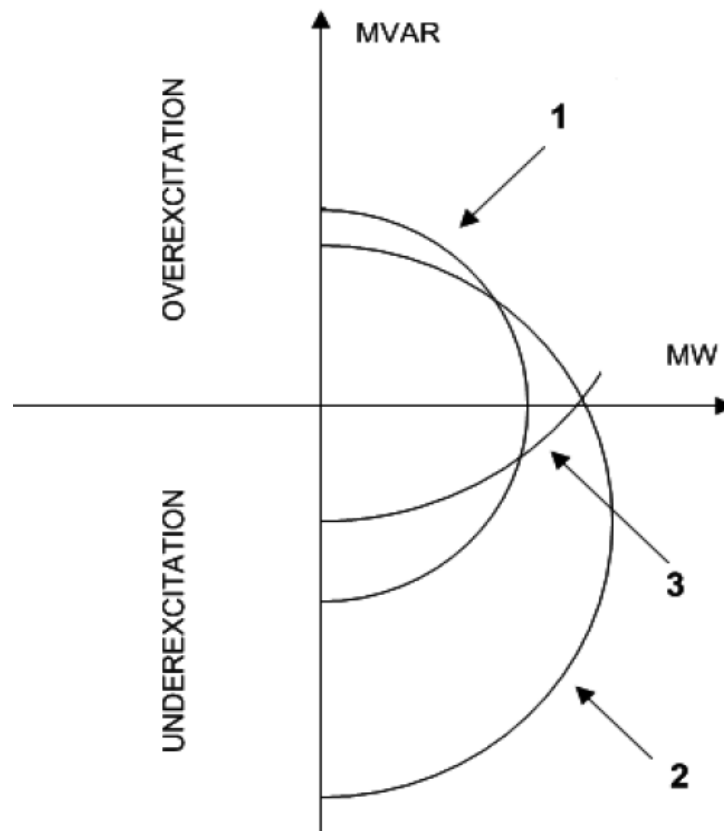
Gambar 2.11 Skematik Daerah Ujung Lilitan (End-Run Region) Generator

Pemanasan yang terpusat didaerah ujung stator menentukan batas ketiga pada operasi mesin sinkron. Seperti yang akan dijelaskan akan dijelaskan berikut, batas ini mempengaruhi kemampuan mesin pada kondisi penguatan kurang (underexcited condition).

Seperti pada gambar 2.11 diatas, fluks bocor ujung lilitan keluar dan masukan tegak lurus dengan lapisan stator. Hal ini disebabkan oleh arus pusar (eddy current) pada lapisan stator yang menghasilkan pemanasan yang terpusat didaerah ujung. Arus medan yang besar sesuai dengan kondisi eksitasi berlebih (overexcited) menyebabkan cincin penopang (retaining ring) jenuh, sehingga nilai fluks bocor kecil. Sebaliknya, pada kondisi penguatan kurang (underexcited), arus medannya kecil dan cincin penopang tidak jenuh sehingga terjadi kenaikan fluks bocor ujung stator. Hal ini terjadi beban bersifat kapasitif yang dapat mengakibatkan terjadinya pemanasan ujung stator.

Batas pemanasan ujung inti stator biasanya dicapai jika batas kestabilan dilampaui. Jika kondisi operasi berada dalam kondisi normal maka batas pemanasan ujung inti stator tidak tercapai.

Jika kondisi pemanasan ujung inti stator tercapai maka penggambaran dalam kurva kapabilitas adalah sebagai berikut :



Gambar 2.12 Batas Pemanasan Ujung Inti Stator

Keterangan :

- 1 = batas pemanasan kumparan stator
- 2 = batas pemanasan kumparan rotor
- 3 = batas pemanasan ujung inti stator

2.9.4 Batas Steady State

Batas stabilitas keadaan mantap menggambarkan kemampuan generator untuk menyesuaikan terhadap perubahan beban yang bertahap. Generator harus

dioperasikan dengan arus rotor yang cukup untuk menjaga kestabilan genertor pada semua beban operasi.

