

## BAB 11

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Muzayyin (2018), melakukan analisis tentang sistem eksitasi statis pada PLTA di Wonogiri, dimana peralatan yang digunakan pada sistem eksitasi statis yaitu menggunakan peralatan yang diam dengan kata lain bagiannya tidak ikut bergerak dengan mesin. Dengan menggunakan sistem eksitasi statis ini berarti tegangan yang digunakan untuk proses eksitasi di dapatkan dari keluaran tegangan generator itu sendiri yang mana prosesnya arus yang didapatkan dari generator di turunkan terlebih dahulu menggunakan transformator step down lalu di searahkan arusnya menjadi arus DC menggunakan *rectifier* yang digunakan sebagai arus eksitasi, maka sistem eksitasi ini tidak memerlukan generator lagi sebagai pengatur arus eksitasi untuk di alirkan ke generator utama.

Pada Analisa yang dilakukan terhadap beban dan tegangan didapatkan bahwa nilai pembebanan memiliki besaran yang berubah-ubah setiap waktunya dikarenakan pemakaian beban yang tergantung pada konsumen, perubahan beban ini mengakibatkan ketidak stabilan pada tegangan dalam kata lain tegangan yang menurun pada terminal tegangan, lalu secara otomatis nilai dari proses sistem eksitasi akan meningkat agar dapat menstabilkan keluaran tegangan dari generator yang disebabkan oleh beban yang berubah-ubah

Sentosa (2018), melakukan perhitungan dan analisis sistem eksitasi terhadap performa generator sinkron di PLTU surabaya unit 3, Analisis yang telah dilakukan menyatakan bahwa nilai arus eksitasi ( $i_f$ ) mengalami kenaikan yang menyebabkan nilai arus jangkar juga meningkat, selain itu penulis juga menyatakan bahwa arus eksitasi ( $i_f$ ) sebanding dengan tegangan keluaran generator ( $v_t$ ) dan ggl induksi ( $E_a$ ) dikarenakan semisal kondisi tegangan generator mengalami penurunan, maka arus eksitasi yang disuplai otomatis akan meningkat dan menyebabkan nilai GGL induksi juga meningkat.

Thomas W. Eberly, dkk (2002) dalam tulisannya yang berjudul *Voltage Versus Var/Power-Factor Regulation on Synchronous Generator* menyatakan bahwa generator sinkron yang menggunakan *brush* dalam proses sistem eksitasinya harus mengoptimalkan penggunaan dan pemeliharannya agar bisa melakukan perawatan seminimum mungkin untuk alasan efisiensi waktu dan kualitas dari sikat *carbon brush*. *Brush* digunakan untuk mengalirkan arus DC ke cincin kolektor rotor atau ke *slipring*. Pemilihan *brush* didasarkan kepada tingkat besar arus yang akan melewati *carbon brush* karna akan berpengaruh kepada kualitas rotor *slipring* yang bergesekan dengan *carbon brush*, jika penggunaan ukuran *carbon brush* yang berlebihan bisa menyebabkan gesekan yang berlebihan dan menghasilkan uraian partikel yang berlebihan dan pendistribusian yang tidak merata pada *slipring* dan juga bisa berdampak pada arus yang mengalir dari sistem eksitasi ke rotor generator.

Bandri (2013) dalam penelitian yang di lakukan oleh penulis bahwa dalam mengoprasikan generator sinkron harus selalu stabil dalam pengoprasiaanya agar kinerja dari generator dapat tetap stabil dan selalu efisien sehingga bisa mendapatkan nilai keluaran dari generator yang stabil. Saat pengoprasian generator sinkron selalu ada Batasan tertentu dari besarnya daya yang dapat dihasilkan dan besarnya daya yang dibebani oleh sebuah generator sinkron agar dapat bekerja dengan stabil.

Pembangkitan nilai GGL induksi pada generator sinkron membutuhkan arus penguatan (eksitasi) agar bisa mendapataka nilai fluktuasi magnetic yang ada pada kutub-kutub medan generator yang terletak pada rotor, sistem eksitasi sangat menentukan kestabilan tegangan yang di hasilkan ooleh sebuah generator. Nilai GGL induksi yang di hasilkan dari proses sistem eksitasi sangat berpengaruh pada performa hasil dari generator sinkron, penulis menyatakan bahwa Nilai GGL induksi pada factor daya *lagging* lebih besar dari nilai GGL induksi pada factor daya *leading*. Dari perbandingan Analisa yang penulis lakukan diketahui bahwa semakin besar beban yang ditempatkan pada sistem, maka arus medan akan semakin besar, yaitu lebih besar pada saat nilai *lagging* dari pada saat nilai arus saat *leading*. Perubahan arus beban juga

terjadi akibat adanya perubahan nilai beban yang terpakai sehingga juga akan mempengaruhi nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator itu sendiri.

Irawan (2010), dalam penelitian yang berjudul sistem penguatan dengan sikat pada generator unit 1 PLTU Cilacap menyatakan bahwa Nilai arus eksitasi harus selalu di jaga agar selalu sesuai dengan arus dasar pada sistem eksitasi sehingga bisa mendapatkan kestabilan sistem secara keseluruhan, selain itu penulis menyatakan bahwa sistem eksitasi yang baik adalah sistem eksitasi yang memiliki respon yang cepat ketika terjadi gangguan internal maupun eksternal yang mampu mengganggu kinerja generator.

