

BAB II

KERANGKA TEORITIK DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1. Kerangka Teoritik

2.1.1. Analisis Pengaruh

Dalam penelitian didapatkan data-data mentah yang ingin diteliti. Data-data mentah tersebut selanjutnya dianalisis sehingga lebih mudah dipahami. Maka itu analisis diperlukan guna mendukung suatu penelitian.

Analisa adalah penyelidikan terhadap suatu peristiwa (karangan, atau perbuatan) untuk mengetahui keadaan yang sebenarnya (sebab musabab, duduk perkaranya)¹. Sedangkan analisis menurut Komaruddin adalah kegiatan berpikir untuk menguraikan suatu keseluruhan menjadi komponen-komponen sehingga dapat mengenal tanda-tanda komponen, hubungannya satu sama lain dan fungsi masing-masing dalam suatu keseluruhan yang padu².

Analisa atau analisis adalah proses kemampuan dalam domain kognitif dengan menggunakan kemampuan akal untuk memecahkan suatu masalah pokok dan menentukan bagaimana bagian-bagian saling berhubungan satu sama lain pada keseluruhan struktur³. Sedangkan, pengaruh menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) edisi kedua adalah daya yang ada dan

¹ Tim Penyusun. *Kamus Pusat Pembinaan dan Pengembangan Bahasa* (Jakarta: Balai Pustaka, 1996), h. 779.

² Komaruddin. *Ensiklopedia Manajemen* (Jakarta: Bumi Aksara, 1994), h. 31.

³ Eveline Siregar. *Teori Belajar dan Pembelajaran* (Jakarta: Ghalia Indonesia, 2010), h. 8.

timbul dari suatu (orang, benda) yang ikut membentuk watak, kepercayaan atau perbuatan seseorang.⁴

WJS.Poerwardaminta berpendapat bahwa pengaruh adalah daya yang ada atau timbul dari sesuatu, baik orang maupun benda dan sebagainya yang berkuasa atau berkekuatan dan berpengaruh terhadap orang lain.⁵

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa yang dimaksud analisis perubahan dalam penelitian adalah proses penyelidikan peristiwa untuk menelaah suatu daya yang ada atau timbul dari suatu hal yang memiliki akibat atau dampak yang ada antara perubahan eksitasi terhadap daya reaktif unit pembangkit.

2.1.2. Arus Eksitasi

Arus eksitasi merupakan arus searah yang diberikan pada belitan rotor (kumparan medan). Pemberian arus medan ini bertujuan untuk menghasilkan fluks dan medan pada kumparan rotor. Berdasarkan hukum Faraday, jika suatu penghantar yang dialiri arus listrik yang digerakan di sekitar kumparan, maka pada kumparan tersebut timbul GGL induksi.⁶

Sama halnya dengan kumparan rotor yang dialiri arus listrik kemudian diputar, maka medan di sekitar kumparan rotor akan memotong batang-batang konduktor pada stator (kumparan jangkar). Apabila pada ujung-ujung kumparan stator (terminal stator) diberi beban, maka akan timbul

⁴ Tim Penyusun. *Kamus Besar Bahasa Indonesia Edisi Kedua* (Jakarta: Balai Pustaka, 1991), h. 747.

⁵ WJS. Poerwardaminta. *Kamus Umum Bahasa Indonesia* (Jakarta: Balai Pustaka, 1987), h. 731.

⁶ Akhmad. *Sistem Eksitasi. Divisi Pemeliharaan PLTU Gresik* (Gresik, 1983), h. 27.

GGL induksi pada kumparan stator dan menghasilkan tegangan listrik pada terminal stator yang dihubungkan ke beban tadi.⁷

Pemberian arus eksitasi pada generator diatur dalam sebuah sistem yang disebut sistem eksitasi. Sistem eksitasi merupakan sistem pasokan listrik DC sebagai penguat pada generator listrik atau sebagai penguat medan magnet sehingga suatu generator dapat menghasilkan listrik dan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya.⁸ Setelah generator AC mencapai kecepatan nominal, medannya dieksitasi dari catu DC. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar, fluksi medan memotong konduktor menginduksikan GGL pada konduktor jangkar. Besarnya GGL yang dibangkitkan tergantung pada laju pemotongan garis gaya (kecepatan rotor) dan kuat medan. Karena generator kebanyakan bekerja pada kecepatan konstan, maka besarnya GGL yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Eksitasi medan dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya arus eksitasi yang dikenakan pada kumparan medan generator.

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat.

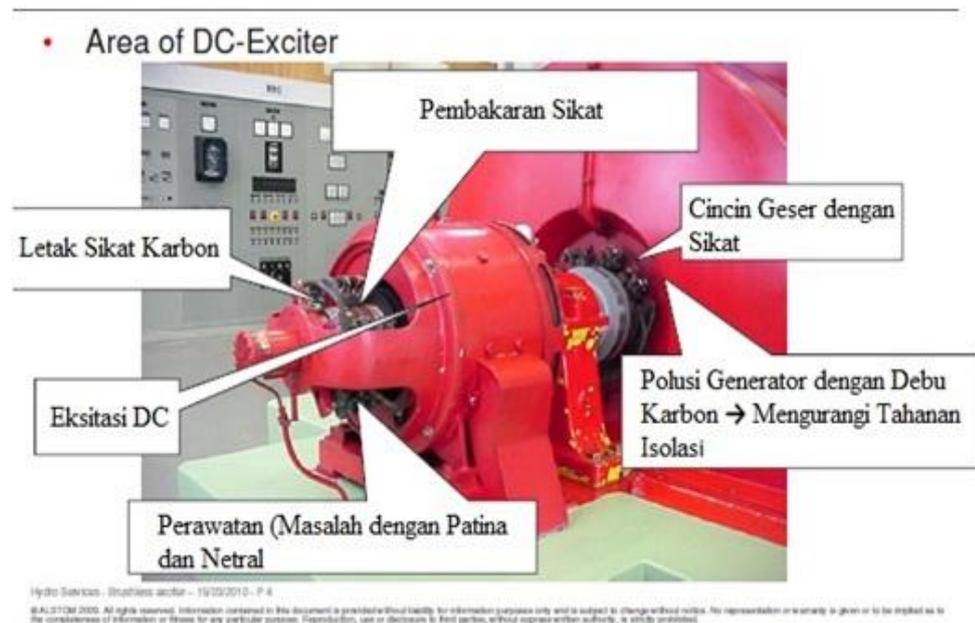
2.1.2.1. Sistem Eksitasi dengan Sikat

Sistem Eksitasi dengan menggunakan sikat adalah sistem yang untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke rotor generator

⁷ Aziz. *Operasi Generator Arus Bolak-Balik, Divisi Pemeliharaan PLTU Gresik (Gresik, 1984)*, h. 46.

⁸ Suyitno. *Pembangkit Energi Listrik* (Jakarta: Rineka Cipta, 2011), h. 140.

menggunakan *slip ring* dan sikat arang. Demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter*.