Kurva steady state memiliki titik pusat di :

$$C_{ss} = \frac{V^2}{2} \times \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

Dengan jari-jari :

$$R_{ss} = \frac{V^2}{2} \times \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_s} \right) \dots\dots\dots (2-9)$$

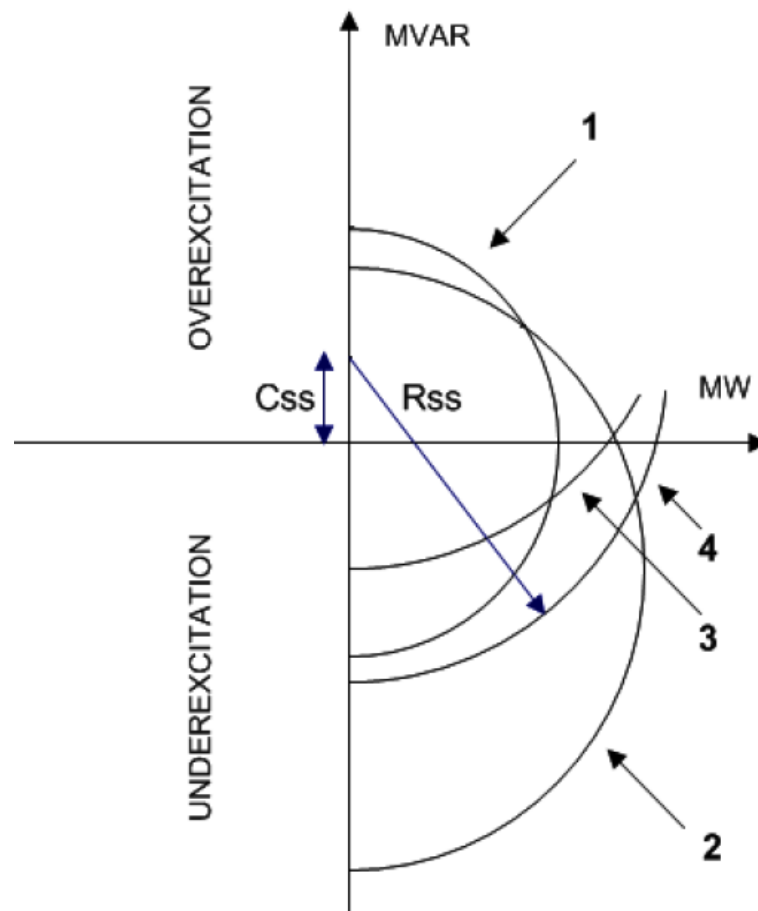
Keterangan :

X_e = reaktansi luar sistem ke generator

$$= X_{trafo} + X_{sistem}$$

X_s = reaktansi generator

Lihat pada gambar 2.13 menunjukan batas kestabilas generator dalam keadaan mantap seperti berikut ini :



Gambar 2.13 Batas Steady State

Keterangan :

- 1 = batas pemanasan kumparan stator
- 2 = batas pemanasan kumparan rotor
- 3 = batas pemanasan ujung inti stator
- 4 = batas steady state