Bindar (2016), dalam penelitian yang berjudul Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Keluaran Daya Reaktif Generator Sinkron 13,8KV 67MVA, penulis menyampaikan bahwa ketika generator sinkron bekerja secara parallel, dimana dengan diaturnya arus eksitasi sedangkan nilai putaran ( $n$ ) tetap, maka akan menyebabkan kenaikan nilai fluktuasi magnetic sehingga mengubah daya reaktif serta tegangan yang keluar dari generator namun tidak merubah dan tidak berdampak pada keluarnya daya aktif sehingga akan merubah nilai factor daya. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sifat arus eksitasi berbanding lurus dengan keluaran tegangan dari generator dan daya reaktifnya.

Rendahnya daya reaktif dan tegangan generator berbeban bisa disebabkan karena kecilnya permintaan beban dari konsumen yang diikuti kecilnya pengaturan arus eksitasi, selain itu juga karena peralatan eksitasi yang kemungkinan sudah rusak dan kurangnya pemelahaarn rutin yang menyebabkan kinerja dari sistem eksitasi tersebut menurun. Sedangkan ketika tingginya daya reaktif dan tegangan dari generator sinkron bisa di sebabkan karena tingginya permintaan beban dari konsumen yang kemudian pengaturan arus eksitasinya di perbesar.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Generator Sinkron

Dalam sebuah pembangkit tenaga listrik salah satu komponen yang paling penting adalah generator. Secara garis besar generator dalam proses pembangkitan listrik berfungsi sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang diproses di dalam sistem generator tersebut yang nantinya akan disalurkan ke konsumen. Generator yang digunakan pada pembangkit listrik biasanya merupakan generator AC 3 fasa. Pada penggunaannya generator di aplikasikan dengan mesin atau turbin sebagai tenaga penggerak mula generator agar dapat menghasilkan energi listrik.

Generator sinkron adalah sebuah mesin listrik yang dapat mengubah energi gerak (mekanik) menjadi energi listrik (elektrik). Energi yang menggerakkan generator sendiri sumbernya bermacam-macam. Pada pembangkit listrik tenaga uap misalnya generator bergerak karena disambungkan dengan turbin uap yang berputar karena tekanan dan uap panas yang merupakan hasil dari pendidihan air pada boiler. Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday yakni apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbul gaya gerak listrik yang mempunyai satuan volt.

Dikatakan sebagai Generator Sinkron dikarenakan putaran dari rotor sama dengan kecepatan putaran medan magnetnya, yang menyebabkan kecepatan sinkron generator dihasilkan dari kecepatan rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada rotor. Kumparan medan generator terdapat pada rotor, sedangkan kumparan jangkar terdapat pada bagian yang diam yaitu stator. Bagian rotor generator yang terdiri dari belitan magnet akan mendapatkan arus searah (DC) yang berasal dari sistem eksitasi yang mana arus searah ini akan menyebabkan timbulnya fluktuasi magnet pada kumparan medan yang ada di rotor yang memiliki putaran medan magnet sama dengan

putaran rotornya, karena putarannya sama maka akan timbul listrik bolak balik (AC), Maka dari itu dapat dibuat hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$f = \frac{N \times P}{120} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

- f = Frekuensi (hz)
- N = Kecepatan putar (rpm)
- P = Jumlah kutub

Dapat dijadikan contoh, pada generator PLTU Kaltim Teluk memiliki frekuensi dan kecepatan putar yang tertera pada *nameplate* generator adalah sebesar 50 hz dan 3000 rpm maka bisa dibuat persamaanya sebagai berikut:

$$f = \frac{N \times P}{120}$$

dan

$$P = \frac{120 \times f}{N} \dots \dots \dots (2,2)$$

$$P = \frac{120 \times 50}{3000}$$

$$P = 2$$

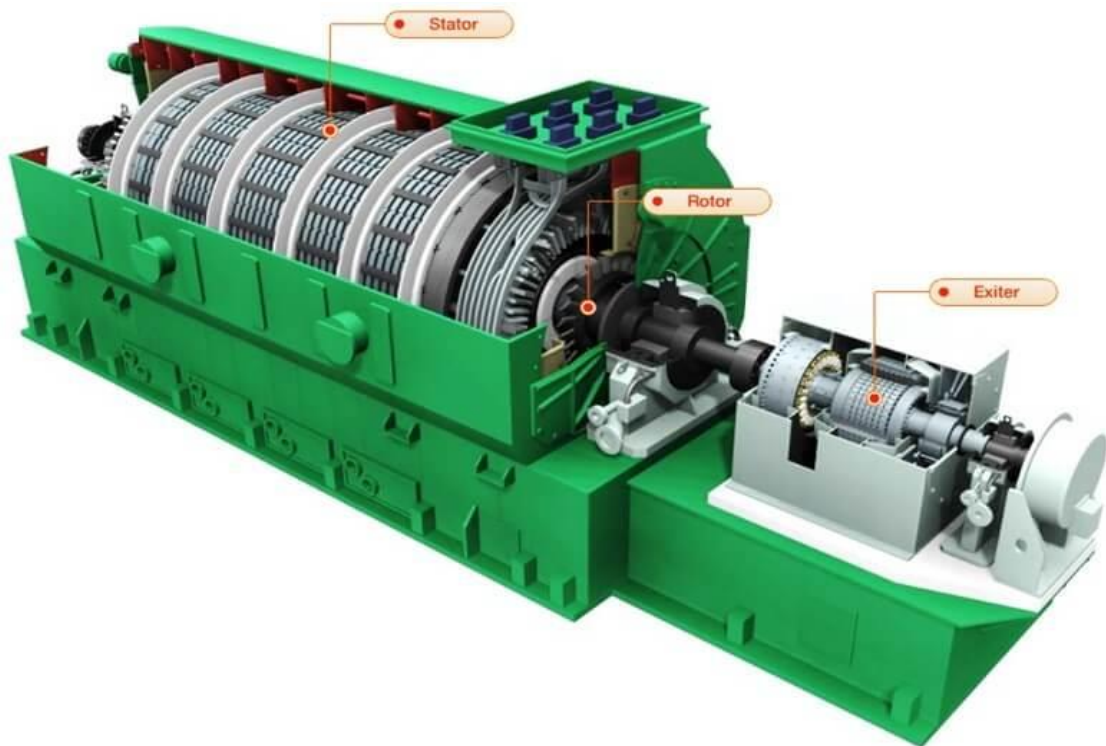
Dari hasil perhitungan diatas maka di dapatkan jumlah kutub yang berada pada generator PLTU Kaltim Teluk adalah sebanyak 2 buah, bisa di katakana bahwa jumlah kutub magnet suatu generator ditentukan berdasarkan putaran dari rotor dan frekuensi generator yang diinginkan. Sedangkan frekuensi listrik harus dijaga konstan sepanjang waktu karena perubahan dari frekuensi bisa menyebabkan berubahnya putaran rotor. Bila frekuensi listrik stabil maka bisa dikatakan indikator kualitas listrik tersebut baik,

