

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penyusun berpedoman pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, beberapa referensinya antara lain:

Aryanto. Adhi (2017) *Analisis Pengaruh Beban Terhadap Kinerja Generator Qfsn-300-2-20b*. Diperoleh kesimpulan bahwa Pengaruh perubahan beban akan mempengaruhi arus eksitasi dan faktor daya. Apabila beban meningkat maka arus eksitasi naik dan $\cos \phi$ turun. Pada generator dengan sistem eksitasi, besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan besar medan magnet di dalamnya, sedangkan besar medan magnet ini sebanding dengan besar arus eksitasi yang dibangkitkan. Maka, jika arus eksitasi sama dengan nol, maka tegangan listrik juga sama dengan nol.

Dwi Istiawan. Danis (2018) *Analisis Generator Tenaga Uap Terhadap Pemenuhan Kebutuhan Listrik Di Pt. Madubaru Yogyakarta* . Menyimpulkan Faktor penghambat dari penggunaan generator tenaga uap di PT. Madubaru antara lain frekuensi pada generator sering menurun karena tekanan uap yang tidak stabil dan beban motor pada alat produksi yang mempunyai kapasitas besar menyala secara bersamaan menyebabkan pemakaian daya meningkat.

Septiawan. Dwi (2017) *Studi Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron Di Pembangkit Listrik Tenaga Air (Plta) Musi Bengkulu*. Menyimpulkan Perubahan beban pada jaringan akan menyebabkan perubahan arus eksitasi juga. Ketika beban

jaringan naik, maka tegangan *output* generator akan turun. Untuk mencegah terjadinya kondisi *under excitation*, maka arus eksitasi harus dinaikkan. Dan sebaliknya, ketika beban jaringan turun dan mengakibatkan tegangan *output* generator juga akan naik. Sehingga pada kondisi ini arus eksitasi harus diturunkan agar tidak terjadi kondisi *over excitation*. Kondisi *under excitation* dan *over excitation* akan menyebabkan kerusakan pada generator tersebut, sehingga dengan memahami karakteristik sistem eksitasi generator sinkron hal tersebut dapat diminimalisir dan dicegah.

Reviyanto. Aditya (2007) *Automatic Voltage Regulator Generator Sinkron 3 Fasa Menggunakan Metode Hysteresis*. Diperoleh kesimpulan bahwa sensor tegangan dapat mendeteksi perubahan tegangan pada terminal keluaran generator jika kecepatan turbin variable dan jika pada terminal *output* dari generator mengalami pertambahan atau pengurangan beban.

Syahputra. Ramadoni, Soesanti. Indah (2015) *Analisis Performa Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Generator Sinkron Magnet Permanen 2 Kw Berputaran Rendah*. Diperoleh kesimpulan bahwa Dalam riset ini telah dirancang-bangun dan diujicoba pembangkit listrik tenaga angin (PLT Angin) berkapasitas maksimum 2 kW. Pengujian dilakukan pada tanggal 5 dan 6 September 2015 di Pantai Baru, kecamatan Srandakan, kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil pengujian pada tanggal 5 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 12.40 WIB yaitu sebesar 768,96 watt, dengan laju angin yaitu 8,76 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator sebesar 40,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi

53,40 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 14,40 ampere. Pada kondisi ini PLT Angin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 38,4%. Selanjutnya hasil pengujian pada tanggal 6 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 10.50 WIB yaitu sebesar 842,20 watt, dengan laju angin yaitu 9,53 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator sebesar 39,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 49,60 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 17,00 ampere. Pada kondisi ini PLT Angin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 42,1%. Hasil riset ini menunjukkan bahwa PLT Angin merupakan solusi alternatif di wilayah pantai selatan Bantul DIY untuk penyediaan sumber energi terbarukan.

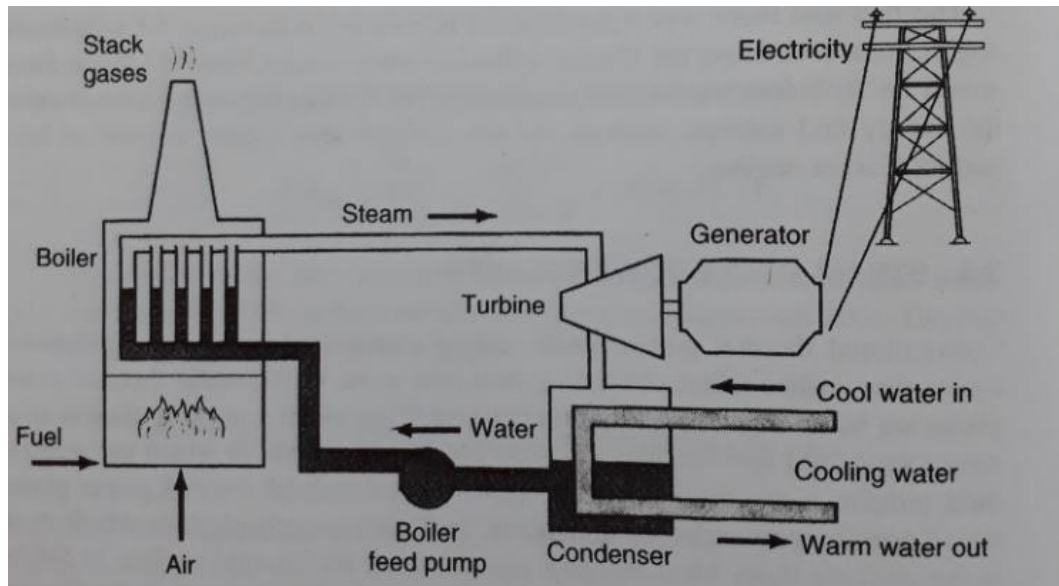
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Wakil, M. M. El (1992). Pembangkit uap (*Steam Generator*) merupakan gabungan yang kompleks dari ekonomisator, ketel uap pemanas lanjut, pemanas ulang, dan pemanas awal udara. Pembangkit uap paling mutakhir menghasilkan uap panas lanjut tekanan-tinggi (2400 samapai 2500 psia, 165 sampai 240 bar) kecuali pembangkit uap reaktor air bertekanan yang menghasilkan uap penuh dengan tekanan yang lebih rendah 1000psia dan 70 bar. Uap itu selesai dipakai dalam siklus Rankine. Pembangkit uap merupakan sumber-sumber energi yang jauh paling utama dalam pembangkit daya di dunia dewasa ini.

Masters, Gilbert M (2004) Dasar siklus uap terdapat pada bagian pembakaran, termasuk pembakaran dari bahan bakar fosil, reaksi fisi nuklir, atau

sinar matahari terkonsentrasi ke boiler. Inti dari pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar fosil digambarkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Steam Electric Power Plant
(Sumber: Masters, Gilbert M . 2004)

Dalam generator uap, bahan bakar dibakar di ruang tembak yang dilapisi oleh sebuah boiler yang memindahkan panas melalui pipa logam ke fluida kerja. Air yang bersirkulasi melalui boiler diubah menjadi uap bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Selama konversi kimia menjadi energi panas, kerugian pada siklus adalah 10% terjadi karena pembakaran yang tidak lengkap dan hilangnya panas ke atas tumpukan. Steam bertekanan tinggi diperbolehkan untuk memperluas melalui satu set roda turbin yang memutar turbin dan poros generator. Untuk kesederhanaan, turbin gambar 2.1 ditunjukkan sebagai satu unit, tetapi untuk peningkatan efisiensi mungkin sebenarnya terdiri dari dua atau tiga turbin di mana uap buang dari turbin bertekanan lebih tinggi dipanaskan kembali dan dikirim ke turbin bertekanan lebih rendah.