Gambar 2.1. Generator Menggunakan Sistem Eksitasi dengan Sikat

Sumber: Dokumentasi Sendiri

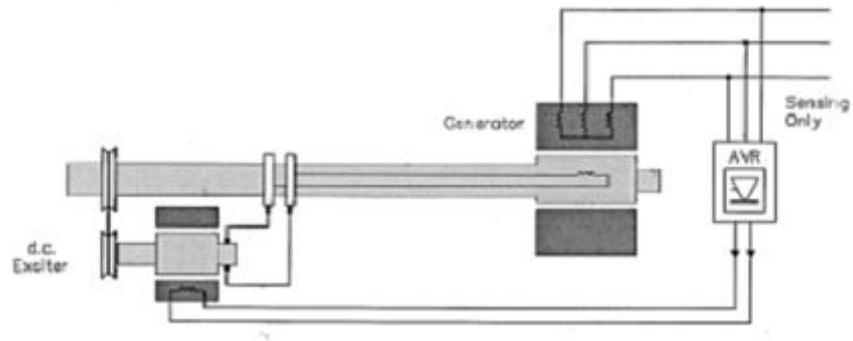
Pada perkembangannya sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dibedakan menjadi dua yaitu: (1). Sistem eksitasi dengan menggunakan generator arus searah; (2). Sistem eksitasi statis.

A. Sistem Eksitasi dengan Generator Arus Searah

Sistem eksitasi dengan menggunakan generator arus searah merupakan sistem eksitasi konvensional, dimana arus searah dialirkan pada kumparan rotor diperoleh dari generator arus searah yang terkopel dalam satu poros dengan generator sinkron.

Arus searah yang dihasilkan oleh generator arus searah ini dialirkan pada kumparan rotor melalui sikat dan *slip ring* untuk

menghasilkan tegangan induksi pada kumparan stator (jangkar) generator sinkron.



Gambar 2.2. Sistem Eksitasi dengan Generator Arus Searah

Sumber: Electro-Mechanical Works–Selection of Hydro Generator for SHP(2nd ed.).Pdf, 2011

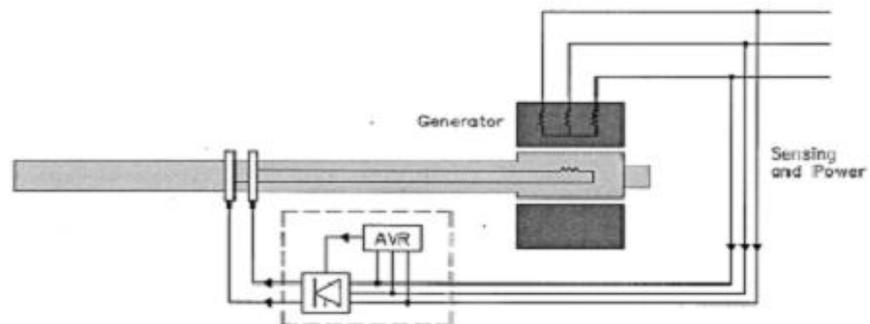
Sistem eksitasi dengan menggunakan generator arus searah ini mempunyai kelemahan antara lain:

1. Generator arus searah yang terkopel pada poros yang sama dengan generator sinkron menjadi beban tambahan bagi *prime mover*.
2. Penggunaan sikat untuk menyalurkan arus searah pada rotor generator sinkron maupun sikat yang terdapat pada generator arus searah itu sendiri mengakibatkan tegangan jatuh pada sikat yang menyebabkan rugi-rugi daya yang cukup besar.
3. Penggunaan sikat dan *slip ring* membutuhkan perawatan yang tinggi karena sikat harus diperiksa secara teratur.
4. Generator arus searah sendiri memiliki keandalan yang rendah.

Oleh karena itu masalah-masalah tersebut, maka dikembangkan sistem eksitasi lain, yaitu sistem eksitasi statis, untuk meningkatkan sistem eksitasi yang masih menggunakan sikat.

B. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak, yang berarti bahwa peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama rotor generator sinkron. Pada sistem eksitasi ini, generator tambahan tidak lagi diperlukan dan sebagai gantinya, sumber eksitasi berasal dari keluaran generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*.



Gambar 2.3. Sistem Eksitasi Statis

Sumber: Electro-Mechanical Works–Selection of Hydro Generator for SHP(2nd ed.).Pdf, 2011

Sistem eksitasi statis mempunyai kualitas yang lebih baik daripada sistem eksitasi konvensional dengan menggunakan

generator arus searah. Namun penggunaan sikat masih menjadi permasalahan pada sistem eksitasi ini.⁹

2.1.2.2. Sistem Eksitasi tanpa Sikat

Sistem eksitasi tanpa sikat merupakan sistem yang dalam mengalirkan arus eksitasi ke *main exciter* rotor generator tidak menggunakan *slip ring* dan sikat arang. Demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*.



Gambar 2.4. Generator Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Sumber: Dokumentasi Sendiri

Sistem eksitasi tanpa sikat dibedakan menjadi dua yaitu: (1). Sistem eksitasi tanpa menggunakan *pilot exciter*; (2). Sistem eksitasi dengan menggunakan *pilot exciter*

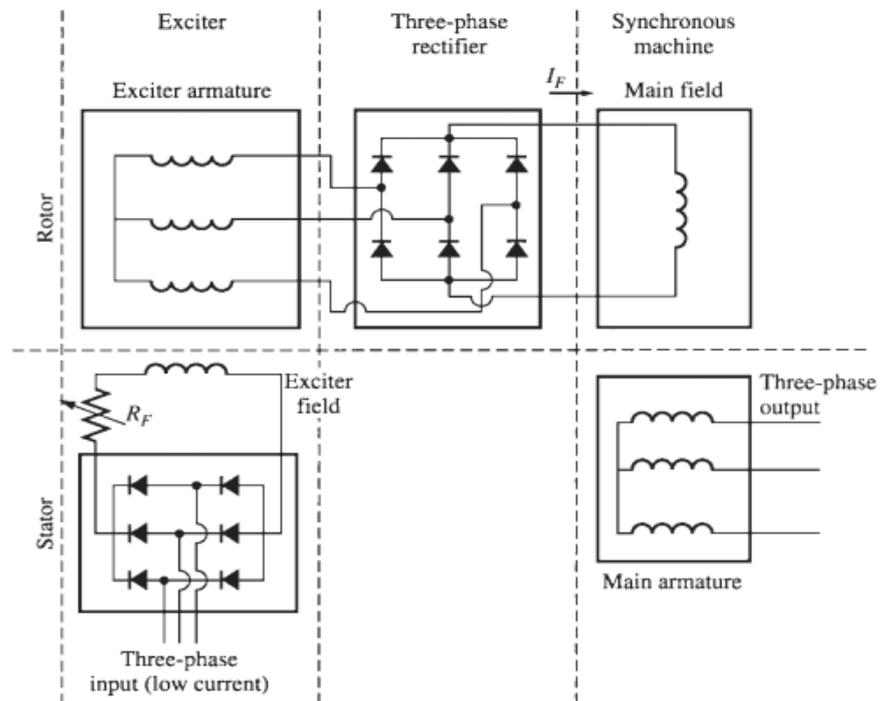
⁹ AHEC. Electro-Mechanical Works–Selection of Hydro Generator for SHP(2nd ed.).Pdf (Mei 2011), h. 22.

