

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut terdapat beberapa tinjauan pustaka yang berkaitan dengan pengaruh sistem eksitasi terhadap daya reaktif, antara lain sebagai berikut :

1. Imron Ridzki, dalam jurnalnya yang berjudul “Analisis Sistem Eksitasi” yang terbit di Jurnal ELETEK, Vol 11 No. 2, Oktober 2013 ISSN 1693-4024 membahas mengenai sistem eksitasi, khususnya pengaruh perubahan eksitasi terhadap daya reaktif.
2. Basofi, dalam skripsinya yang berjudul “Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya” membahas mengenai pengaruh arus eksitasi pada daya reaktif secara umum dan membahas pengaruh tersebut pada generator sinkron yang bekerja secara paralel.

2.2 Landasan Teori

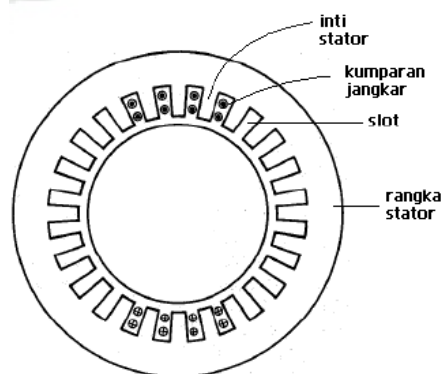
2.2.1 Generator Sinkron

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet (Anthony, 2013). 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 definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan magnet pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. 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 sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas yang relative besar. Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD dan pembangkit listrik lainnya. Selain generator dengan kapasitas besar, kita juga mengenal generator dengan kapasitas yang relative kecil misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut generator set.

Konstruksi pada generator sinkron secara umum terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

1. Stator adalah bagian dari generator yang diam dan mempunyai alur atau *slot* memanjang yang di dalamnya terdapat belitan yang disebut dengan belitan jangkar (*Armature Winding*).



Gambar 2.1. Penampang Stator

Secara umum stator terdiri dari kerangka stator, inti stator, belitan stator dan *slot*.

a. Rangka Stator

Rangka stator berfungsi sebagai tempat melekatnya kumparan jangkar. Pada rangka stator terdapat lubang pendingin di mana udara dan gas pendingin disirkulasikan. Rangka stator biasanya dibuat dari besi campuran baja atau plat baja giling yang dibentuk sedemikian rupa sehingga diperoleh rangka yang sesuai dengan kebutuhan.

b. Inti Stator

Inti stator melekat pada rangka stator di mana inti ini terbuat dari laminasi-laminasi besi khusus atau campuran baja. Hal ini dilakukan untuk memperkecil rugi arus *eddy*. Tiap laminasi diberi isolasi dan di antaranya dibentuk celah sebagai tempat aliran udara.

c. Alur (*Slot*) dan Gigi

Slot adalah tempat konduktor berada yang letaknya pada bagian dalam sepanjang keliling stator. Bentuk slot ada 3 jenis yaitu *slot* terbuka, *slot* setengah terbuka, dan *slot* tertutup.

d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

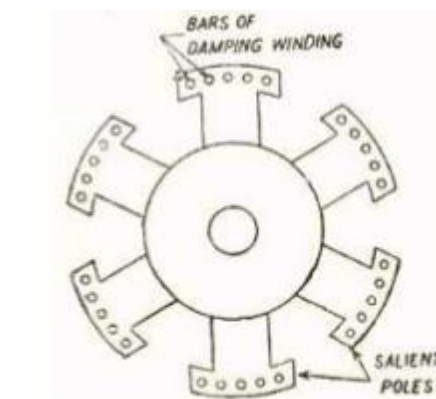
Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

2. Rotor adalah bagian dari generator yang berputar. Rotor terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *slip ring*, kumparan rotor (kumparan medan) dan poros rotor. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat

berupa kutub menonjol (*salient pole*) dan kutub silindris (*non salient pole*).

a. Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Rotor tipe ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak dan utarannya rendah. Kutub menonjol ditandai dengan rotor berdiameter besar dan panjang sumbunya pendek. Kumparan dibelitkan pada tangkai kutub, di mana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus Eddy.



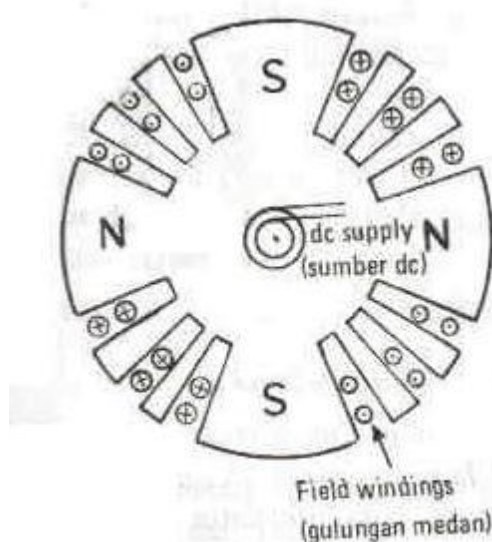
Gambar 2.2. Rotor Kutub Menonjol

Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron adalah seperti yang terlihat pada gambar 2.2 di atas. Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Oleh sebab itu generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem

pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putara rendah dan sedang karena kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi. Selain itu, kontruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Kutub Silindris (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, kontstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat dari sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur tersebut dan terhubung seri dengan slip yang terhubung dengan eksiter.