**2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron**

Secara umum konstruksi generator sinkron sama dengan motor sinkron, yang mana bagian-bagian dari generator sinkron terdiri dari rotor,

stator dan celah udara, Stator merupakan bagian yang diam pada generator dimana terdapat kumparan jangkar yang akan menghasilkan GGL induksi pada konduktor yang berada pada kumparan jangkar,. Rotor yaitu bagian yang bergerak pada generator dimana kumparan medan terdapat pada bagian yang berputar, yang berfungsi untuk mensuplai arus searah dari sistem eksitasi. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari bagian rotor ke stator.

Konstruksi generator sinkron dapat berpengaruh kepada produksi energi listrik karena ini merupakan bagian utama dalam sistem pembangkit listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Teknologi konstruksi sangat bergantung pada kapasitas generator. Kapasitas generator pembangkitan di Indonesia sangat bervariasi karena pembangunannya disesuaikan dengan kebutuhan energi yang diminta oleh konsumen. Konstruksi generator sinkron semuanya menggunakan medan magnet putar rotor. Hal ini bertujuan untuk memudahkan penyambungan energi listrik keluar generator karena titik terminal penyambungannya terdapat pada stator generator. Tata letak keseluruhan dari rangkaian generator sinkron ini ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



gambar 2. 1 Konstruksi generator sinkron  
(Sumber: Alief, 2013)

#### 1. Rotor

Rotor merupakan komponen yang bergerak pada generator yang bergerak secara berputar. Rotor yang bergerak akan di aliri arus searah (DC) pada kumparan medan yang berada pada rotor. Prinsip kerja dari rotor adalah sebagai medan magnet yang besar yang bergerak yang kemudian di gunakan oleh stator sebagai pemicu atau pembangkit tegangan listrik. Pada rotor terdapat kumparan koil yang berada pada bagian inti rotor yang mana pada bagian ujung rotor tersebut terhubung pada slipring yang mana dihubungkan dengan sistem eksitasi untuk membangkitkan medan magnet. Ada beberapa komponen utama dalam rotor generator sinkron yaitu:



Gambar 2. 2 Konstruksi rotor  
(Sumber: Rizhal,2013)

a. *Slip ring*

*Slip ring* adalah salah satu komponen rotor generator yang berfungsi sebagai penghubung listrik searah yang merupakan hasil dari proses sistem eksitasi pada komponen yang diam dengan komponen yang berputar. Slipring terdiri dari lingkaran konduktif yang terpasang pada poros sedemikian rupa sehingga tidak terjadi hubung singkat listrik antara poros dan lingkaran konduktif. *Slip ring* terbuat dari material stainless steel yang dipasang terisolasi pada bagian ujung atas shaft generator.

Pada setiap *slip ring* terpasang bilah-bilah fan yang terbuat dari material *synthetic resin*, fan tersebut mensirkulasikan pendingin udara pada area *slip ring* dengan cara menarik udara dari *power* masuk melalui saringan pelindung yang berfungsi mendinginkan *slip ring* dan peralatan *brush*, menarik keluar debu carbon dan menghembuskan kembali udara ke *powerhouse* melalui saringan. Dari *slip ring* arus eksitasi mengalir ke atas jalur pelat tembaga didalam *shaft* kemudian ke *body* rotor dan selanjutnya mengalir ke belitan rotor generator.



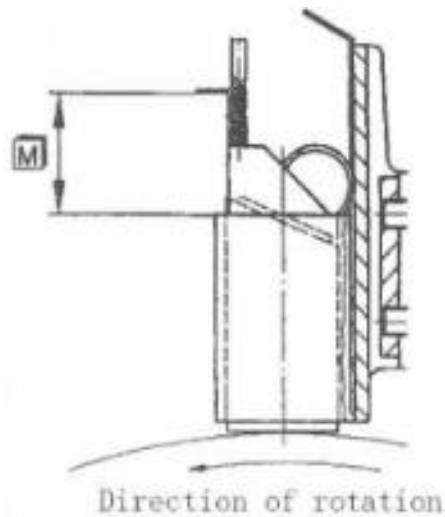


Gambar 2. 3 *slip ring*

(Sumber: Setyo Purnomo,2019)

b. Sikat (*Carbon Brush*)