A. Sistem Eksitasi tanpa Sikat tanpa *Pilot Exciter*

Sistem eksitasi ini menyalurkan arus searah pada kumparan rotor tanpa menggunakan sikat. Sistem eksitasi ini terdiri dari sebuah generator arus bolak-balik yang mempunyai kumparan medan yang terletak pada stator dan kumparan jangkar yang terletak pada poros rotor.

Sejumlah kecil arus tiga fasa disearahkan dan digunakan untuk mensuplai kumparan medan pada *exciter* yang terletak pada stator. Keluaran kumparan jangkar *exciter* (pada rotor) disearahkan menjadi arus searah dengan menggunakan *rectifier* tiga fasa yang juga terpasang pada poros rotor dan kemudian dialirkan ke kumparan medan utama. Besarnya arus medan yang dialirkan menuju rotor generator utama dapat dikendalikan dengan sejumlah kecil arus medan *exciter* yang terletak pada stator.

SYNCHRONOUS GENERATORS



Gambar 2.5. Sistem Eksitasi tanpa Sikat tanpa *Pilot Exciter*

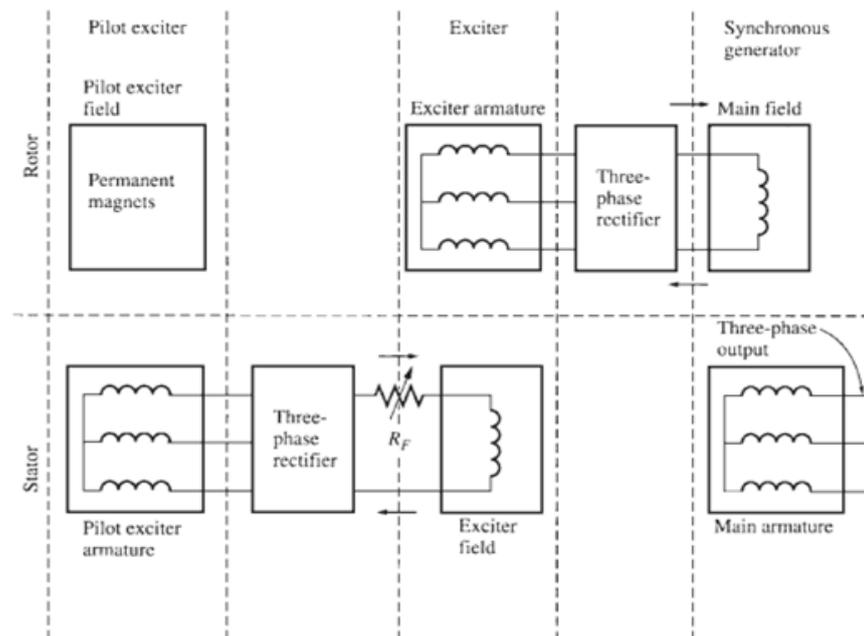
Sumber: <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/11/17/generatorsinron4/>

Sistem eksitasi tanpa sikat membutuhkan perawatan yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem eksitasi dengan menggunakan sikat karena adanya kontak mekanis antara rotor dan stator.

B. Sistem Eksitasi tanpa Sikat dengan Menggunakan *Pilot Exciter*

Sistem eksitasi tanpa sikat dapat dibuat sama sekali pada sumber listrik dari luar dengan menggunakan *pilot exciter* berukuran kecil. *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator arus bolak-balik dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator. *Pilot exciter* menghasilkan daya yang

dibutuhkan oleh rangkaian medan *exciter* yang digunakan untuk mengendalikan rangkaian medan generator utama. Ketika *pilot exciter* digunakan, generator dapat beroperasi tanpa sumber listrik dari luar.¹⁰



Gambar 2.6. Sistem Eksitasi tanpa Sikat dengan Menggunakan *Pilot Exciter*

Sumber: <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/11/17/generatorsinkron4/>

2.1.2.3. Struktur Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi sebagian besar tersusun oleh lima komponen berikut:

- Komponen suplai tenaga eksitasi: transformator eksitasi (TE)
- Komponen kontrol: *automatic voltage regulator* (AVR)
- Komponen tenaga: penyearah tenaga jembatan (SCR)

¹⁰ <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/11/17/generator-sinkron-4/>. pada tanggal 4 Juni 2015 pukul 20.27

- Komponen medan sesaat dan deeksitasi: lemari pemutus beban (FCB)¹¹
- Komponen proteksi tegangan lebih: lemari proteksi (PRC)

A. Transformator Eksitasi (TE)

Transformator eksitasi (TE) adalah sumber tenaga eksitasi dan mengisolasi peralatan eksitasi dari terminal generator secara elektrik. Sisi tegangan tinggi dihubungkan dengan terminal generator dan sisi tegangan rendah dihubungkan dengan sisi AC penyearah. Kapasitas dan rasio transformasi ditentukan menurut karakteristik eksitasi generator agar dapat memenuhi operasi generator yang disyaratkan.

B. Penyearah Tenaga (SCR)

Penyearah tenaga mengubah suplai tenaga AC yang disalurkan oleh transformator eksitasi ke suplai tenaga DC dan menyalurkan ke rangkaian medan magnet generator. Sesuai dengan nilai arus medan, beberapa penyearah jembatan beroperasi secara paralel untuk membagi arus medan secara bersama. Ketika suatu lengan tertentu ada gangguan, penyearah jembatan dapat menyediakan arus medan yang stabil untuk generator.

Parameter generator dan tipe SCR menentukan jumlah jembatan paralel dan arus keluaran tiap jembatan. Secara umum, ketika satu

¹¹ Heri Irawan. *Sistem Penguatan Dengan Sikat (Brush Excitation System) Pada Generator Unit 1 PLTU Cilacap* (Semarang: Universitas Diponegoro, 2010), h. 3.

jembatan keluar dari operasi, perlengkapan operasi eksitasi masih dapat memenuhi keluaran nominal generator.