Generator dan turbin berbagi poros yang sama ke dalam tenaga listrik yang keluar ke jalur transmisi untuk distribusi. Turbin yang dirancang dengan baik mungkin memiliki efisiensi mendekati 90%, sedangkan generator mungkin memiliki efisiensi konversi bahkan bisa lebih tinggi dari itu.

Marsudi, Djiteng edisi 3 (2005). Perubahan aliran energi listrik terkadang tidak berjalan serentak antara sistem jaringan dan sistem pembangkit pada PLTU, sehingga selalu ada perubahan atau pengurangan salah satu bentuk "simpanan" energi.

Setiap bentuk energi ada tempat simpanannya yaitu:

1. Energi Listrik

Disimpan dalam generator dalam bentuk energi medan magnet dan energi medan listrik. Energi listrik didapat dari energi kinetis yang diterima oleh generator dan turbin kemudian oleh generator dikonversi menjadi energi listrik.

2. Energi Kinetis

Disimpan dalam bagian-bagian berputar diturbin dan generator.

3. Enthalpy

Disimpan dalam air dan uap yang bersirkulasi sebagai media pembawa energi sistem air dan uap, timbunan terbesar ada dalam drum ketel uap. Enthalpy uap dikonversi menjadi energi kinetis dalam turbin melalui proses adiabatik.

4. Energi Panas (kalor)

Disimpan sebagian besar diruang bakar ketel uap, Energi panas ini didapat sebagai hasil pembakaran bahan bakar yang dicampur udara dalam ruang bakar ketel uap. perpindahan energi panas yang terkandung dalam gas hasil pembakaran

dalam ruang bakar kedalam air ketel berlangsung melalui proses radiasi, konveksi dan konduksi diruang bakar melalui pipa-pipa air, di pemanas lanjut, diseconomiser serta pemanas udara.

5. Energi Bahan bakar (kimia)

Dalam keadaan gangguan yang berarti menghilangnya beban secara mendadak, maka energi listrik keluaran generator hilang secara mendadak karena PMT generator trip. Terjadi kenaikan simpanan energi listrik dalam generator, ini ditandai dengan naiknya tegangan generator. Pengatur tegangan otomatis generator bersama relay tegangan lebih mencegah kenaikan tekanan ini kalau perlu dengan men-trip sakelar arus medan magnet serta pembuangan medan magnet kedalam sebuah tahanan.

Kenaikan simpanan energi kinetis juga terjadi, hal ini ditandai dengan naiknya kecepatan perputaran dari bagian-bagian yang berputar pada generator turbin. Governor bersama relay putaran lebih (*overpeed relay*) bertugas mencegah kenaikan putaran ini, kalau perlu dengan menutup aliran uap. Dengan ditutupnya katup uap maka akan terjadi kenaikan simpanan enthalphy didalam drum ketel, hal ini ditandai dengan naiknya tekanan dan suhu uap.

Alat kontrol pengaman ketel bertugas mencegah kenaikan tekanan dan suhu uap berlebihan, kalau perlu dengan membuka katup keselamatan (*safety valve*) dari ketel hingga uap yang dibuang ke udara bebas.

Apabila gangguan yang terjadi didalam sistem adalah sedemikian rupa sehingga tegangan didalam PLTU juga hilang, maka timbul hal-hal yang membahayakan sebagai berikut:

1. Motor penggerak Kipas Udara KU tidak bekerja, sehingga gas hasil pembakaran yang ada dalam ruang bakar yang mengandung banyak kalori tidak dapat dikeluarkan dari ruang bakar dengan cepat. Hal ini berarti proses pemanasan didalam ketel uap masih tetap berlangsung walaupun aliran bahan bakar telah dihentikan. Proses pemanasan ini akan menaikkan suhu dari bagian bagian ketel termasuk suhu air dan uap yang ada dalam drum ketel.
2. Pompa pengisi air ketel PK tidak bekerja karena motor penggeraknya tidak menerima tegangan. Hal ini menyebabkan penurunan permukaan air dalam drum. Karena katup pengaman uap ketel terbuka sehingga berlangsung pembuangan uap sementara pembentukan uap berlangsung pembuangan uap sementara pembentukan uap berlangsung terus sehubungan uraian butir a tetapi tidak ada penambahan air ketel.
3. Pompa air pendingin PP yang mengalirkan air pendingin ke kondensor juga berhenti karena tidak ada tegangan bagi motor penggeraknya. Sementara uap yang sudah masuk kondensor tetap melepaskan kalori dan kalori ini tidak bisa dikeluarkan dari kondensor karena pompa air pendingin PP berhenti. Maka akan timbul kenaikan suhu dan tekanan didalam kondensornya yang akhirnya bisa memecahkan membran pengaman dari kondensor.
4. Poros turbin yang suhunya tinggi waktu turbin berhenti, suhunya akan menurun dan menyebabkan pemendekan poros. Ketika pemendekan ini berlangsung poros harus diputar karena perlahan-lahan, untuk menghindarkan pembengkokan. Pemutaran poros ini dilakukan oleh motor pemutar poros yang apabila tidak ada tegangan juga berhenti.

Bahaya-bahaya tersebut diatas harus diperhitungkan dalam perencanaan (*design*) PLTU dan dalam pengoprasian sistem tenaga listrik harus selalu diingat. Oleh karenanya pengiriman tegangan ke PLTU apabila terjadi gangguan merupakan prioritas utama dalam operasi. Uraian diatas juga menggambarkan mengapa PLTU memerlukan waktu start yang lama terutama karena proses pemanasan dan pembentukan uap memerlukan waktu beberapa jam dari kondisi dingin.

2.2.2 Generator

Badri, (2013). Generator adalah salah satu jenis mesin listrik yang digunakan sebagai alat pembangkit energi listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik dapat diperoleh dari energi penggerak seperti : mesin diesel, turbin, baling-baling dan lain-lain. Pada pembangkit pembangkit besar, salah satu alat konversi yang sering digunakan yaitu generator sinkron 3 phase.

Seluruh sistem operasi tenaga listrik akan terhenti apabila sistem pembangkit terganggu. Beberapa penyebab gangguan sistem pembangkit yaitu:

1. Gangguan generator pada bagian luar, yaitu gangguan yang terjadi dalam sistem bagian luar generator namun terhubung secara langsung terhadap generator.
2. Gangguan yang terjadi pada bagian dalam generator, yaitu gangguan yang terjadi pada bagian dalam generator seperti, kumparan, rotor, proteksi generator, sistem pendingin dan lain-lain.
3. Gangguan yang terjadi pada bagian mesin penggerak generator.