*Carbon brush* adalah komponen yang terbuat dari bahan carbon/graphite yang berfungsi menghantarkan/penghubung arus eksitasi dari kabel yang diam ke bagian yang bergerak yaitu *slipring* rotor generator jumlah *carbon brush* untuk setiap unit berjumlah 30 *carbon brush* yang dimana diterbagi dalam 15 *carbon brush* (+) dan 15 *carbon brush* (-). sedangkan untuk *Brush holdernya* berjumlah 10. Tipe *carbon brush* yang digunakan di PLTU Kaltim teluk adalah LFC 544. Skema unit brush pada PLTU Kaltim Teluk dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 4 *Carbon Brush*

(Sumber: Manual book *Installing instruction*)

c. Kumparan Medan

Kumparan medan juga dikenal sebagai kumparan penguat tempat untuk menghasilkan medan magnet hasil dari sistem eksitasi yang di alirkan ke medan magnet yang ada di kutub utama rotor (*main pole*). Kumparan medan terbuat dari tembaga berlapisan perak yang dibuat dengan rapi.

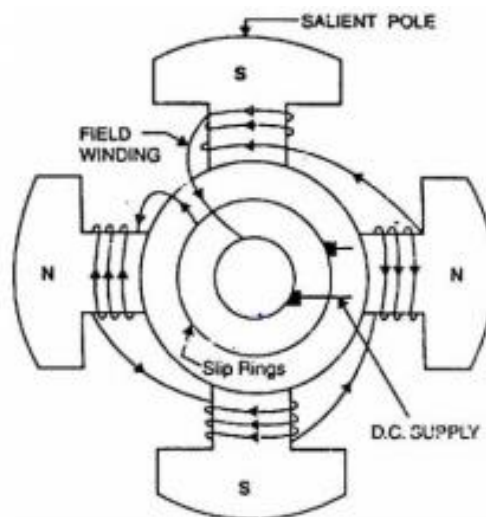
d. Poros Rotor

Poros rotor adalah sebagai tempat untuk meletakkan kumparan medan, yang mana pada poros rotor generator tersebut berbentuk slot-slot secara parallel terhadap poros rotor. Poros rotor berputar bersamaan dengan slipring dan juga rotor. Pada dasarnya dilihat dari <sup>sistem</sup> kecepatan putaran yang digunakan dalam sistem pembangkitan listrik, Rotor dibagi menjadi dua bentuk kutub medan magnet yang bekerja berdasarkan jumlah putaran yang berputar yaitu *salient pole* (kutub menonjol) dan *non-salient pole* (kutub tak menonjol).

a. *salient pole* (kutub menonjol)

*salient pole* (kutub menonjol) merupakan jenis kutub yang mana kutubnya menonjol keluar dari permukaan rotor. Ketika belitan-belitan medannya di alirin arus searah dari sistem eksitasi, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang berlawanan. Belitan-belitan medannya dihubung secara seri, sedangkan jumlah kutubnya berjumlah lebih dari dua kutub hal ini karena *salient pole* memiliki diameter yang besar dan Panjang namun memiliki sumbu yang pendek

*salient pole* (kutub menonjol) digunakan pada generator yang mempunyai putaran yang rendah dan sedang sekitar 120-400 rpm. Putaran dari rotor ini biasanya disumberkan dari mesin diesel atau mesin turbin air pada sistem pembangkit listrik. Kumparan ini tidak bisa digunakan pada putaran yang tinggi karena dapat menyebabkan rugi-rugi yang besar dan bisa menimbulkan suara yang keras dan juga tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan putar yang tinggi . Bentuk dari *salient pole* (kutub menonjol) dapat dilihat pada gambar dibawah:



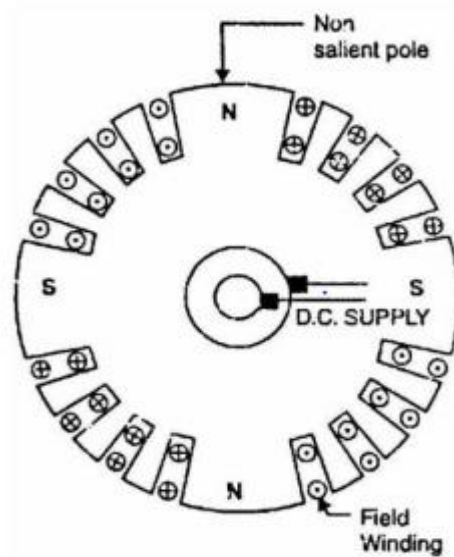
Gambar 2. 5 Rotor kutub menonjol

(Sumber: Rajkumar,2019)

b. Rotor Kutub Silinder (*Non-Salient Pole Rotor*)

Rotor Kutub Silinder (*Non-Salient Pole Rotor*) merupakan rotor yang terbuat dari plat baja yang berbentuk silinder yang mana konstruksi medan magnetnya rata dengan permukaan rotor pada generator tidak seperti rotor *salient pole* yang menonjol. Konstruksi dari rotor kutub silinder ini lebih baik di bandingkan dengan rotor *salient pole* karna rotor kutub silinder dapat memberikan keseimbangan mekanis yang bisa meminimalisir rugi-rugi daya yang terjadi. Belitan medan dari rotor ini dipasang dengan alur-alur sisi luar dan terhubung seri dengan slipring yang bisa terhubung langsung dengan arus eksitasi.