C_{ss} = center

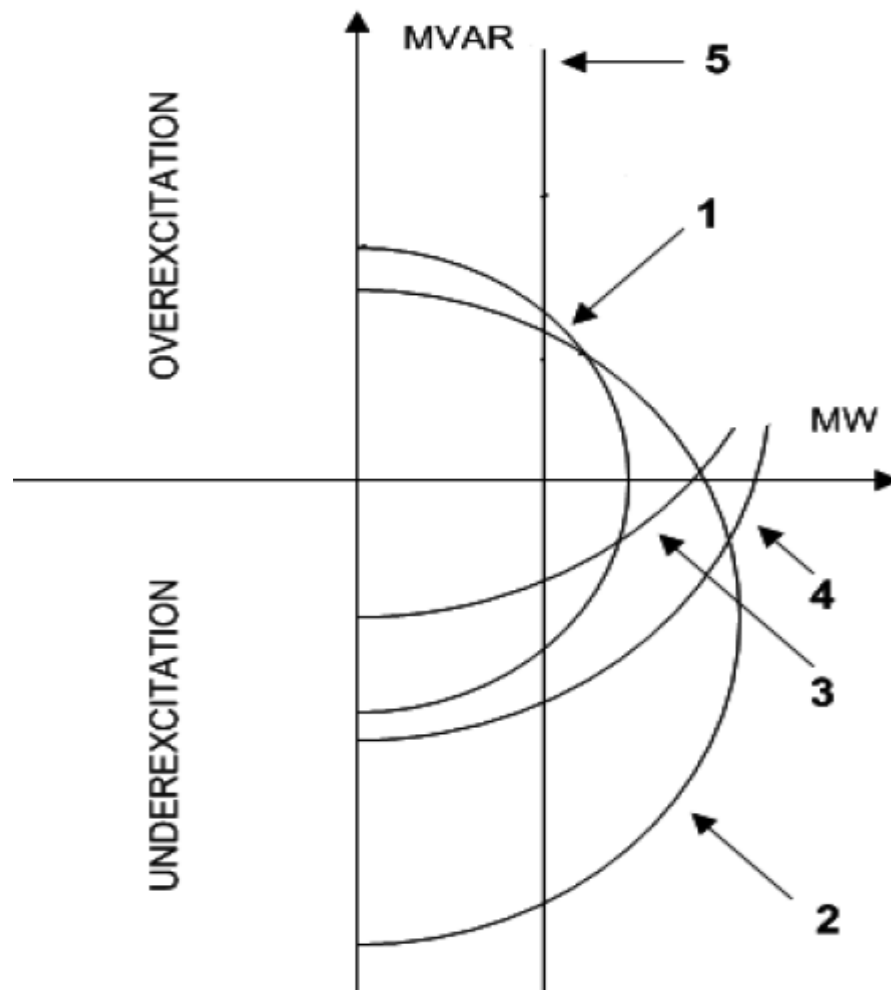
R_{ss} = radius

2.10.5 Batas Daya Penggerak Mula

Diketahui bahwa keluaran daya reaktif generator dibatasi oleh empat faktor, yaitu :

1. Batas pemanasan kumparan stator
2. Batas pemanasan kumparan rotor
3. Batas pemanasan ujung inti stator
4. Batas steady state

Selain empat batasan yang telah disebutkan diatas, terdapat batasan lain yang membatasi terhadap keluaran daya aktif dari generator, yaitu batas penggerak mula, batas penggerak mula ini biasanya ditentukan oleh pabrikan dan diatur oleh operator, sesuai dengan ketentuannya.



Gambar 2.14 Batas Daya Penggerak Mula

Keterangan :

- 1 = batas pemanasan kumparan stator
- 2 = batas pemanasan kumparan rotor
- 3 = batas pemanasan ujung inti stator
- 4 = batas steady state
- 5 = batasan daya penggerak mula

Contoh soal kurva kapabilitas dalam bentuk satuan PU :

Sebuah generator sinkron dengan data pabrikan daya = 980 KVA, faktor daya PF = 0,85, reaktansi sinkron $X_s = 1,78$ PU, tegangan tertinggi 1,89, tegangan terminal = 1 PU, sudut beban δ dan reaktansi luar sistem = 0,4 PU. Tentukan kondisi stabilitas sebagai batas operasi pada faktor daya leading.