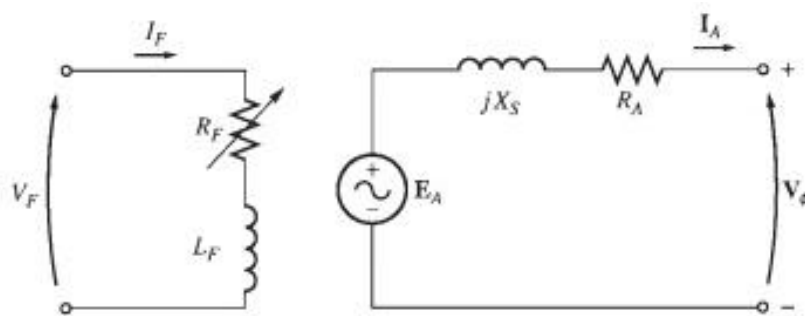
Gambar 2.3. Rotor Kutub Silindris

Rotor kutub silinder umumnya digunakan untuk kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm).

Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi. Selain itu distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

3. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

Stator terdiri dari belitan-belitan di mana suatu belitan konduktor terdiri dari tahanan (R_A) dan induktansi (L). Ketika motor bekerja maka arus akan mengalir pada konduktor membentuk fluksi jangkar (ϕ_a) yang akan membangkitkan medan putar. Fluksi jangkar (ϕ_a) akan berinteraksi dengan fluks medan (ϕ_m) sehingga akan terjadi konversi energi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Pada kondisi ini, ada fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang disebut dengan reaktansi bocor (X_A). Akibat adanya pengaruh reaksi jangkar dan reaktansi bocor, maka rangkaian ekuivalen suatu generator sinkron per fasa akan menjadi seperti gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Per Fasa

Dimana :

- E_A = Tegangan Jala-jala Generator
- X_S = Reaktansi Sinkron
- R_A = Resistansi Jangkar
- I_A = Arus Jangkar

V_O/V_T = Tegangan Keluaran Generator

V_F = Tegangan Eksitasi

I_F = Arus Eksitasi

R_F = Tahanan Belitan Medan

L_F = Induksi Belitan Medan

Berdasarkan gambar 2.4 dapat ditulis persamaan tegangan jala-jala generator sinkron sebagai berikut

$$E_A = V_O + I_A R_A + j I_A X_S \dots\dots\dots(2.1)$$

Biasanya nilai X_S yang terdapat pada persamaan 2.1 telah tertera pada data teknik atau spesifikasi sebuah generator. Namun nilai X_S tersebut dapat ditemukan juga dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X_S = X_A + X_m \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana : X_S = Reaktansi Sinkron

X_A = Reaktansi Bocor Jangkar

X_m = Reaktansi Reaksi Jangkar

2.2.2 Sistem Eksitasi

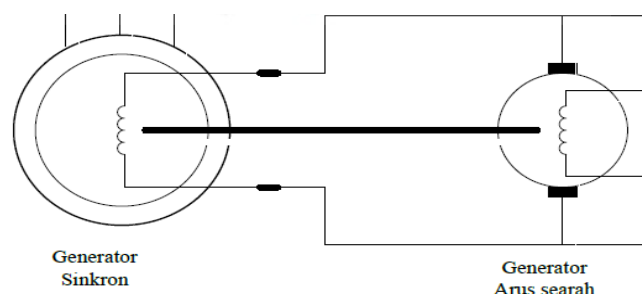
Eksitasi pada generator sinkron adalah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet 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:

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.



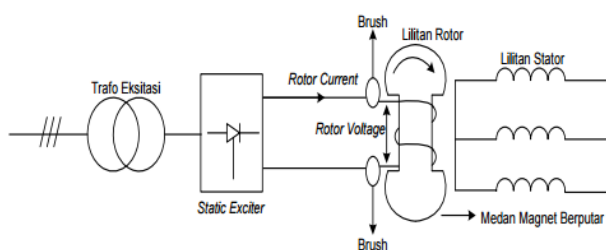
Gambar 2.5 Sistem Eksitasi Dengan Generator Arus Searah

Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter pada gambar 2.5 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.

2. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis yaitu sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut diam 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*.