Rotor Kutub Silinder (*Non-Salient Pole Rotor*) digunakan pada generator yang mempunyai putaran yang tinggi yaitu lebih dari 1500 rpm dengan diameter yang kecil dan Panjang. Kumparan rotor diatur sedemikian rupa sehingga terdapat fluks yang maksimum pada posisi tertentu. Rotor ini berbeda dengan *salient pole* karena konstruksinya lebih balance dan memiliki noise yang kecil. Rotor ini bagus digunakan untuk kecepatan putar yang tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi. Selain itu distribusi di sekeliling rotor mendekati dengan gelombang sinus sehingga jauh lebih baik dari *salient pole*. Bentuk dari Rotor Kutub Silinder (*Non-Salient Pole Rotor*) dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 6 Rotor kutub silinder (*Non salient pole*)

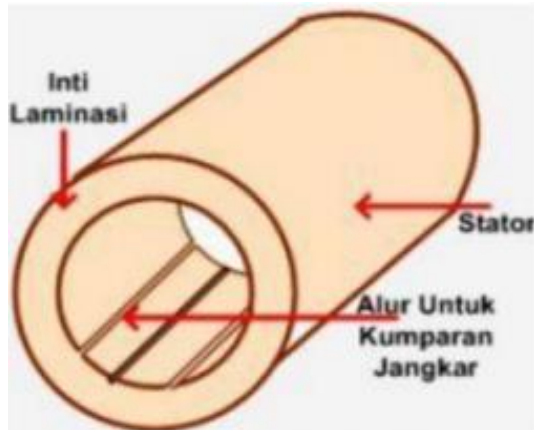
(Sumber: Rajkumar,2019)

## 2. Stator

Stator merupakan bagian yang diam yang berada pada generator sinkron, berfungsi sebagai pembangkit tegangan induksi yang akan di alirkan atau tempat terjadinya GGL induksi, Pada bagian stator terdapat alur kumparan jangkar yang mana pada alur tersebut terdapat belitan kumparan yang mengelilingi rotor. Kumparan akan bekerja ketika mendapatkan medan magnet yang dihasilkan dari putaran rotor yang mengelilingi stator, Bagian bagian stator pada generator sinkron adalah sebagai berikut:

### a. Kerangka stator

Kerangka tersusun dari banyak tempelan pelat baja yang tipis yang dipisahkan secara horizontal ke atas dan bagian bawah yang memiliki banyak dinding dan ruang udara yang ada di dalamnya kerangka stator juga berfungsi sebagai penompang berat dari stator itu sendiri dan torsi magnetic dari rotor bisa juga dikatakan sebagai pondasi bagi stator. Ujung penutup dari kerangka stator juga berfungsi sebagai aliran sirkulasi udara

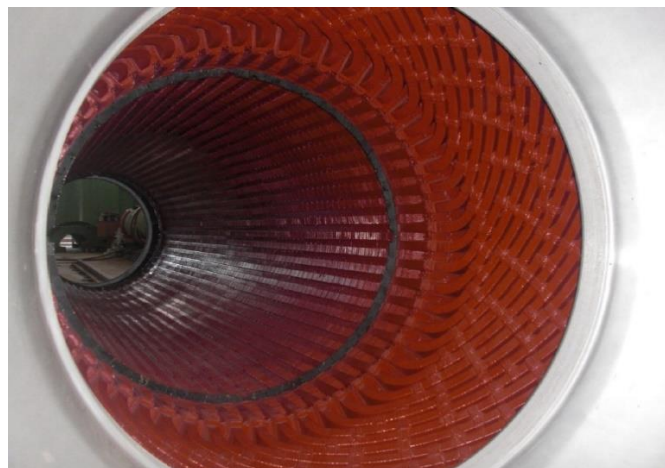


Gambar 2. 7 Kerangka stator

(Sumber: Wahyu,2013)

b. Inti stator

Inti stator berisi banyak lembaran baja yang digunakan sebagai kumparan jangkar. Inti stator merupakan tempat terjadinya reaksi jangkar pada stator dimana mengalirnya fluks magnet yang memotong kumparan jangkar di stator dan juga terdapat banyak saluran ventilasi sehingga suhu inti stator generator dapat didistribusikan secara merata. Gambar inti stator adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 8 Inti stator

(Sumber: Rizhal,2013)

c. Kumparan stator (Kumparan jangkar)

Kumparan jangkar adalah tempat terjadinya gaya gerak listrik (GGL induksi) yang diakibatkan adanya perpotongan pada medan magnet putar dari bagian rotor yang memotong kumparan jangkar atau penghantar stator. Kumparan jangkar ini terbuat dari banyak gulungan kawat penghantar yang berisolasi yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi.

Pada kumparan stator ini akan mengalir arus listrik bolak balik 3 fasa apabila pada kumparan tersebut tersambung dengan beban. Dimana arus tersebut akan menimbulkan panas pada kumparan yang dapat merusak isolasi kumparan dan menyebabkan panas yang terjadi pada inti besi. Gambar konstruksi dari kumparan jangkar dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 9 Konstruksi kumparan jangkar stator  
(Sumber: Anonim, 2016)

d. Slot (alur) dan gigi

Slot (alur) dan gigi merupakan tempat beradanya konduktor yang terletak pada bagian dalam sekeliling stator. Pada Slot (alur) dan gigi ada tiga bentuk yaitu slot terbuka, slot setengah terbuka dan slot tertutup. Gambar ketiga bentuk slot dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 10 Bentuk-bentuk alur/slot

(Sumber: Ennopati, 2009)