Diketahui :

$$S = 980 \text{ KVA}$$

$$PF = 0,85$$

$$V_t = 1 \text{ PU}$$

$$X_s = 1,78 \text{ PU}$$

$$X_e = 0,4 \text{ PU}$$

Jawaban :

Pada arus maknetisasi maksimum yang merupakan lingkaran dengan pusat

O_F :

$$\begin{aligned} O_F &= -j\sqrt{3} \times \frac{V^2}{X_s} \\ &= -j\sqrt{3} \times \frac{1^2}{1,78} = -j0,973 \text{ PU} \end{aligned}$$

Jari - jari maksimum arus medan :

$$R_F = \sqrt{3} \times \frac{V \times E_{mak}}{X_s}$$

$$= \sqrt{3} \times \frac{1 \times 1,85}{1,78}$$

$$= 1,8 \text{ PU}$$

Kurva stabilitas dinyatakan dengan pusat C_{ss}

$$C_{ss} = \frac{V^2}{2} \times \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right)$$

$$= \frac{1^2}{2} \times \left(\frac{1}{0,4} - \frac{1}{1,78} \right)$$

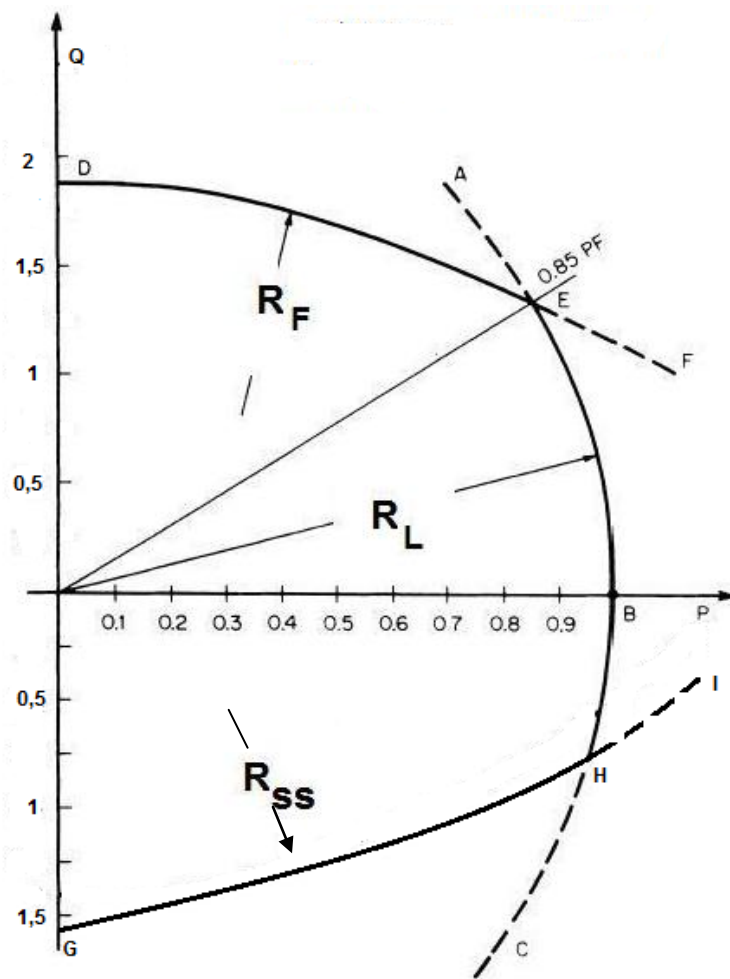
$$= 0,969 \text{ PU}$$

$$R_{ss} = \frac{V^2}{2} \times \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_s} \right)$$

$$= \frac{1^2}{2} \times \left(\frac{1}{0,4} - \frac{1}{1,78} \right)$$

$$= 1,53 \text{ PU}$$

Dibawah ini bentuk dari kurva kapabilitas generator dalam satuan PU
berikut ini adalah gambarnya :



Gambar 2.15 Kurva Kapabilitas Dalam Satuan PU

Keterangan :

O_F = Pusat lingkaran arus medan

R_F = Jari - jari maksimum arus medan

Contoh soal dalam satuan KVA

Generator sinkron 480 volt, power faktor 0,8, frekuensi 50 Hz, 50 KVA, reaktansi sinkron 1 ohm, digerakan penggerak mula 45 KW dengan rugi - rugi gesekan dan angin 1,5 KW, rugi - rugi inti 1,0 KW