C. Pemutus Rangkaian Medan (FCB)

FCB terletak antara kumparan medan dan penyearah jembatan. Keluaran DC dari penyearah jembatan mengalir ke kumparan medan generator. Itu merupakan bagian penting rangkaian deeksitasi. Dibawah kondisi genting, itu dapat dipisahkan secara cepat dan mentransfer energi medan ke resistor pelepasan untuk menjamin keamanan generator.¹²

D. Automatic Voltage Regulator (AVR)

AVR (*automatic voltage regulator*) adalah sebuah sistem kelistrikan yang 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 AVR adalah mengatur arus penguatan (*excitacy*) pada *exciter*. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada *exciter*. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi

¹² Ibid, h. 4.

arus penguatan pada *exciter*. Disamping sebagai pengatur tegangan rangkaian AVR juga dilengkapi alat pengontrol untuk menjamin keandalan generator. AVR dihubungkan dengan belitan stator generator utama melalui isolating transformer yang berfungsi mengontrol daya yang disuplai pada stator *exciter* dan sampai pada belitan rotor generator utama untuk menjaga tegangan keluaran pada batas yang ditetapkan.¹³

2.1.2.4. Prinsip Kerja Pada Sistem Eksitasi dengan Sikat (*brush excitation*)

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan shunt yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator

¹³ Nur Ilham Luthfi, Hermawan. *Sistem Eksitasi Generator Dengan Menggunakan AVR di PT. Geo Dipa Energi Unit 1 Dieng* (Semarang: Universitas Dipenogoro, 2012), h. 5.

utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama oleh generator penguat kedua, tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah.

Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Pengaturan tegangan otomatis pada awalnya berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik.

Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar.¹⁴

¹⁴ Wisna Dwi Ariani, Tejo Sukmadi, *Sistem Penguat Medan Magnet Tanpa Sikat (Brushless Excitation System) dan Pemeliharaannya Pada Generator Unit 2 PLTG Cilacap* (Semarang: Undip, 2012), h. 4.

2.1.2.5. Prinsip Kerja Sistem Eksitasi tanpa Sikat (*brushless excitation*)

Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut main exciter (penguat utama). 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 penguat generator utama. *Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*automatic voltage regulator/AVR*).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan main exciter, maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.¹⁵ Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitatioan*), antara lain :

1. Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaf*), sehingga keandalannya tinggi.
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.

¹⁵ Ibid, h. 5.

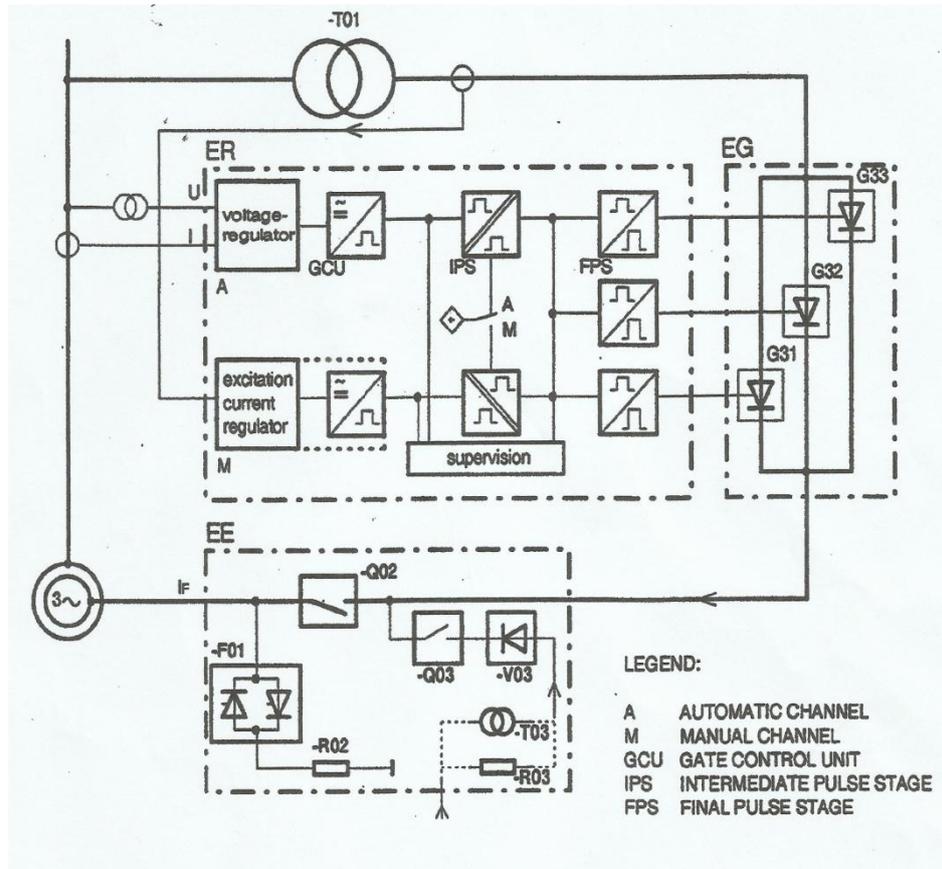
3. Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan akibat udara buruk (*bad atmosphere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*generator field breaker*), *field generator* dan bus eksitasi atau kabel tidak diperlukan lagi.
7. Biaya pondasi berkurang, sebab saluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi.¹⁶

Pada sistem Eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur 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.

2.1.2.6. Sirkulasi Sistem Eksitasi Statis Generator Blok 2 Unit 3

Peralatan eksitasi statis mengatur tegangan generator (dan atau daya reaktif selama generator beroperasi paralel dengan sistem) dengan jalan mengontrol langsung arus rotor menggunakan *thyristor converters*.

¹⁶ Suyitno. *Pembangkit Energi Listrik* (Jakarta: Rineka Cipta, 2011), h. 141.



Gambar 2.7. Single Line Sistem Eksitasi Statis

Sumber: Operation & Maintenance Manual Static Excitation.doc, 2010

Unit eksitasi dapat dipisahkan ke dalam 4 bagian utama :

1. *Excitation transformer* (-T01)
2. *Control unit* (ER)
3. *Converter* (EG)
4. *Field Flashing and deexcitation equipment* (EE)

Pada sistem eksitasi shunt, daya eksitasi diambil dari generator stator. Arus medan untuk rotor mengalir melalui *excitation transformer* (-T01), *converter* (EG), dan *field circuit breaker* (-Q02). *Excitation transformer* menurunkan tegangan generator ke level yang diperlukan oleh *converter*, memberikan isolasi galvanis antara terminal generator dan belitan medan

dan bertindak pada saat bersamaan seperti *commutating reactance* untuk *converter*. *Converter* (EG) mengubah arus 3 fasa menjadi arus DC yang teregulasi.

Dalam sistem eksitasi tipe shunt, tidak terdapat cukup medan sisa di dalam generator untuk menghasilkan tegangan generator melalui *converter*. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan *special field flashing equipment*. Ketika peralatan *field flashing* disuplai oleh daya dari sumber DC (*battery*), arus *field flashing* dibatasi oleh sebuah resistor. Ketika disuplai dari sistem AC, sebuah transformer beroperasi sebagai *adapter*.