### 2.2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja Generator sinkron berdasarkan induksi magnetic. Menurut hukum faraday, Hukum induksi faraday adalah hukum dasar elektromagnetisme yang memprediksi bagaimana medan magnet berinteraksi dengan rangkaian listrik untuk menghasilkan gaya gerak listrik-fenomena yang disebut sebagai induksi elektromagnetik. (Wikipedia:2019) Suatu mesin listrik akan bekerja apabila memiliki kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan juga kumparan jangkar yang berfungsi untuk menginduksi terjadinya GGL induksi pada konduktor yang terdapat pada medan jangkar dan juga celah udara yang memiliki fungsi untuk memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet. Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut:

1. Kumparan medan yang dipasang pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang di alirkan melalui slipring yang akan mensuplai arus searah kepada medan rotor. Dengan adanya arus DC yang mengalir ke medan rotor maka kumparan medan akan menghasilkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Turbin atau penggerak mula yang sudah dihubungkan dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu sesuai dengan yang diinginkan.
3. Perputaran rotor tersebut menyebabkan medan magnet ikut berputar yang dihasilkan oleh kumparan medan pada rotor. Medan magnet yang



dihasilkan oleh rotor akan menginduksikan kepada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang terletak pada stator akan menghasilkan fluks yang berada pada kumparan inti stator dan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut sesuai dengan persamaan berikut:

$$E_{\text{induksi}} = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

$E_{\text{induksi}}$  = Tegangan induksi elektromagnetik Gaya gerak listrik induksi

$N$  = Jumlah Lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$  = Laju perubahan fluks magnetic (wb/s)

Keterangan:

Nilai atau tanda (-) pada lilitan merupakan bentuk penerapan dari Hukum Lenz yang berbunyi:

*“GGL induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetiknya berlawanan dengan sumber perubahan fluks magnetic”*

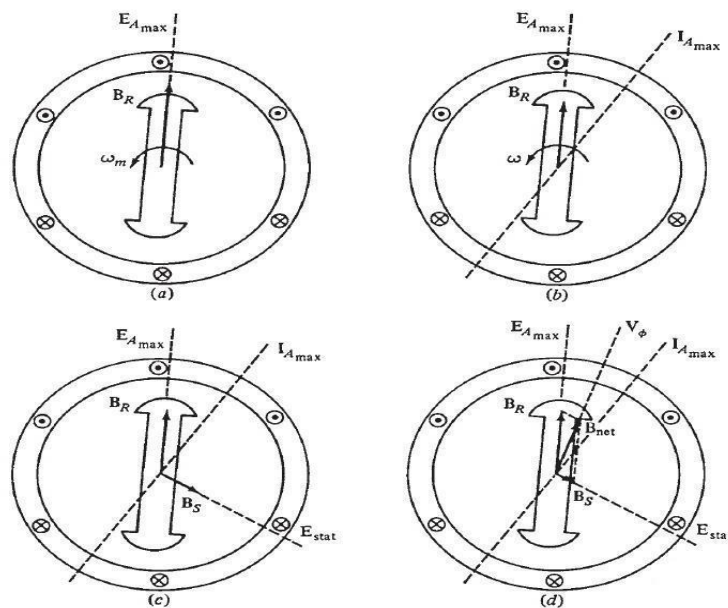
#### 2.2.4 Reaksi Jangkar Generator Sinkron

Ketika generator sinkron pada keadaan tidak berbeban dalam kata lain beban nol maka itu berarti tidak ada arus yang mengalir pada kumparan jangkar yang berada pada stator sehingga hanya ada fluksi arus medan dari putaran rotor yang berada pada celah udara antara rotor dan stator. Namun apabila generator sinkron dibebani maka arus jangkar ( $I_a$ ) akan mengalir pada kumparan jangkar dan membentuk fluksi jangkar yang mana fluksi jangkar ini mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan perubahan nilai tegangan terminal generator sinkron. Yang mana ketika beban terhubung ke terminal generator maka lilitan medan pada stator akan mengalirkan arus yang menimbulkan medan magnet pada kumparan stator.

Reaksi jangkar pada generator sinkron yang berada pada stator bergantung pada jenis beban yang dilayani atau dalam kata lain tergantung

dari sudut fasa antara arus jangkar dan tegangan induksi. Reaksi jangkar akan bersifat reaktif saat kumparan jangkar dalam keadaan berbeban karna arus jangkar mengalir.

Medan magnet yang berputar pada rotor akan menghasilkan tegangan induksi  $E_{Amax}$  pada gambar 2.11. Saat generator mensuplai beban induktif maka tegangan resultan menghasilkan lagging pada gambar 2.11. Arus stator akan menghasilkan medan magnet sendiri  $B_s$  dan tegangan stator  $E_{stator}$  di kumparan stator. Pada gambar 2.11. Vektor penjumlahan antara  $E_{stator}$  dengan  $E_{Amax}$  akan menghasilkan  $V_f$  pada outputnya, Berdasarkan penjelasan diatas dapat dilihat pada beberapa gambar dibawah ini:



Gambar 2. 11 Model reaksi jangkar

(Sumber: Ennopati, 2009)

Reaksi jangkar pada generator sinkron bisa menimbulkan pengaruh yang berupa distorsi penguatan (*Magnetising*) maupun pelemahan (*Demagnetising*) fluks arus medan pada celah udara antara stator dan rotor. Pengaruh yang ditimbulkan berdasarkan jenis-jenis beban terhadap reaksi jangkar adalah sebagai berikut:

a. Beban Resistif ( $\cos\varphi = 1$ )