Diketahui : Tegangan terminal (V_T) = 480 volt

Frekuensi (F) = 50 Hz

Reaktansi (X_s) = 1 ohm

Power Faktor (PF) = 0,8

Daya Semu (S) = 50 KVA

Jawaban :

$$I_{A \text{ mak}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_T} \times (0,8 - i \times \sqrt{1 - 0,8^2})$$

$$I_{A \text{ mak}} = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 480} \times (0,8 - i \times \sqrt{1 - 0,8^2})$$

$$I_{A \text{ mak}} = 60.141 \times (0,8 - i \times \sqrt{1 - 0,8^2})$$

$$= 48.112 - i36.084$$

Tegangan tertinggi stator yang diizinkan :

$$V_{\text{fasa}} = \frac{V_T}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\text{fasa}} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277.128$$

Maka :

$$E_A = V_{\text{fasa}} + X_s \times I_{\text{mak}}$$

$$= 277.128 + (1 - \sqrt{-1}) \times (48.112 - i36.084)$$

$$= 313.212 + i48.112$$

$$|E_A| = 316.886 \quad \text{volt}$$

Besar arus magnetisasi maksimum dalam KVA

$$D_E = 3 \times |E_A| \times \frac{V_{fasa}}{|X_s \times 1000|} = 3 \times 316,886 \times \frac{5000}{|1 \times 1000|}$$

$$D_E = 263,454 \text{ KVA}$$

Titik pusat O_F :

$$\begin{aligned} O_F &= - \frac{3 \times V_{fasa}^2}{X_s \times 1000} \\ &= - \frac{3 \times 277,128^2}{1 \times 1000} \\ &= -230,39 \end{aligned}$$

$$\text{Output daya nyata generator} = 45 - 1,5 - 1 = 42,5 \text{ KW}$$

Jika arusnya 56 amper PF = 0,7

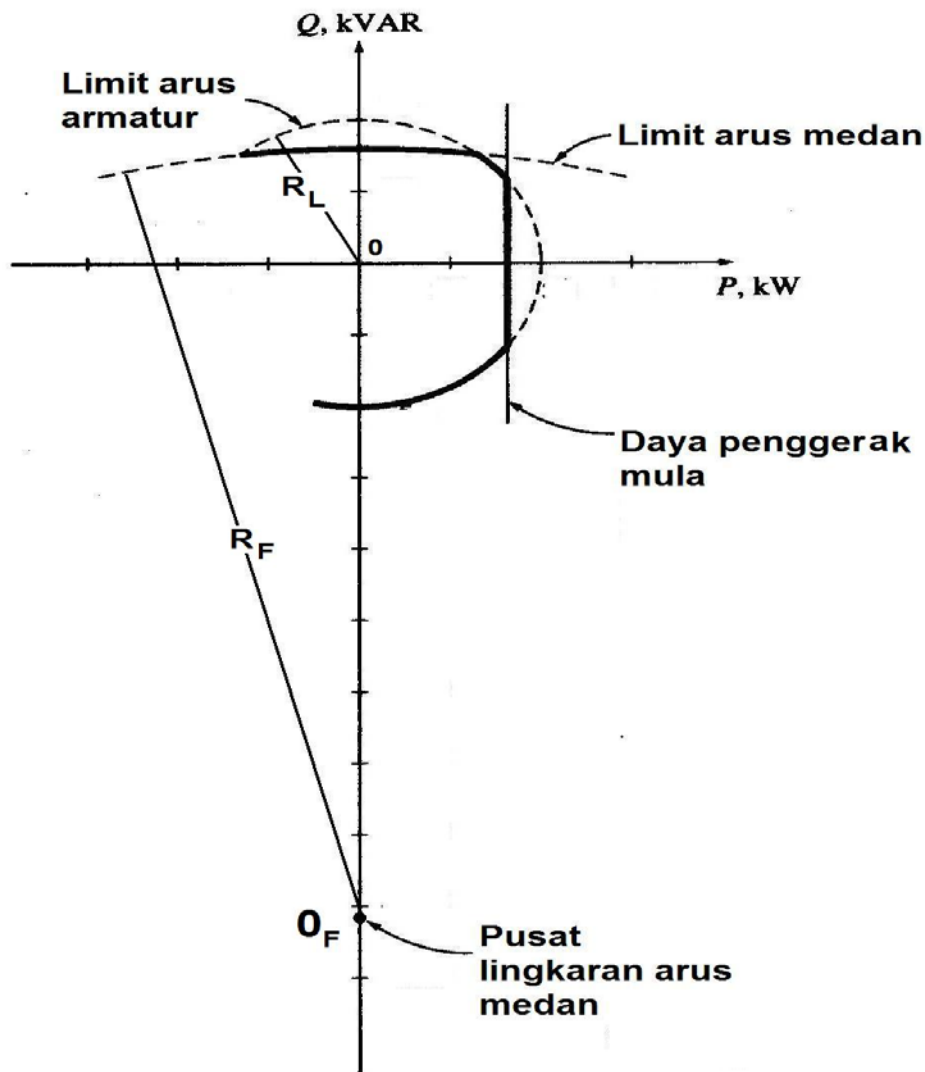
$$\begin{aligned} S &= 56 \times 3 \times \frac{V_t}{\sqrt{3}} \\ &= 56 \times 3 \times \frac{480}{\sqrt{3}} \\ &= 46,557 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Jika dalam daya nyata (P) :