Eksitasi generator diaktifkan dengan menutup *field circuit* (-Q02) dan *field flashing breaker* (Q03). *Breaker* tersebut menyuplai arus ke medan yang akan mengeksitasi generator sampai dengan 15 – 30% U_g . Generator kemudian menyuplai tegangan ke *converter* melalui *excitation transformer*. Mulai dengan 10% tegangan generator, firing elektronis dan *converter* dapat meneruskan kenaikan tegangan, sehingga rangkaian *field flashing* dapat mengurangi arus. Saat tegangan mencapai 70% dari U_g , *field flashing breaker* akan terbuka dan tidak ada lagi arus yang lewat. Dioda bridge pada input *field flashing breaker* mencegah aliran balik dari arus ke sumber *field flashing*. *Redundancies* dalam sistem menjamin reliabilitas dan kesiediaan dari peralatan eksitasi.¹⁷

Converter (EG) dibagi menjadi 3 *converter* blok yang berdiri sendiri G31, G32, G33. Jika salah satu *converter* blok gagal, sistem tetap dapat

¹⁷ ABB. *Operation & Maintenance Manual Static Excitation.doc* (Swiss: ABB, 2010), h. 13

beroperasi dengan menggunakan blok lainnya (*n-1 redundancy*). Setiap blok tersebut memiliki *final pulse stage*, pendingin dan peralatan monitoring masing-masing. *Redundance* di regulator dijamin oleh 2 *channel* yang terpisah dengan pengukuran pada input dan ekstensive monitoring yang berdiri sendiri (SUPERVISION).

Channel 1 (AUTOMATIC channel) difungsikan sebagai voltage regulator dan ON selama beroperasi normal. Sebagai tambahan pada voltage regulator, yang mempunyai algoritma kontrol PID (Proportional, Integral, Differential), AUTOMATIC channel juga terdiri dari berbagai limiters (pembatas) dan *corrective control circuit* untuk menjamin kestabilan operasi generator sampai batas maksimum yang diijinkan. Channel ini memiliki sebuah *gate control unit* dengan *intermediate pulse stage* yang membangkitkan firing pulse untuk *thyristor converter*. Selama beroperasi normal (AUTO), *intermediate pulse stage* dari AUTOMATIC channel dalam posisi aktif dan mengirimkan firing pulse yang terpisah secara galvanis ke *common pulse bus* pada input dari *final pulse stage*. Berbagai fungsi monitoring dari AUTOMATIC channel dan pulse monitoring pada *common pulse bus* mengirimkan sinyal *automatic switch-over* ke channel 2 pada saat terjadi *malfunction*.

Channel 2 (MANUAL channel) difungsikan sebagai *field current regulator* yang sederhana dengan algoritma kontrol PI (Proportional, Integral). Peralatan ini berfungsi sebagai *back-up* channel dalam kondisi di mana terjadi *malfunction* pada AUTOMATIC channel, dan juga dapat

digunakan untuk *commissioning* serta digunakan sebagai alat untuk pengujian khusus. Pada channel ini tidak terdapat limiters (pembatas) yang menjamin agar generator tetap beroperasi dalam batas operasi. Untuk alasan ini maka pengoperasia dengan *field current regulator* memerlukan pengaturan yang benar pada titik operasi generator dan monitoring yang terus-menerus oleh operator. Bilamana batas operasi generator tercapai, *safety device* merespon segera, dengan jalan mematikan eksitasi dan generator.

MANUAL channel memiliki *gate control unit* sendiri (software untuk If regulator juga diaplikasikan di channel ini) dan *intermediate pulse stage* sendiri juga. Selama beroperasi normal (AUTOMATIC), *intermediate pulse stage* ini menahan firing pulse agar tidak mencapai pulse bus. Berbagai monitoring pada MANUAL channel dan monitoring pulse pada input *intermediate pulse stage* akan mengirimkan sebuah alarm dalam kondisi di mana terjadi *malfunction* ketika MANUAL channel dalam kondisi *stand-by*. Jika MANUAL channel mendeteksi adanya *malfunction* saat MANUAL channel tersebut beroperasi, maka sistem eksitasi akan trip.

Kedua channel dilengkapi dengan peralatan *tracking* sehingga channel yang tidak aktif selalu membangkitkan variabel kontrol yang sama dengan channel yang aktif selama beroperasi dalam kondisi *steady state*. Hal ini dimaksudkan untuk menjamin *switch-over* yang mulus dari AUTOMATIC channel ke MANUAL channel dan sebaliknya. Untuk

menjamin bahwa MANUAL channel akan (jika ada *malfunction*) mengambil alih titik operasi sebelum terjadi permasalahan, maka respon *tracking* dari MANUAL channel di set relatif lambat.

Sebagai tambahan untuk pulse monitor (“SUPERVISION”) seperti yang ditunjukkan dalam *basic circuit diagram*, sistem eksitasi memiliki monitoring yang berdiri sendiri. Salah satu fungsinya adalah memantau arus medan apakah masih dalam limit yang bisa diterima. Peralatan tersebut akan mengirimkan *switch-over* ke MANUAL channel bilamana arus medan mencapai preset limit. Jika (bahkan setelah *switch-over*) arus medan tidak turun kembali ke level yang diijinkan, sistem eksitasi akan dimatikan oleh proteksi. Pengukuran yang paling penting pada input sistem eksitasi (If, UG, Usyn) memiliki sistem *redundant*. Monitoring sistem eksitasi memeriksa apakah pengukuran tersebut masuk akal atau tidak. Sebuah alarm akan selalu dikirimkan dalam kondisi di mana terjadi *malfunction*. Dalam kasus tertentu, *switch-over* ke channel 2 juga diinisiasikan. Sebagai peralatan tambahan, monitoring eksitasi juga terdiri dari monitor arus untuk memeriksa konduktansi arus dalam semua *tyristor*.

Sistem eksitasi terdiri dari sistem proteksi yang berdiri sendiri untuk melindungi trafo eksitasi, *converter*, dan generator. Seperti monitoring sistem eksitasi, sistem proteksi ini memeriksa apakah arus medan yang tinggi masih dalam batas yang diizinkan. Sistem proteksi tersebut juga dapat mendeteksi *short-circuit* di dalam rangkaian eksitasi dan menjaga

peralatan dari kerusakan dalam batas operasi melalui *tripping* yang cepat dari sistem eksitasi dan pembukaan generator *breaker*. *Overheating* dari trafo eksitasi akan ditunjukkan oleh alarm (pada preset limit) dan kemudian akan mengirimkan sinyal *protective shut-down* (pada limit yang lebih tinggi). Proteksi *over-voltage* (CROWBAR) dalam peralatan *deexcitation* EE menyediakan fungsi proteksi untuk rotor dan *rectifier*. Sistem proteksi ini memonitor tegangan medan pada kedua polaritas dan jika perlu *deenergize* medan melalui *deexcitation* resistor.¹⁸

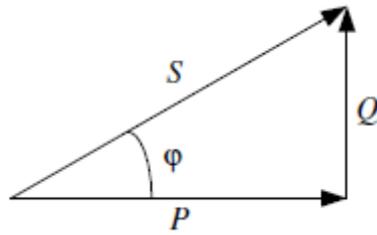
2.1.3. Daya

Daya dalam sistem tenaga listrik adalah jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasa dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horsepower* (HP). Watt merupakan perkalian arus 1 Ampere dan tegangan 1 Volt. sedangkan *Horsepower* merupakan satuan listrik dimana 1 HP adalah 746 watt atau 1bft/second.