Ketika generator sinkron dibebani oleh beban resistif maka putaran awal dan tegangan terminal pada reaksi jangkar akan menurun dikarenakan adanya perubahan pada daya aktif (MW). Untuk menjaga tegangan yang keluar tetap konstan maka perlu dijaganya nilai eksitasi karena bisa berpengaruh pada daya reaktif, jika ingin menaikkan nilai tegangan maka menaikkan nilai arus eksitasi maka fluksi medan juga akan meningkat. Pada beban reaktif pengaruh fluks jangkar terhadap fluks medan hanya mendistorsi tanpa mempengaruhi kekuatannya.

b. Beban Induktif ( $\cos\theta = 0$  *lagging*)

Beban induktif hanya mengkonsumsi daya reaktif. Bila ingin memperbesar daya reaktif yang besar (MVAR) maka perlu mengatur arus eksitasi yang besar juga agar bisa meningkatkan nilai daya reaktif yang akan meningkatkan nilai dari fluks medan Reaksi jangkar, pada beban induktif ini memiliki nilai  $\cos\theta = 0$  dan memiliki sifat *lagging*. Pada saat *lagging* ini arus akan tertinggal sebesar  $90^\circ$  dari tegangan. Fluks yang dihasilkan dari reaksi jangkar akan melawan fluksi arus pada medan sehingga fluks resultan pada celah udara akan berkurang dari fluks medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.

c. Beban Kapasitif ( $\cos\theta = 0$  *Leading*)

Beban kapasitif adalah beban yang menyimpan tegangan maka dari itu pada saat *leading* menyebabkan arus akan mendahului tegangan sebesar  $90^\circ$ . Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga fluks resultan pada celah udara akan bertambah dari fluks medan. Reaksi jangkar yang terjadi ini akan menyebabkan *magnetizing* artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

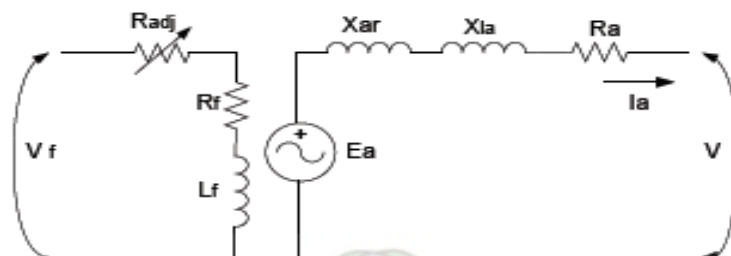
### 2.2.5 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Seperti yang diketahui pada stator terdapat belitan jangkar yang terbuat dari tembaga yang mana belitan-belitan tersebut diletakan pada alur-alur (slot). Belitan-belitan konduktor yang terbuat dari tembaga ini terdiri dari tahanan (R) dan induktansi (L), maka belitan stator akan mengandung tahanan stator ( $R_a$ ) dan induktansi stator ( $L_a$ ). Saat stator bekerja maka arus dari eksitasi yang berada di medan rotor akan mengalir pada konduktor yang membentuk fluksi jangkar pada stator yang kemudian membangkitkan medan putar magnet.

Fluks jangkar akan berinteraksi dengan fluks medan yang kemudian menyebabkan adanya konversi energi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Pada kondisi ini, ada fluks sisa yang tidak bisa bekerja dengan fluks medan yang disebut reaktansi bocor ( $X_{ar}$ ). Reaktansi jangkar bersifat reaktif dan disebut juga sebagai reaktansi reaksi jangkar ( $X_{la}$ ). Reaktansi jangkar ( $X_{la}$ ) dengan reaktansi fluks bocor ( $X_{ar}$ ) menjadi reaktansi sinkron ( $X_s$ ).

$$X_s = X_{la} + X_{ar} \dots\dots\dots(2.4)$$

Akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar ( $X_{ar}$ ) dan juga reaktansi bocor jangkar ( $X_{la}$ ) maka rangkaian ekivalen suatu generator sinkron akan menjadi seperti gambar berikut:



Gambar 2. 12 Rangkaian ekivalen generator sinkron

(Sumber: Ramdhani, 2008)

- Dimana:  $E_a$  = Tegangan Induksi (GGL induksi)  
 $V$  = Tegangan terminal generator  
 $V_f$  = Tegangan eksitasi

$R_f$  = Tahanan belitan medan

$L_f$  = Induksi belitan medan

$R_{adj}$  = Tahanan variable

$X_{ar}$  = Reaktansi reaksi jangkar

$X_{la}$  = Reaktansi bocor belitan jangkar

$I_a$  = Arus jangkar

Dari gambar diatas dapat dibuat persamaan tegangan generator sinkron sebagai berikut:

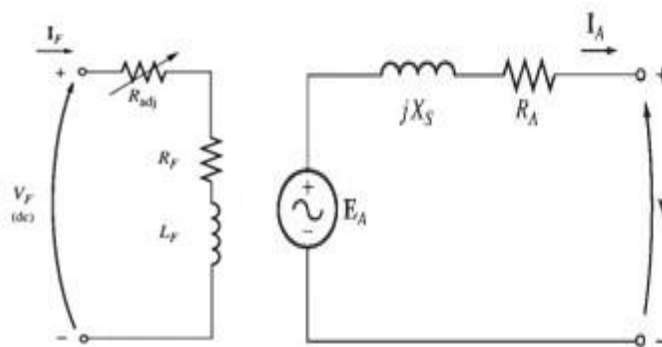
$$E_a = V + jX_{ar} \cdot I_a + jX_{la} \cdot I_a + R_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.5)$$