Apabila terdapat gangguan dari salah satu generator yang bekerja secara paralel, ada kemungkinan bahwa generator lain tidak mampu lagi memikul beban jaringan. Sehingga perhitungan yang cepat untuk mengukur besar beban sangat diperlukan untuk memutuskan salah satu atau beberapa beban jaringan agar diperoleh kestabilan beban jaringan. Proses pemutusan beban jaringan harus dilakukan otomatis dan dalam waktu yang sangat singkat.

2.2.3 Generator sinkron

Anderson P.M (1982). Disebut generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Generator sinkron menghasilkan kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang memiliki putaran dengan kecepatan yang sama terhadap putaran medan pada stator. Kumbaran rotor berfungsi sebagai pembangkit kumbaran medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh turbin, sehingga pada kumbaran rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar. Fluks akan memotong kumbaran stator, sehingga pada ujung-ujung kumbaran stator timbul gaya gerak listrik karena terpengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumbaran stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

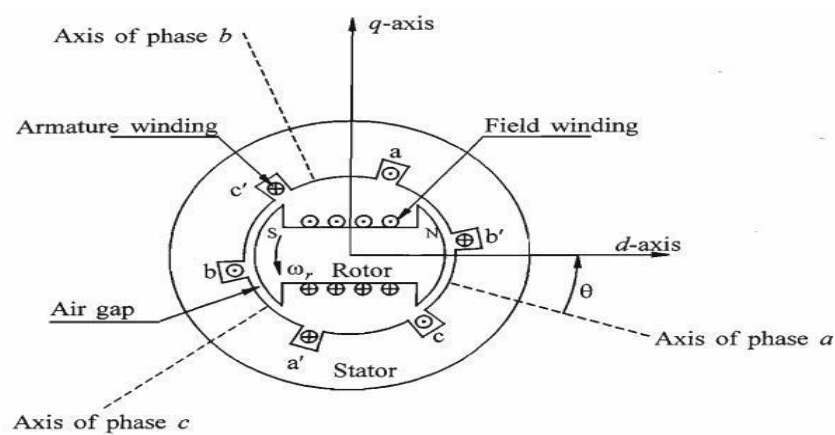
Riono, Yon (2002) Besar ggl induksi kumbaran stator atau ggl induksi dapat dirumuskan :

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot \frac{Z}{2} \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

E_a = Gaya gerak listrik armature per-phase (Volt)

- M = Jumlah kumparan per fasa
- K_d = Faktor distribusi.
- F = Frekuensi *output* generator (Hz)
- Z = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa
- Φ = Fluks magnet per kutub per-fasa.



Gambar 2.2 Skema diagram generator sinkron tiga fasa
(Sumber: Kundur Prabha,1993)

Pada gambar 2.2 menunjukkan bahwa pada generator sinkron, kumparan jangkar sering juga disebut kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.

2.2.4 Karakteristik Generator Sinkron

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

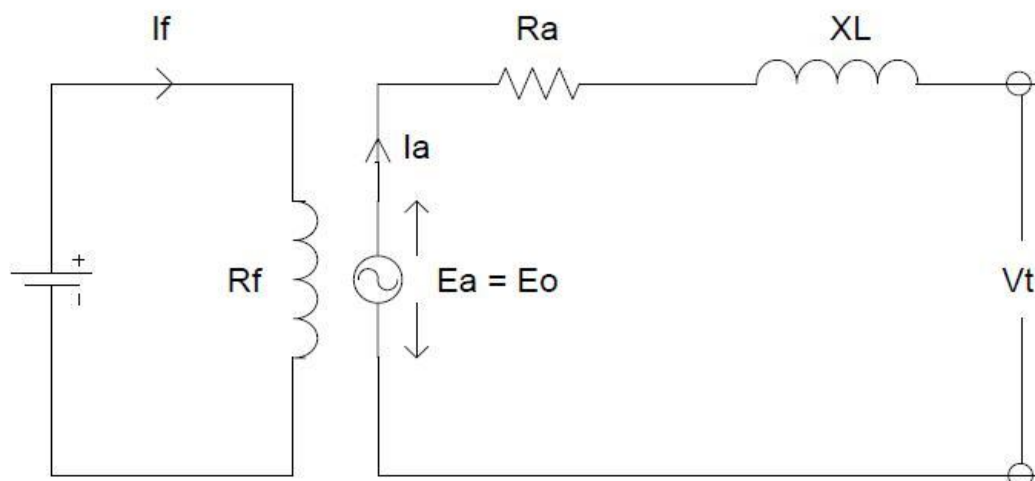
2.2.4.1 Generator Sinkron Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), pada generator sinkron tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature (I_a) = 0 . Dengan demikian besar tegangan adalah :

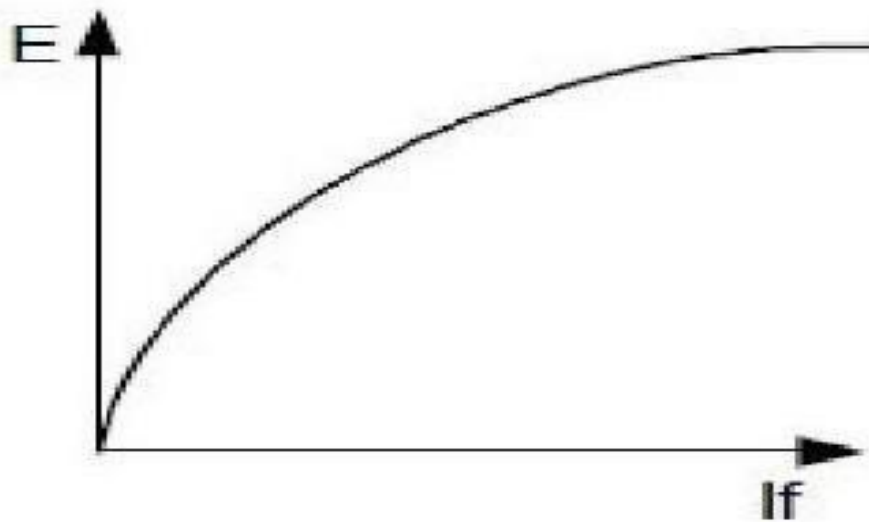
$$V_t = E_a = E_o \dots \dots \dots (2.2)$$

Oleh karena besar ggl armature adalah merupakan fungsi dari flux magnet, maka ggl armatur juga ditulis : $E_a = f(\Phi)$

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



Gambar 2.3 Rangkaian Listrik Generator Sinkron Tanpa Beban
(Sumber: Anonim 2007)



Gambar 2.4. Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban
(Sumber: Anonim 2007)

Keterangan :

E_a = Gaya gerak listrik

I_f = Arus kumparan medan atau arus penguat

X_L = Reaktansi bocor (reaktansi armatur)

R_a = Hambatan armatur

V_t = Tegangan *output*

R_f = Hambatan kumparan medan

2.2.4.2 Generator Sinkron Berbeban

Adapun jenis sifat beban pada generator yaitu:

1. Beban Induktif

Beban induktif muncul karena adanya lilitan atau kumparan yang terdapat pada peralatan listrik seperti motor, trafo, dan relay. Lilitan dibutuhkan oleh alat-alat listrik untuk menciptakan medan magnet. Pembangkitan medan magnet pada lilitan menjadi beban induktif pada rangkaian arus listrik AC. Jika beban generator

bersifat induktif maka yang akan terjadi adalah penurunan tegangan dan faktor daya yang cukup besar.