2.1.3.1. Segitiga Daya

Segitiga daya adalah segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe-tipe daya yang berbeda antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif berdasarkan prinsip trigonometri

¹⁸ Ibid, h. 14



Gambar 2.8. Segitiga daya

Dimana berlaku hubungan :

$$S = V.I$$

$$P = S.\cos \varphi$$

$$Q = S.\sin \varphi$$

2.1.3.2. Daya Semu

Daya semu adalah penjumlahan secara vektor antara daya aktif dan daya reaktif, dimana :

$$S = P + jQ, \text{ mempunyai nilai/ besar dan sudut}$$

$$S = S \angle \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \varphi$$

Untuk mendapatkan daya satu fasa, maka dapat diturunkan persamaannya seperti di bawah ini:

$$S = P + jQ$$

$$S = V.I \cos \varphi + j V.I \sin \varphi$$

$$S = V.I. (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

$$S = V.I e^{j \varphi}$$

$$S = V.I \angle \varphi$$

$$S = V.I$$

Sedangkan untuk tiga phasa, persamaan daya semu adalah

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

Keterangan: S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus Listrik (A)

2.1.3.3. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Daya aktif memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\text{Untuk 1 Fasa} \quad P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$\text{Untuk 3 Fasa} \quad P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

2.1.3.4. Daya Reaktif

Daya reaktif generator adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk *fluks* medan magnet. Contoh peralatan yang menmbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar. Satuan daya reaktif adalah VAR

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (1 Fasa)}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (3 Fasa)}^{19}$$

¹⁹ Alto Belly dkk. *Daya Aktif, Reaktif & Nyata* (Depok: UI, 2010), h. 4.

Daya reaktif, daya penyeimbang untuk mempertahankan batas-batas tegangan keluaran (pada generator), atau sebagai daya peredam karena reaktans beban atau saluran. Sekalipun daya ini tidak bisa diubah menjadi energi kerja, tetapi keberadaannya pada generator sangat diperlukan untuk menstabilkan tegangan, khususnya pada masa peralihan saat terjadi perubahan beban, sementara itu belum diikuti oleh perubahan daya nyata. Peran daya reaktif menstabilkan tegangan agar tegangan tersebut mampu mendorong arus ke beban

2.1.3.5. Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \varphi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan daya aktif (P) dan daya semu (S) dan digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \varphi$. Sudut antara daya semu dan daya aktif ini disebut φ (phi)

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya} &= \frac{\text{Daya aktif (P)}}{\text{Daya semu (S)}} \\ &= \frac{V.I.\cos \varphi}{V.I} \\ &= \cos \varphi \end{aligned}$$

Faktor daya mempunyai nilai range antara 0-1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen. Faktor daya yang bagus apabila bernilai mendekati 1.

$$\tan \varphi = \text{Daya Reaktif (Q)} / \text{Daya Aktif (P)}$$

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen VA dan VAR berubah sesuai dengan faktor daya), maka dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = \text{Daya Aktif (P)} \times \tan \phi$$

2.1.4. Efek Pengaturan Arus Eksitasi

Dalam pengaturan arus eksitasi maka besar nilai dari fluks magnetik (ϕ) akan berubah seiring dengan perubahan arus eksitasi. Hal ini juga akan mempengaruhi besarnya ggl induksi yang terbentuk pada generator.

Dalam hal ini dapat diperjelas pada rumus berikut:

$$\phi = B \cdot A \quad (2.1)$$

dimana :

ϕ = Fluks magnetik (weber)

B = Rapat fluks

A = Luas penampang inti (m^2)

Rapat fluks magnet (B) sangat dipengaruhi oleh kuat intensitas medan magnet yang terjadi, maka ia juga sangat dipengaruhi dan ditentukan oleh permeabilitas dari bahan yang digunakan. Ini dapat dijabarkan dengan rumus berikut:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2.2)$$

dimana:

μ_0 = permeabilitas relatif bahan

H = intensitas medan magnet (amp.lilit/meter)

Besarnya intensitas medan magnet didefinisikan dengan besarnya gaya gerak magnet yang terjadi dan berbanding terbalik dengan panjang inti magnet yang digunakan.

$$H = \frac{F}{l} \quad (2.3)$$

Dimana:

$$F = N.I \quad (2.4)$$

Ket:

F = Gaya gerak magnet (Amper lilitan)

N = Jumlah lilitan

I = Kuat arus (Amper)

l = panjang rata-rata inti (meter)

Dengan memasukan persamaan 2.4 maka didapatkan persamaan intensitas medan magnet adalah:

$$H = \frac{N.I}{l}$$

Dari penjabaran rumus di atas maka didapatkan persamaan fluks medan magnet (ϕ) adalah:

$$\phi = \frac{\mu_0 N.I.A}{l}$$

Fluks magnetik mempengaruhi ggl induksi yang terbentuk hal ini dapat dijelaskan dalam rumus berikut:

$$E = \frac{4,44 n.p.\phi T}{120}$$

bila $C = \frac{4,44pT}{120}$, maka:

$$E = Cn\phi$$

dimana: $E =$ ggl induksi (Volt) $n =$ Putaran (rpm)

$\phi =$ Fluks magnetik (weber) $C =$ Konstanta Mesin ($4,44pT/120$)

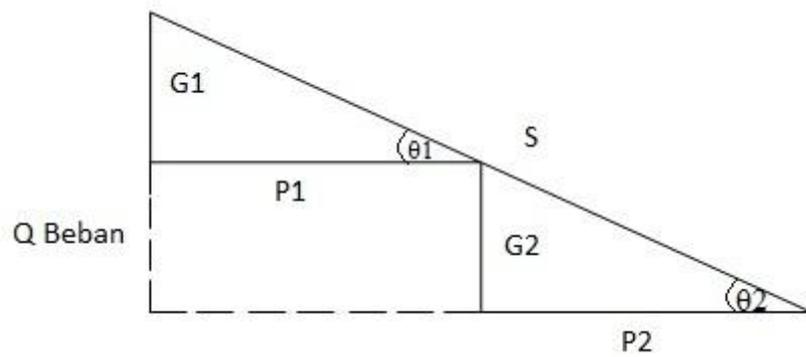
dengan memasukkan persamaan fluks medan magnet kedalam persamaan di atas maka didapatkan persamaan:

$$E = \frac{C.n.\mu_0.N.I.A}{l}$$

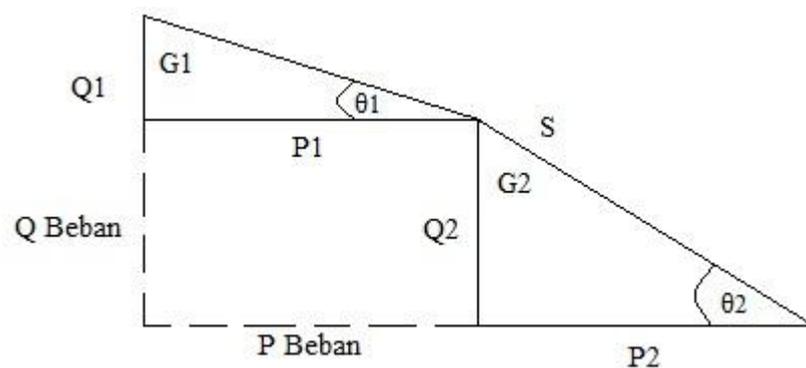
Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa pengaruh arus eksitasi sebagai arus penguatan medan magnet akan mempengaruhi fluks magnetik yang terbentuk sehingga mengubah daya reaktif, namun besar daya aktifnya tidak berubah sehingga akan merubah faktor daya.