$$\begin{aligned} P &= S \times \text{PF} \\ &= 46,557 \times 0.7 \end{aligned}$$

$$= 32,589 \text{ kW}$$

Dibawah ini bentuk kurva kapabilitas dalam satuan KVA :



Gambar 2.16 Kurva Kapabilitas Dalam Satuan KVA

Keterangan :

$I_{A \text{ mak}}$ = arus maksimum stator

V_{fasa} = tegangan fasa

V_t = tegangan terminal

D_E = arus maksimum magnetisasi

E_A = tegangan tertinggi stator yang diizinkan

O_F = pusat lingkaran arus medan

X_s = reaktans sinkron

R_L = Batas arus jangkar

2.11 Sistem Pendinggin Generator

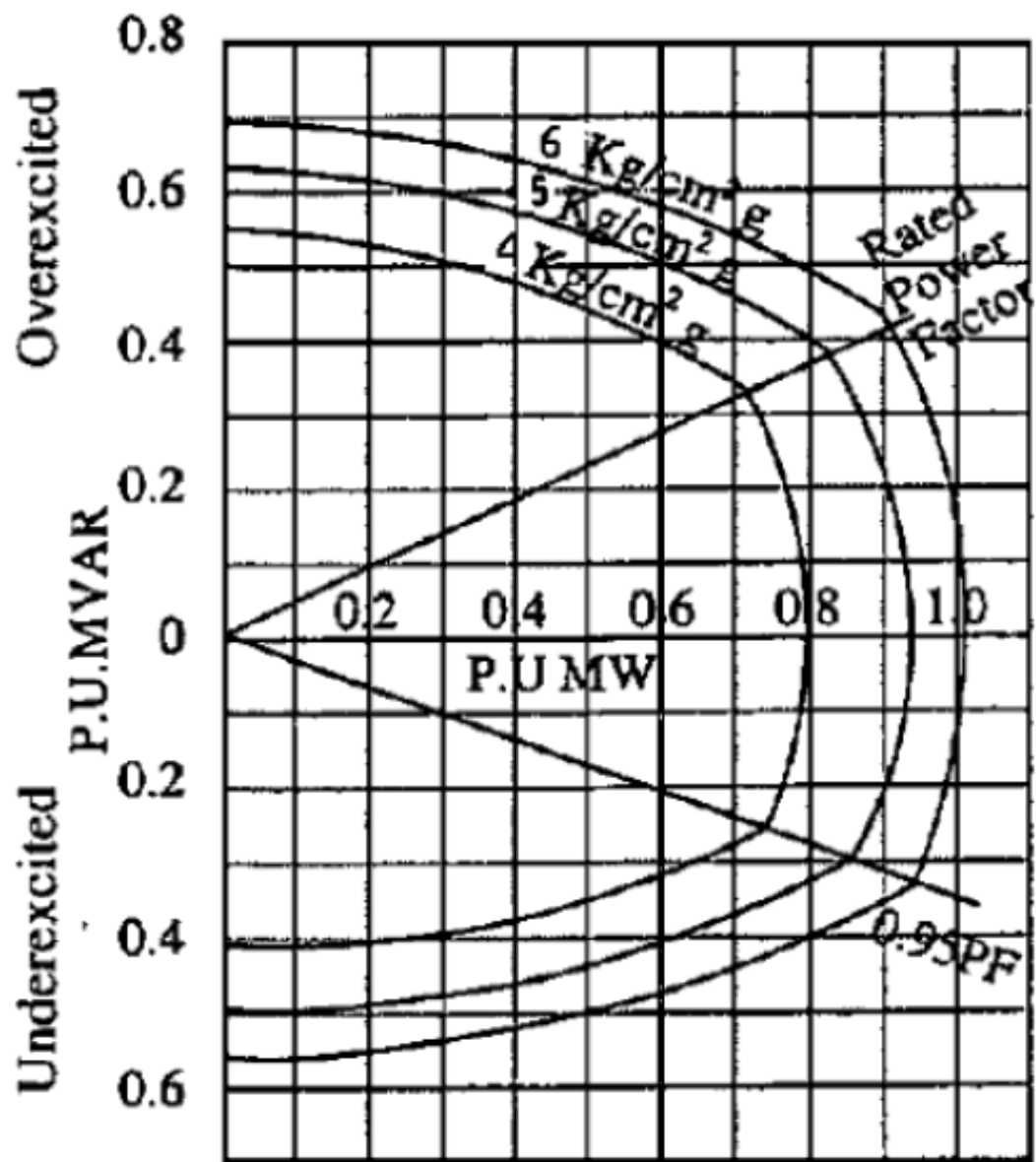
Pada generator dengan kapasitas besar, umumnya digunakan pendinggin dengan menggunakan media gas hidrogen atau helium. Tetapi, karena helium sulit diperoleh dan kurang ekonomis maka digunakan hidrogen.

Penggunaan hidrogen sebagai media gas pendingin memiliki kelemahan yaitu pada campuran tertentu dengan udara sekitar 4% - 70%, hidrogen tersebut akan bersifat eksplosif.

Walaupun memiliki kelemahan, hidrogen memiliki sifat-sifat yang baik untuk digunakan sebagai media gas pendinggin, antara lain :

1. Kerapatan kira-kira hanya 0,07 kali kerapatan udara pada suhu dan tekanan yang sama.
2. Panas spesifik pada berat yang sama adalah sekitar 14,5 kali dari udara. Hal ini berarti bahwa pada suhu dan tekanan yang sama, hidrogen dan udara kira-kira sama efektif dalam kapasitas penyimpanan panas setiap satuan volume. Tetapi pemindahan panas dengan konversi dorongan antara bagian-bagian panas pada mesin dan gas pendingin lebih besar dengan hidrogen dari pada dengan udara.
3. Umur dari isolasi bertambah besar dan biaya pemeliharaan berkurang karena tidak adanya debu, kelembaban dan oksigen.
4. Bahaya api diperkecil karena suatu campuran hidrogen-udara tidak akan meledak jika hidrogen yang dikandung adalah di atas sekitar 70%.

Tekanan gas hidrogen dapat diubah besar nilai tekanannya, hal tersebut disesuaikan dengan beban operasi generator. Semakin besar nilai tekanan hidrogen maka semakin besar kurva kapabilitas generator. Artinya, kemampuan generator juga ikut bertambah besar. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.17 Perubahan Nilai Tekanan Hindrogen Pada Kurva Kapabilitas