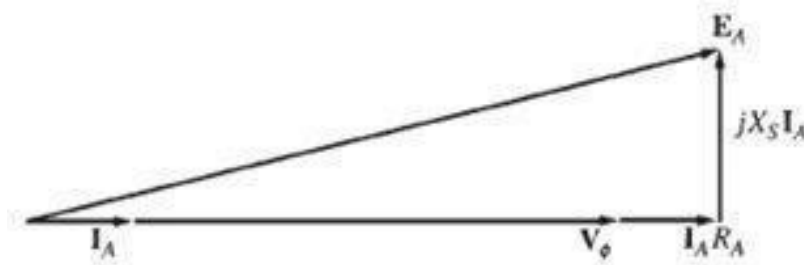
2. Beban Resitif

Beban resistif adalah beban yang terdiri dari komponen tahanan saja. Beban ini hanya mengkonsumsi daya aktif dan memiliki faktor daya sama dengan 1. Arus dan tegangannya memiliki fasa yang sama.

3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif merupakan kebalikan dari beban induktif. Jika beban induktif menghalangi terjadinya perubahan nilai arus listrik AC, maka beban kapasitif bersifat menghalangi terjadinya perubahan nilai tegangan listrik.

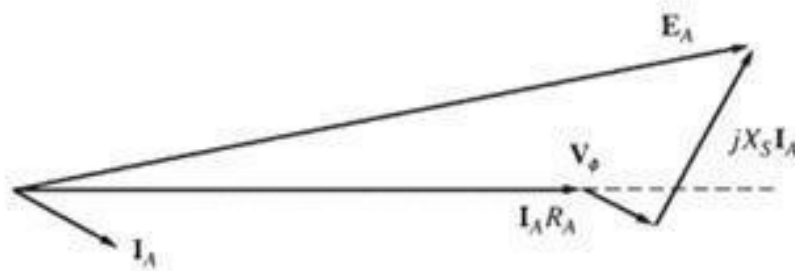
Diagram fasor pembebanan generator sinkron adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Faktor daya
(Sumber: Anonim 2007)

1. Dilihat pada gambar 2.5 dapat dijelaskan bahwa :
 - 1) Pada faktor daya beban (PF) = 1, berarti arus armatur sefase dengan tegangan beban.
 - 2) Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) adalah mendahului terhadap flux putaran utama (rotor)

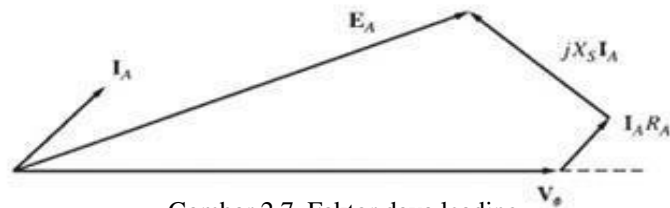
- 3) Interaksi dari kedua flux putar tersebut menghasilkan flux putar baru yang cacat (tidak sinus murni)
- 4) Akibatnya tegangan keluaran generator juga tidak sinus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.



Gambar 2.6. Faktor daya lagging
(Sumber: Anonim 2007)

2. Dilihat pada gambar 2.6 dapat di jelaskan bahwa :

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

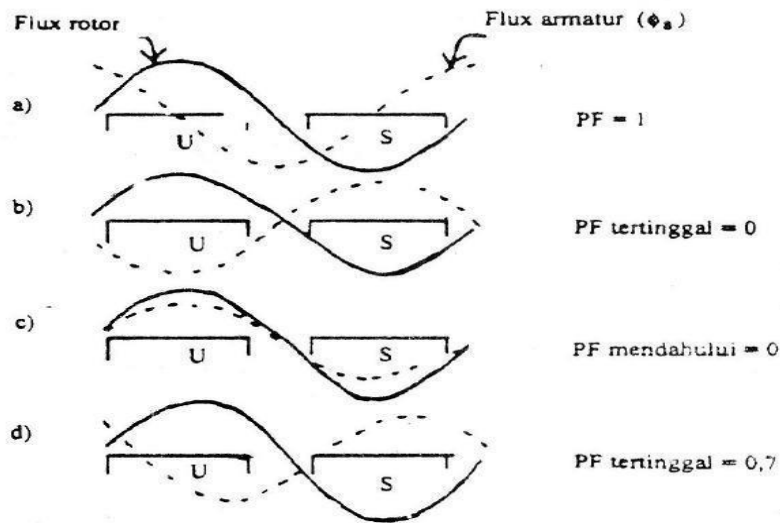


Gambar 2.7. Faktor daya leading
(Sumber: Anonim 2007)

3. Dilihat pada gambar 2.7 dapat dijelaskan bahwa :

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

Dengan adanya beban yang terpasang pada *output* generator sinkron, maka segera mengalir arus armatur (I_a). Dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan jangkar timbul flux putaran jangkar. Flux putaran jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah flux putaran yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Hal ini bergantung pada faktor daya beban dapat dilihat pada gambar 2.8.



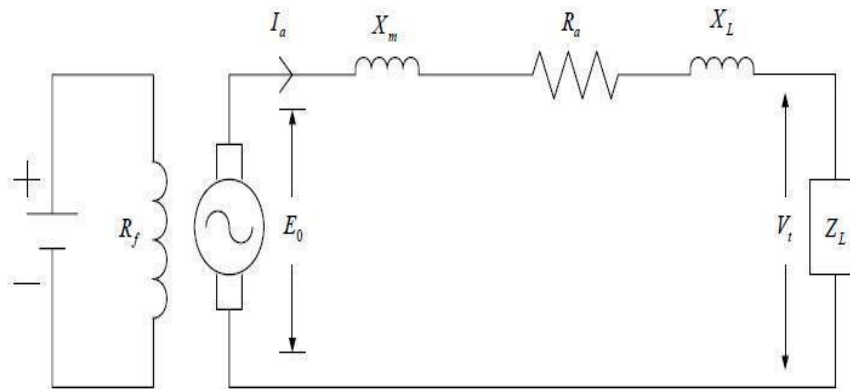
Gambar 2.8 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap Flux Rotor
(Sumber: Anonim 2007)

4. Dari gambar 2.8 dapat dijelaskan bahwa :

- 1) Pada faktor daya beban menengah adalah beban fase antara arus armatur (I_a) dan tegangan beban 0 sampai mendahului atau tertinggal.
- 2) Untuk beda fase 0 sampai , arus armatur mendahului terhadap tegangan beban disebut mendahului (leading). Sedangkan untuk beda fase 0 sampai , arus armatur tertinggal terhadap tegangan beban disebut faktor daya tertinggal (lagging).
- 3) Pada faktor daya (PF) beban menengah mendahului, flux armatur yang timbul fasenya agak bergeser kekanan terhadap flux putar rotor. Sehingga dan bentuk sinyal ggl armatur yang dihasilkan agak sedikit cacat.
- 4) Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m , akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. E_0 menjadi $E_a = E_0 - j I_a X_m$ dan tegangan terminal menjadi (V_t). GGL armatur tanpa beban (E_0) besarnya adalah :

$$E_0/\text{ph} = V_t + I_a (R_a + j X_a). \text{ Atau } E_0/\text{ph} = V_t + I_a + Z_a \dots \dots \dots (2.3)$$