Jika generator G_1 dan G_2 bekerja paralel maka masing-masing alternator akan memasok beban setengah dari daya aktif dan setengah dari daya reaktif. Masing-masing alternator memaasok arus sebesar I , sehingga arus beban yang pasok sebesar $2I$. Bila penguatan eksitasi G_1 dinaikkan maka besarnya E_1 akan lebih dari besaran awalnya sehingga $E_1 > E_2$.

Berikut adalah gambar segitiga daya akibat perubahan eksitasi pada alternator yang bekerja paralel:



a) Kondisi 1



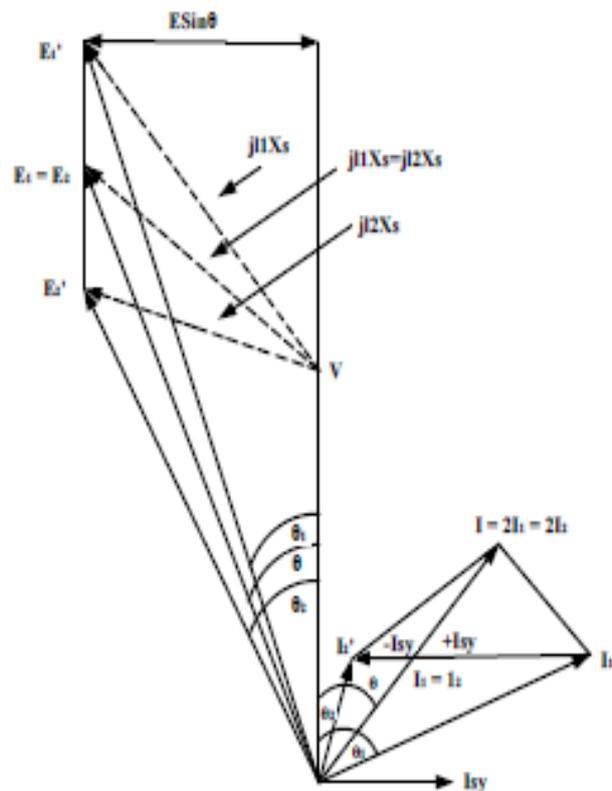
b) Kondisi 2

Gambar 2.9. Segitiga Daya Alternator yang Terhubung Paralel Akibat Efek Perubahan Penguatan

Sumber: Dokumentasi Sendiri

Pada kondisi 1, beban yang di pikul G_1 dan G_2 sama besarnya, sehingga beban daya aktif dan daya reaktif di bagi rata. Jika penguatan G_1 dinaikkan, dan arus penguatan G_2 maka akan merubah pembagian daya reaktif pada masing masing alternator sehingga berpengaruh terhadap faktor daya masing masing alternator. Hal ini dapat dilihat pada kondisi 2.

Pengaruh perubahan eksitasi pada kinerja generator dapat dijelaskan dengan bantuan diagram fasor yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.10. Diagram Fasor Akibat Efek Perubahan Penguatan

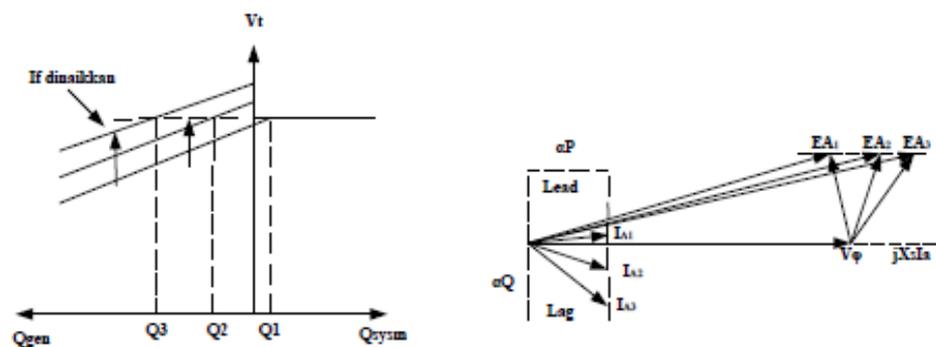
Sumber: Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya, 2014

Pada gambar dapat dilihat dua alternator yang bekerja secara paralel. Jika arus eksitasi G_1 meningkat sehingga ggl induksi E_1 meningkat menjadi E_1' yang akan mencoba untuk meningkatkan tegangan terminal V . Tapi tegangan terminal V dijaga konstan dengan mengurangi arus eksitasi G_2 . Peningkatan E_1 dan E_2 penurunan disesuaikan sedemikian rupa bahwa $E \sin \theta$ tetap konstan. Perbedaan antara E_1' dan E_2' menimbulkan arus sirkulasi I_{SY} . Arus ini harus ditambahkan ke I_1 dan dikurangi dari I_2 yang akan memberikan arus jangkar baru I_1' dan I_2' .²⁰ Peningkatan besarnya I_1' tetapi

²⁰ Basofi. *Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya* (Medan: Universitas Sumatera Utara, 2014), h. 21.

komponen aktif $I_1' \cos \phi_1$ tidak berubah. Demikian juga I_2' yang besarnya menurun tetapi komponen aktif $I_2' \cos \phi_2$ tidak terpengaruh. Maka arus beban, tegangan terminal dan faktor daya beban tidak berubah. Namun arus jangkar, ggl induksi dan faktor daya untuk masing-masing alternator berubah.²¹