Gambar 2.6 Skema Sistem Eksitasi Dengan Sikat

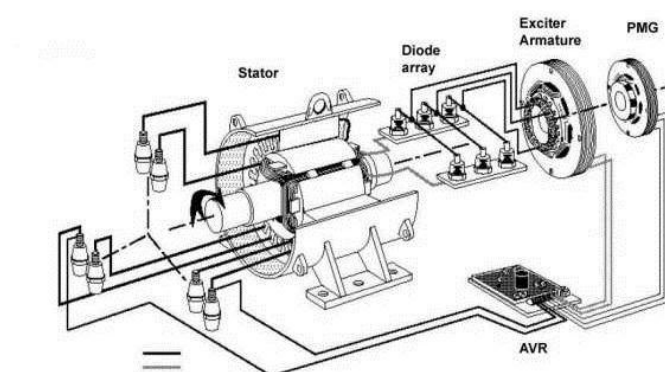
Pada sistem eksitasi statis seperti gambar 2.6, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional yang menggunakan generator arus searah sebagai eksiter sudah jauh lebih baik. Yaitu pada eksitasi statis tidak ada

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.

3. Sistem Eksitasi Permanen Magnet Generator (PMG)

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 permanen magnet 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:



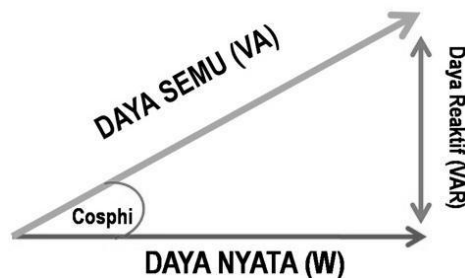
Gambar 2.7 Sistem Eksitasi Menggunakan PMG

Dapat dilihat pada gambar 2.7 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 *Automatic Voltage Regulator* (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.

2.2.3 Daya Kompleks

Pada daya kompleks, terdapat tiga macam daya, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dapat dinyatakan dengan mempresentasikan daya-daya tersebut sebagai vektor. Representasi ini sering disebut sebagai segitiga daya.



Gambar 2.8 Segitiga Daya

Pada gambar 2.8 terlihat representasi segitiga daya. Segitiga daya tersebut terdiri dari daya nyata, daya reaktif dan daya semu.

1. Daya Aktif/Nyata (P)

Daya ini sebenarnya adalah daya yang dipakai oleh komponen pasif resistor yang merupakan daya terpakai atau terserap. Kalau kita perhatikan dari PLN ke rumah-rumah, maka daya yang tercatat pada alat kWh meter adalah daya nyata dan itu merupakan daya yang akan dibayarkan oleh pelanggan. Satuan daya aktif adalah Watt (W).

Secara matematis, daya nyata merupakan perkalian antara tegangan efektif, arus efektif, dan koefisien faktor dayanya.

$$P = V_{eff} I_{eff} \cos \theta \dots\dots\dots(2.3)$$

2. Daya Reaktif (Q)

Daya ini adalah daya yang muncul diakibatkan oleh komponen pasif di luar resistor yang merupakan daya rugi-rugi atau daya yang tidak diinginkan. Daya ini seminimal mungkin dihindari, atau paling tidak diperkecil yaitu dengan cara memperkecil faktor dayanya. Satuan daya reaktif adalah VAR.

Secara matematis, daya reaktif merupakan perkalian antara tegangan efektif, arus efektif, dan nilai sin.

$$Q = V_{eff} I_{eff} \sin \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

3. Daya Semu (S)

Daya ini merupakan daya yang sebenarnya yang disuplai oleh PLN, yang merupakan resultan daya antara daya nyata dan daya reaktif. Satuan daya semu adalah VA.

Secara matematis, daya semu merupakan perkalian antara tegangan dan arus efektif.

$$S = V_{eff} I_{eff} \dots\dots\dots(2.5)$$

2.3 Kerangka Pemikiran

Eksitasi pada generator sinkron merupakan proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Nilai dari arus eksitasi dapat mempengaruhi nilai daya reaktif yang dihasilkan oleh generator. Daya reaktif merupakan daya yang dipakai secara tidak langsung atau daya yang tidak terpakai kerja. Tidak seperti daya aktif yang merupakan daya yang dipakai kerja. Dalam prakteknya, daya reaktif tidak dijual kepada pelanggan dengan skala kecil,

namun dijual pada pelanggan skala besar. Proses penjualan daya reaktif tersebut tidak sama dengan penjualan daya reaktif. Dengan demikian, bagi pelanggan tenaga listrik skala besar tidak hanya daya aktif saja yang diperhatikan, namun daya reaktif pun diperhatikan karena pelanggan skala besar memungkinkan mengkonsumsi daya reaktif seperti motor-motor besar, *conveyor* dan peralatan listrik lainnya yang memiliki sifat beban induktif.

Alasan penulis membahas pengaruh arus eksitasi terhadap daya reaktif di PT. Indonesia Power UPJP Kamojang adalah agar fluktuasi arus eksitasi serta pergerakan daya reaktif lebih diperhatikan. Hal ini perlu perhatian yang lebih karena pengaturan daya reaktif yang dipasok oleh pembangkit dapat menentukan kualitas penjualan listrik pembangkit itu sendiri yang berperan sebagai produsen listrik, khususnya daya reaktif. Dengan pemantauan fluktuasi arus eksitasi terhadap daya reaktif yang teliti, dapat mengurangi resiko terganggunya stabilitas sistem tenaga, khususnya daya reaktif, sehingga keandalan daya reaktif yang disediakan produsen lebih tinggi.