Rangkaian ekuivalen generator sinkron per fasa dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut :

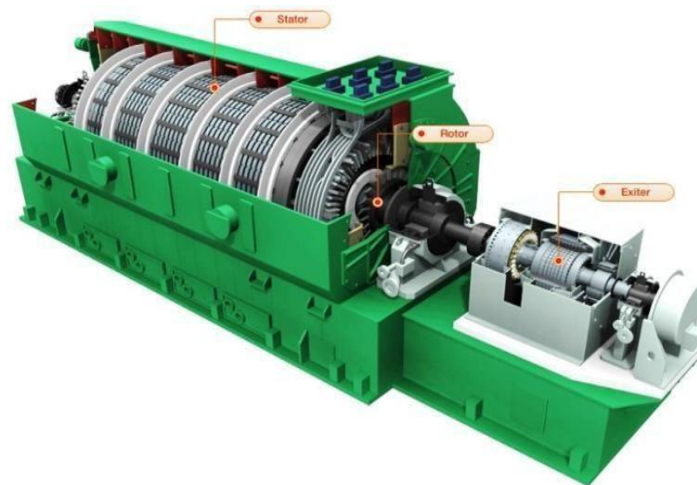


Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban
(Sumber: Anonim 2007)

2.2.5 Konstruksi Generator Sinkron

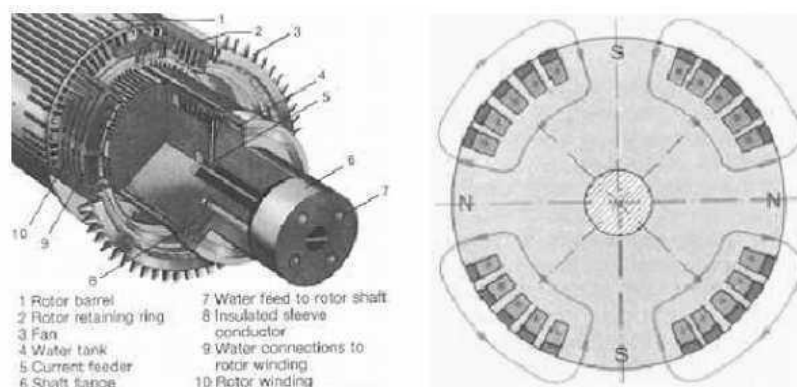
Menurut Kundur Prabha (1993), generator sinkron memiliki dua bagian utama, yaitu : Stator dan Rotor. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator. 2.10 Rotor Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor.

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



Gambar 2.10 Bentuk rotor kutub sepatu (salient)
(Sumber: J.Chapman Stephen,2002)

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



Gambar 2.11 Bentuk Rotor Silinder
(Sumber : J.Chapman Stephen,2002)

2.2.5.1 Stator

Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor . Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari : rangka stator, inti stator dan alur dan gigi stator, serta kumparan stator.

2.2.5.2 Rangka Stator

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

2.2.5.3 Inti stator

Inti stator terbuat dari lapisan bahan ferromagnetik berlapis lapis yang terpasang kerangka stator. Inti stator menyediakan jalur permeabilitas yang tinggi untuk proses magnetisasi. Inti stator dibuat berlaminasi untuk mengurangi rugi eddy current dan juga rugi histeresis. Induksi logam yang tersirkulasi oleh aliran arus adalah penyebab adanya kerugian *eddy current*. Arus Eddy akan menginduksi inti stator lebih besar karena inti stator terbuat dari konduktor. Selain itu *Eddy current* juga dapat menyebabkan kerugian daya pada generator karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti stator, pada saat itu juga sejumlah energi listrik akan berubah menjadi panas. Kerugian ini disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti stator. Gesekan molekul dalam inti stator ini dapat menimbulkan panas. Panas pada kumparan menunjukkan kerugian energi.

2.2.5.4 Bagian Rotor Generator

Rotor adalah bagian dalam pada generator yang berputar karena disinkronkan dengan putaran turbin. Rotor dan stator pada generator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Adapun bagian rotor terdiri dari dua bagian yaitu:

1. Inti kutub

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan.

2. Kumparan medan

Pada kumparan medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian ini harus benar-benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar.

2.2.6 Jumlah Kutub

Pada generator hubungan antara kecepatan dan putaran (N) dari rotor , frekuensi (F) yang dibangkitkan dan jumlah kutub-kutub (P). Hubungan tersebut adalah :

$$F = P.n/120 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

F = Frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub pada generator

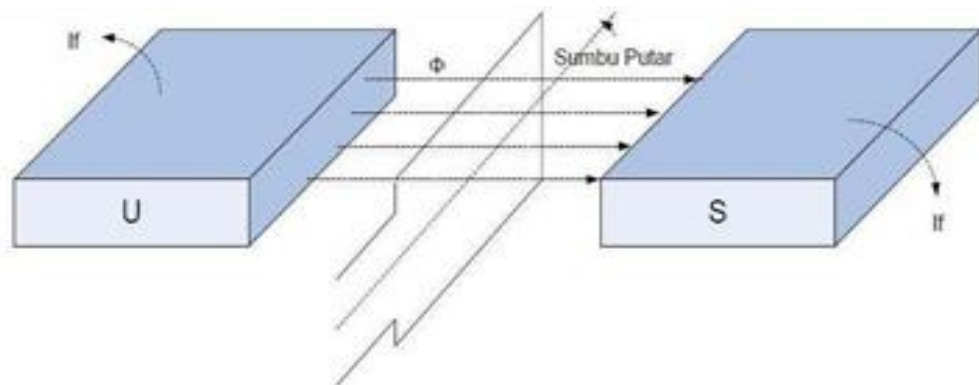
N = putaran rotor generator (rpm)

2.2.7 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron menggunakan hukum Faraday yang menyatakan bahwa jika sebuah penghantar yang berada pada medan magnet kemudian penghantar tersebut berubah-ubah memotong sumbu medan magnet, maka pada kumparan generator tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik (GGL).

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

1. Arus masukan (I_f) yang berupa arus searah yang akan menghasilkan medan magnet yang dapat disebut eksitasi dan dapat dikendalikan oleh AVR.



Gambar 2.12 Sistem Pembangkitan Generator Sinkron
(Sumber: J.Chapman Stephen,2002)

Keterangan :

I_f : Arus magnet

U – S : Kutub Generator

Sumbu Putar : Poros Generator

Φ : Fluks medan magnet

2.2.8 Pengaturan Putaran Generator (Governor)

Suwandi, Iman (2014) Putaran pada generator adalah salah satu faktor yang mempengaruhi besar dan kecilnya frekuensi *output* tegangan genrator. Besar dan

kecilnya frekuensi yang dihasilkan oleh generator harus sebanding dengan kecepatan putar generator tersebut. Sedangkan kecepatan putaran rotor pada generator diperoleh dari sinkronisasi dengan turbin. Pada turbin Terdapat Governor yang mengatur besar kecilnya uap yang masuk pada turbin. Governor dapat di analogikan seperti kran air yang bisa diatur sesuai kebutuhann.