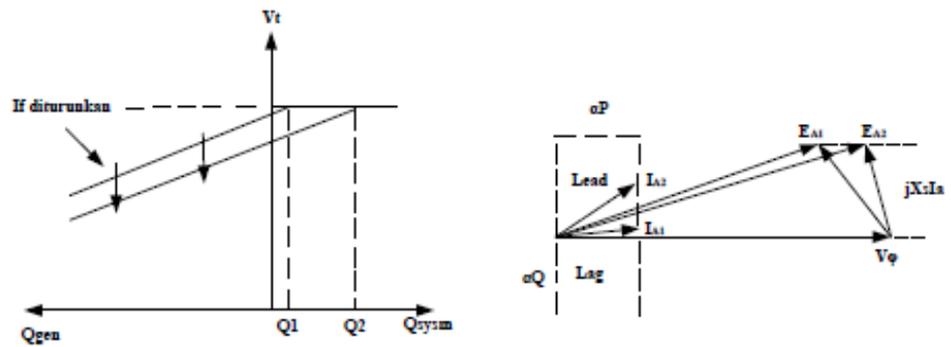
Pada kondisi perubahan penguatan masing-masing generator, jika generator dengan arus eksitasi diperbesar (*over excited*), berarti mencatu arus tertinggal ke sistem (*lagging*), yang berarti generator menarik arus mendahului dari sistem atau istilahnya mengirim daya reaktif ke sistem. Demikian pula arus eksitasi dikurangi (*under excited*) maka generator dinyatakan mencatu arus mendahului sistem (*leading*) atau dinyatakan menarik arus tertinggal dari sistem atau istilahnya menarik daya reaktif dari sistem. Hal tersebut dapat pula dilihat pada diagram rumah (*house diagram*) daya reaktif berikut.



Gambar 2.11. Diagram Rumah Jika Arus Eksitasi Dinaikkan

Sumber: Electric Machinery Fundamentals, 4rd Edition, 2004

²¹ Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*, 4rd Edition (Australia: Mc Graw – Hill Book Company, 2004).



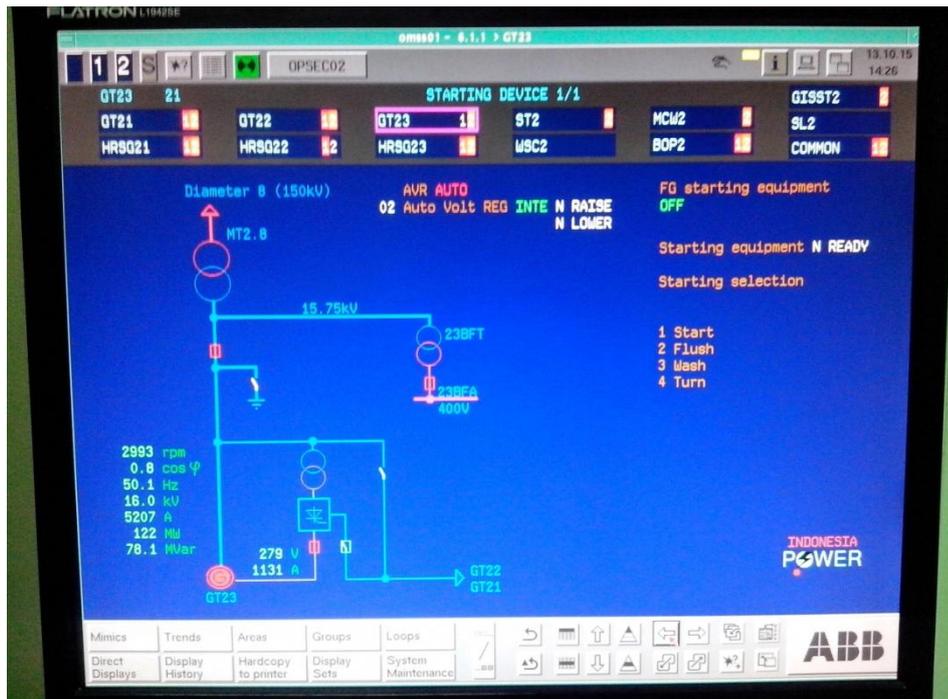
Gambar 2.12. Diagram Rumah Jika Arus Eksitasi Diturunkan

Sumber: Electric Machinery Fundamentals, 4rd Edition, 2004

Dapat dilihat bahwa perubahan arus eksitasi akan merubah besarnya fluks magnetik generator. Kemudian akan merubah besarnya E_a . Jika E_a berubah sementara $E_a \sin \delta$ tetap konstan, maka fasor E_a akan bergeser sepanjang garis konstan. Karena V_ϕ konstan, sudut dari $jX_s I_a$ berubah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 bila eksitasi dinaikkan dan gambar 2.11 bila eksitasi diturunkan. Hal ini mengakibatkan Q ($I_1 \sin \theta$) mengalami perubahan. Dengan kata lain dapat disimpulkan bahwa, peningkatan arus medan pada generator sinkron yang bekerja paralel terhadap *infinite bus* akan meningkatkan daya reaktif keluaran generator.

2.1.5. Program yang Digunakan pada Pengukuran Parameter Kelistrikan

Dalam pengukuran parameter kelistrikan memerlukan program yang digunakan guna merekam pemakaian energi serta program untuk mengolah rekaman tersebut dan menyajikannya menjadi sebuah data. Program yang digunakan adalah SCADA.



Gambar 2.13. SCADA PT Indonesia Power UBP Priok

Sumber : Dokumentasi Sendiri

2.1.6. Gambaran Umum UBP Priok

Unit Bisnis Pembangkitan Priok ini menempati areal seluas 28 ha di tepi pantai Jakarta Utara, mengelola sejumlah pusat listrik tenaga thermal yang menggunakan bahan bakar gas alam, minyak residu (MFO) dan minyak solar (HSD) dengan kapasitas terpasang sebesar 1.455,68 MW.

Tabel 2.1 Unit Bisnis Pembangkitan Priok

Mesin	Daya Terpasang	Merek Turbin	Tahun
Pembangkit			Operasi
PLTGU GT 1-1	130 MW	ABB	1993
PLTGU GT 1-2	130 MW	ABB	1993

PLTGU GT 1-3	130 MW	ABB	1993
PLTGU ST 1-0	200 MW	ABB	1994
PLTGU GT 2-1	130 MW	ABB	1994
PLTGU GT 2-2	130 MW	ABB	1994
PLTGU GT 2-3	130 MW	ABB	1994
PLTGU ST 2-0	200 MW	ABB	1994

Unit bisnis Pembangkitan Priok merupakan salah satu Unit Bisnis Pembangkitan besar yang dimiliki oleh PT. Indonesia Power. Saat ini terpasang 16 unit pembangkit terdiri dari dua unit PLTG siklus terbuka, enam unit PLTD, dua blok PLTGU yang setiap bloknya terdiri dari 3 unit turbin gas dan 1 unit PLTU.²²

2.2. Kerangka Berfikir

Dengan landasan teori diatas, maka dapat disusun kerangka berfikir bahwa perubahan yang terjadi pada arus eksitasi dikarenakan dibutuhkannya pula perubahan pada daya reaktif generator guna menjaga tegangan yang tetap stabil agar unit pembangkit yang tersambung secara paralel tidak mengalami *trip* yang mengakibatkan terlepasnya unit pembangkit dari sistem. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan data-data arus eksitasi dan data-data daya reaktif PLTGU UBP Priok generator gas turbin blok 2 unit 3 dan menentukan apakah mengubah arus eksitasi akan mengubah daya reaktif.

²² www.indonesiapower.co.id