Besar kecepatan putaran generator dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

n = kecepatan putaran(rpm)

p = jumlah kutub

f = frekuensi (Hz)

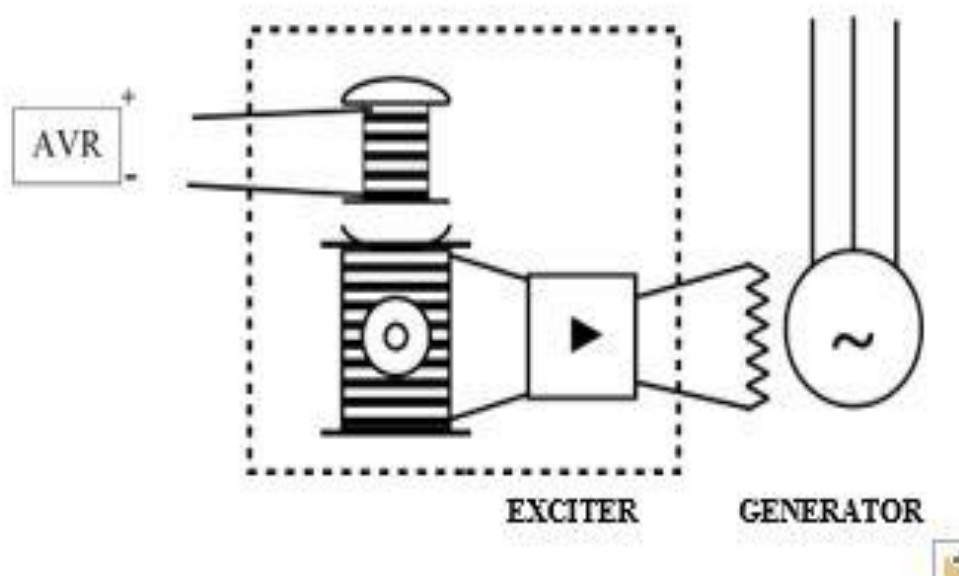
Tegangan dan arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh generator umumnya mempunyai frekuensi diantara 50 Hz – 60 Hz. Untuk menentukan jumlah pasang kutub (p) atau kecepatan putar rpm (n), besarnya frekuensi harus sebanding dengan jumlah kutub dan kecepatan putarannya.

2.2.9 Pengaturan Tegangan (Eksitasi)

Laksono, (2014) Sistem eksitasi adalah suatu sistem peralatan listrik yang bertugas menjaga tegangan *output* dan daya reaktif (MW) generator agar tetap pada nilai kerja yang diinginkan. Suatu kenaikan daya reaktif (MW) pada sisi beban akan mengakibatkan penurunan tegangan *output* generator. Penurunan tegangan terminal ini kemudian akan disensor oleh *Auto Voltage Generator (AVR)*. Selanjutnya tegangan terminal akan disearahkan dan dibandingkan dengan suatu titik nilai acuan.

2.2.9.1 Prinsip Dasar Eksitasi.

Pada Generator dengan kapasitas besar, diperlukan arus yang besar untuk kumparan Statornya, sehingga diperlukan AVR dengan kapasitas suplai Arus yang besar pula. Padahal AVR terdiri dari komponen elektronik yang kemampuan arusnya kecil. Karenanya dibuat sebuah generator kecil agar suplai arus AVR yang kecil menghasilkan arus yang besar pada generator kecil tersebut. Generator kecil tersebut beserta diode putar untuk menyearahkan arusnya agar menjadi DC disebut dengan *exciter*.



Gambar 2.13 Prinsip dasar Eksitasi
(Sumber: Manual book Generator 2009)

Exciter mempunyai prinsip kerja seperti generator, tetapi konstruksinya berbeda. Pada AVR rotornya adalah kumparan yang menghasilkan GGL, sedangkan Statornya adalah berupa batangan besi yang diberi lilitan, agar menjadi magnet bila diberi arus DC.

Dengan adanya sistem eksitasi kita dapat mengatur besar dan kecilnya daya reaktif (MW) yang dihasilkan generator, selain itu sistem eksitasi juga mempengaruhi tegangan *output* generator.

2.2.9.2 Jenis Sistem Eksitasi

1. Sistem Eksitasi dengan sikat

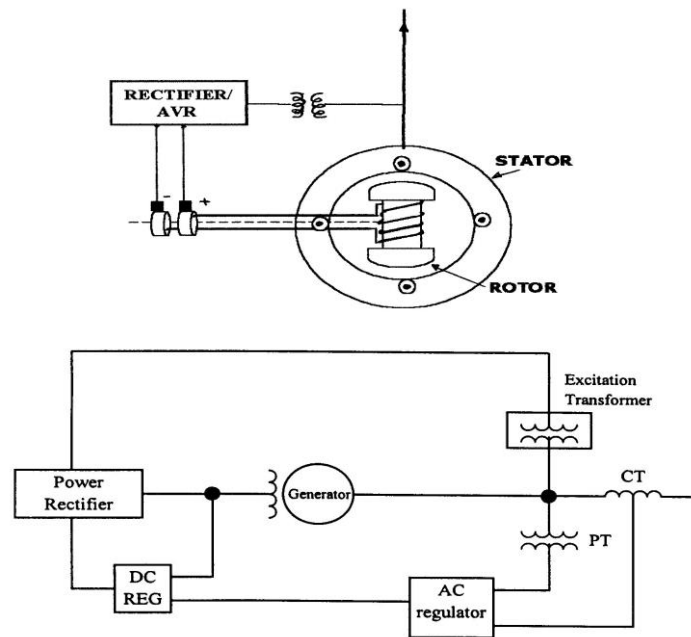
Pada generator dengan kapasitas kecil yaitu dibawah 400 MW untuk sistem eksitasinya menggunakan sikat, karena sistem eksitasi menggunakan sikat untuk kapasitas generator yang kecil lebih efisien. Untuk jenis sumber tegangan eksitasi dibagi menjadi 2 yaitu sebagai berikut :

1. Sistem Eksitasi Statis

Sistem Eksitasi yang sumber tegangannya berasal dari salah satu fasa *output* generator itu sendiri (*self excitation*). Sehingga pada sistem eksitasi statis ini tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber tegangan. Salah satu fasa *output* diturunkan tegangannya menggunakan trafo yang biasanya disebut dengan trafo eksitasi. Kemudian setelah tegangan diturunkan tegangan disearahkan menggunakan *rectifier* karena sumber tegangan yang dibutuhkan untuk sistem eksitasi adalah tegangan DC.

Pada mulanya rotor memiliki sifat magnet permanent pada rotor sehingga ketiak turbin berputar maka generator akan menghasilkan sedikit tegangan , kemudian *output* tegangan tersebut masuk ke dalam trafo dan disearahkan dan dimasukan kembali kedalam rotor sehingga rotor mengasilkan medan magnet yang lebih besar sehingga tegangan *output* generator menjadi semakin besar sampai mencapai tagangan nominal generator. Untuk mencapai tegangan nominal

generator dibutuhkan suatu peralatan listrik yang dapat mengatur keluaran tegangan secara konstan. Peralatan listrik yang dimaksud adalah *Auto Voltage Regulator (AVR)*,



Gambar 2.14. Diagram Prinsip Sistem Excitasi Statik
(Sumber: Manual book Generator 2009)

Seperti pada gambar 2.14 diatas dapat kita lihat bahwa suplai daya listrik untuk eksitasi mengambil dari *output* generator melalui *excitation transformer*, kemudian disearahkan melalui *power rectifier* dan disalurkan ke rotor generator untuk eksitasi atau penguat medan dengan melalui sikat arang.

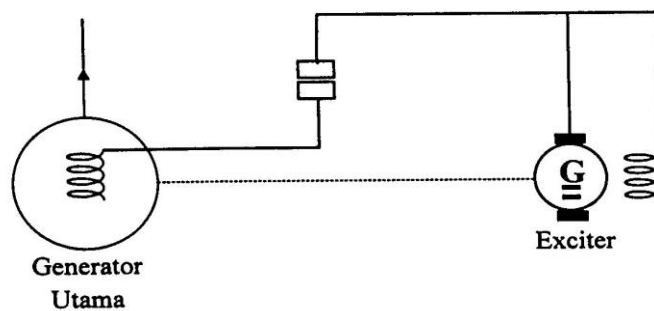
Untuk pengaturan besaran tegangan *output* generator diatur melalui DC regulator dan AC regulator, sehingga besarnya arus eksitasi dapat diatur sesuai kebutuhan.

2). Sistem Eksitasi Dinamik

Pada sistem eksitasi dinamik untuk sumber eksitasinya diperoleh dari mesin yang bergerak seperti generator kecil. Sehingga pada sistem eksitasi dinamik

seakan-akan terdapat 2 generator seperti eksitasi tanpa sikat, dalam satu poros yang diputar menggunakan turbin yang sama. Generator utama adalah generator yang *outputnya* dipakai untuk konsumen sedangkan generator kedua *outputnya* hanya digunakan untuk sistem eksitasi saja. Generator kedua yang berukuran kecil biasanya sering disebut *exciter*.

Prinsip sistem eksitasi dengan menggunakan *exciter* generator arus searah adalah digambarkan sebagai berikut :



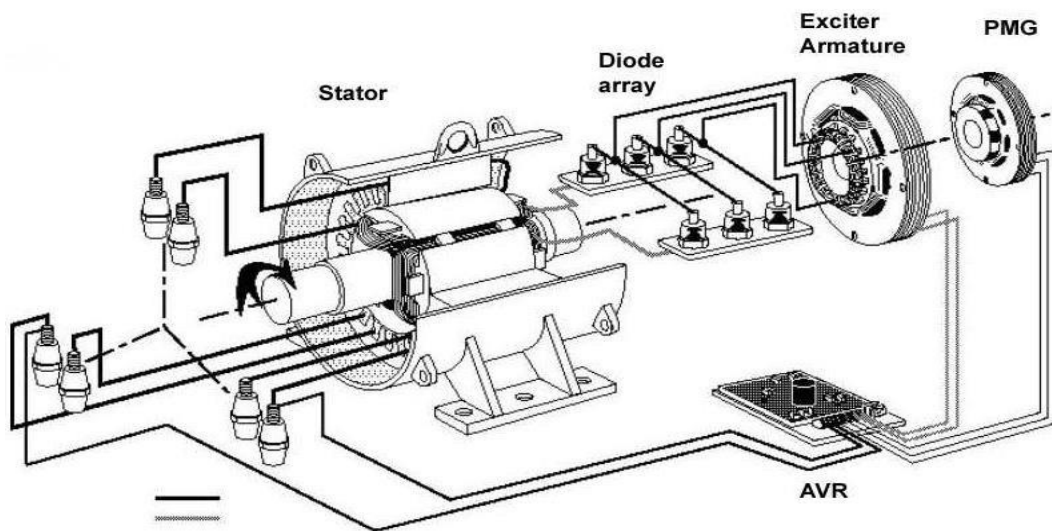
Gambar 2.15. Diagram Prinsip Sistem Excitasi Dinamik
(Sumber: Manual book Generator 2009)

Seperti pada gambar diatas, bahwa sistem eksitasi dengan menggunakan *exciter* generator DC untuk menyalurkan arus excitasi generator utama dengan media sikat arang dan slip ring. serta *output* arus searah dari generator exciter melalui sikat arang.

2. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Pada Sistem Eksitasi tanpa sikat dalam penggunaannya terdapat pada generator dengan kapasitas besar yaitu diatas 400 MW. Penggunaan sistem eksitasi dengan sikat untuk kapasitas generator yang besar akan menimbulkan percikan api pada *exciter* sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada generator.

Sistem eksitasi tanpa sikat tidak memerlukan sumber listrik eksternal, karena sumber tegangan *disupply* langsung dari *pilot exciter* ke rotor generator utama. *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator arus bolak-balik dengan magnet permanen yang terpasang pada satu poros rotor bersamaan dengan penyearah. Adapun diagram prinsip kerjanya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.16. Sistem Eksitasi Tanpa)
(Sumber: Manual book Generator 2009)

2.2.10 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

Nur Ilham L, Dr. Ir. Hermawan, DEA (2002) AVR adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk menjaga tegangan generator tetap konstan sehingga generator diharapkan menghasilkan tegangan yang stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan *output* generator.

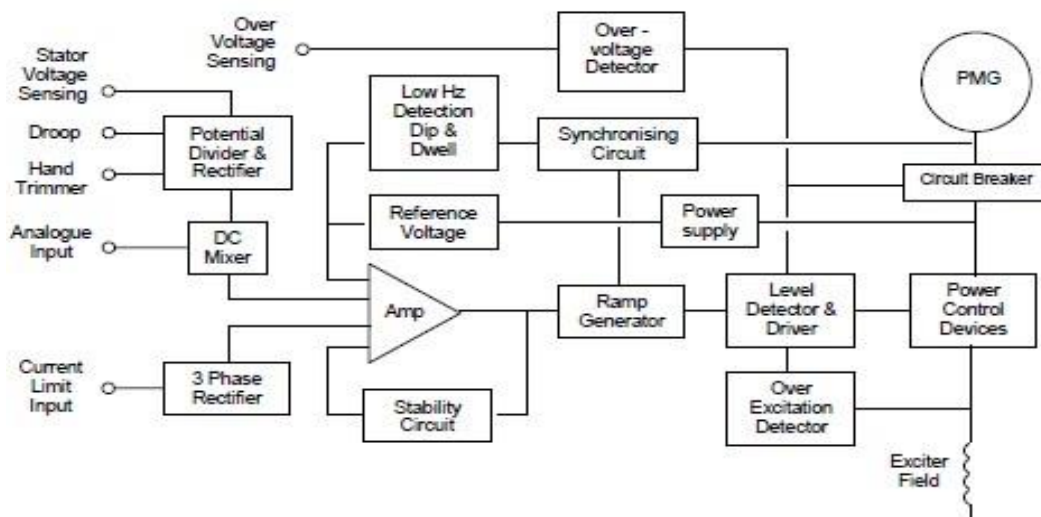
2.2.10.1 Prinsip Kerja AVR

Ketika terjadi turun tegangan generator AVR akan melakukan pembacaan sekaligus perintah untuk menambah arus eksitasi namun jika tegangan generator

melebihi tegangan nominal maka AVR secara otomatis akan mengurangi arus eksitasi sehingga keluaran tegangan generator akan selalu konstan dan stabil. Selain berfungsi sebagai pembacaan dan pengaturan arus eksitasi AVR juga menjamin keandalan generator. Pemasangan AVR pada generator yaitu dihubungkan langsung dengan kumparan generator menggunakan isolasi trafo yang berfungsi mengontrol daya yang dihasilkan pada stator. AVR memiliki fungsi utama yaitu sebagai berikut:

1. Untuk mengatur *output* tegangan generator
2. Untuk mengatur besar arus eksitasi
3. Untuk mengatur volt/Hertz

2.2.10.2 Bagian-Bagian *Automatic Voltage Regulator* (AVR)



Gambar 2.17 Skematik AVR MX321
(Sumber: Nur Ilham Dr. Ir. Hermawan, DEA.)

1. *Potensial Divider and Rectifier*

Potensial Divider and Rectifier berfungsi menerima sinyal tegangan ac keluaran generator utama sedangkan *Rectifier* berfungsi mengubah sinyal tegangan ac menjadi tegangan dc untuk dikuatkan pada *Amplifier*.

2. *Phase Rectifier*

3 Phase Rectifier berfungsi memonitor arus keluaran generator utama, yang merupakan penyearah tiga fasa yang mengubah sinyal ac menjadi sinyal DC.

3. *Amplifier*

Amplifier berfungsi membandingkan tegangan keluaran generator utama dengan tegangan referensi dan selisihnya (*error*) akan dikuatkan ke *error detector* untuk memberikan sinyal control untuk *power control device*. *Ramp generator* dan *level detector* berfungsi mengontrol periode konduksi dari *power control device* untuk menjaga tegangan nominal.

4. *Power Supply*

Power supply berfungsi untuk menyediakan daya untuk rangkaian AVR.

1. 5. *Circuit Breaker*

Circuit Breaker berfungsi memutus daya pada AVR dan generator eksiter jika terjadi gangguan tegangan lebih atau gangguan eksitasi lebih.

2. 6. *Over Excitation Detector*

Over Excitation Detector berfungsi memonitor tegangan eksitasi yang disuplai pada eksiter. Tegangan eksitasi maksimum dibatasi atau disetting pada level 70 Volt +/- 5%. Jika terjadi kenaikan tegangan eksitasi melebihi nilai setingan maka *over*.

2.2.11 Daya

Daya adalah jumlah energi yang digunakan untuk melakukan sebuah usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau Horsepower (HP), Horsepower merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 Watt atau lbft/second. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1 Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 Ampere dan tegangan 1 Volt.

Daya dinyatakan dalam P, Tegangan dinyatakan dalam V dan Arus dinyatakan dalam I, sehingga besarnya daya dinyatakan :

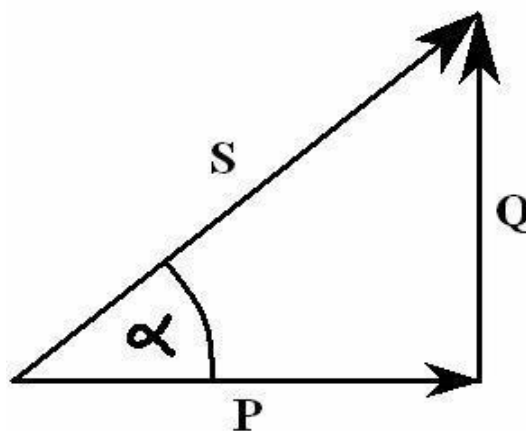
$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.6)$$

$$P = \text{Volt} \times \text{Ampere} \times \text{Cos } \phi \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P = \text{Watt} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.2.12 Faktor Daya

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



Gambar 2.18 Segitiga daya
(Sumber: Anonim 2007)

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 sistem 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.

Daya Semu (Apparent Power) Atau disebut juga daya total yaitu penjumlahan daya aktif dan daya reaktif. Jadi daya inilah yang dijadikan kapasitas daya maksimal suatu generator. $S=V.I(VA)$ atau $S= P^2 +Q^2$

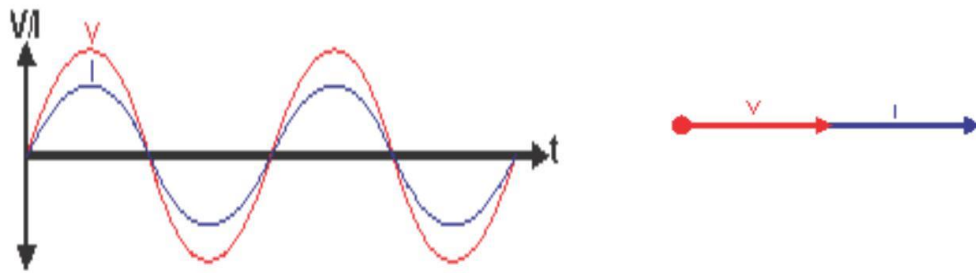
Daya Aktif (Real Power) Adanya daya aktif (faktor P) disebabkan beban yang digunakan bersifat resistif seperti lampu pijar, rheostat, load bank, pemanas, motor induksi berbeban berat, dan trafo berbeban tinggi, dll. Beban resistif membuat phasa antara tegangan dan arus selalu sama (inphase) sehingga membuat $pf = 1$. Adapun perhitungan daya aktif sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \alpha \text{ (W)} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$$Z = R \text{ 3 fasa} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$P=3 \times V_{L-L} \times I_L \times \cos \alpha \text{ (W)} \dots\dots\dots(2.11)$$



Gambar 2.19. Karakteristik fasa dan vektor pada beban resistif murni
(Sumber: Anonim 2007)

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

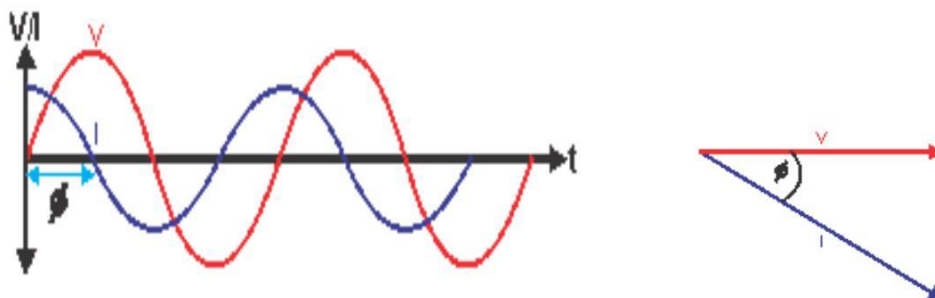
1 fasa 3phasa

$$Q = V \times I \times \sin \alpha \text{ (VAR)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana jika:

$$\text{lagging } Z = jXL \quad Q = 3 \times VL-L \times IL \times \sin \alpha \text{ (VAR)}$$

$$\text{leading } Z = -jXC$$



Gambar 2.20 Karakteristik fasa dan vektor pada beban kapasitif murni
(Sumber: Anonim 2007)