Dari persamaan tersebut maka dapat dibuat tegangan terminal generatornya sebagai berikut

$$V = E_a - jX_{ar} \cdot I_a - jX_{la} \cdot I_a - R_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.6)$$

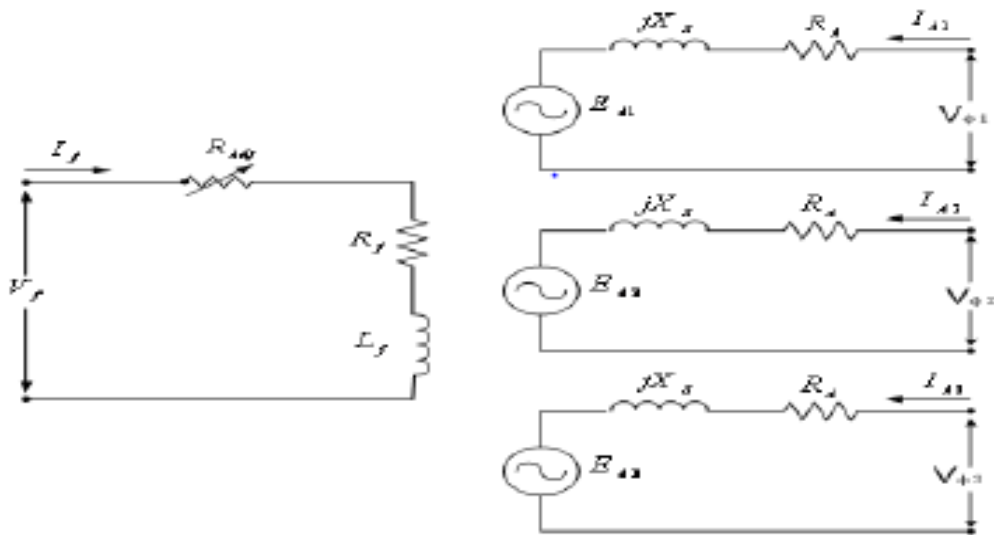
Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau  $X_s = X_{la} + X_{ar}$ , maka bila dilihat pada gambar maka persamaannya menjadi sebagai berikut:

$$V = E_a - jX_s \cdot I_a - R_a \cdot I_a \quad (\text{Volt}) \dots \dots \dots (2.7)$$



Gambar 2. 13 Penyederhanaan rangkaian ekivalen  
(Sumber: Ramdhani, 2008)

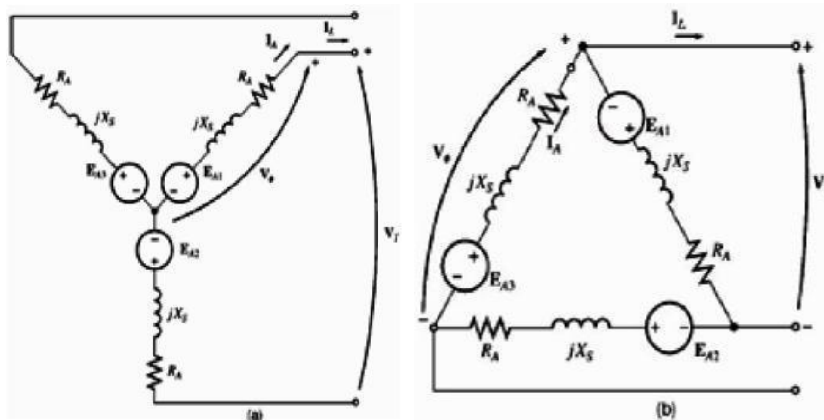
Karena tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron merupakan tegangan AC tiga fasa, maka gambar yang menampilkan hubungan antara tegangan induksi perfasa dengan terminal generator akan ditunjukkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2. 14 Rangkaian ekivalen generator sinkron 3 fasa

(Sumber: Ramdhani, 2008)

Untuk rangkaian ekivalen pada generator sinkron tiga fasa dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2. 15 Rangkaian ekivalen generator sinkron (a) Hubung-Y (b) Hubung-D

(Sumber: Ramdhani, 2008)

### 2.2.6 Pengaturan tegangan pada generator sinkron

Apabila beban ditambahkan pada generator yang sedang bekerja maka tegangan terminal akan berubah karena adanya peningkatan konstan dan menurunnya sistem eksitasi. Besarnya perubahan tegangan bergantung pada rancangan generator dan juga pada factor daya beban.

Persen pengaturan persentase tegangan tertentu dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\% = \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100$$

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai setting dari pengaturan sebuah generator sinkron adalah sebagai berikut:

1. Penurunan tegangan IR pada lilitan jangkar.
2. Penurunan tegangan  $IX_L$  pada lilitan jangkar.
3. Reaksi jangkar (pengaruh medan magnet dari arus jangkar pada stator)

Dikarenakan tegangan pada terminal generator sinkron AC biasanya berubah-ubah atau tidak stabil yang disebabkan karena berubahnya beban yang ditanggung oleh generator. Maka semua sistem pada pembangkitan listrik harus di jaga kinerjanya agar selalu mendapatkan hasil yang optimal, salah satu cara untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap stabil yaitu mengatur arus searah DC pada sistem eksitasi generator sinkron yaitu dengan menggunakan AVR atau *Automatic Voltage Regulator* untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan DC yang di alirkan pada generator.

Bila tegangan terminal pada generator turun karena beban, pengaturan tegangan atau AVR secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan bisa kembali normal. Dan juga apabila tegangan terminal naik maka ada penurunan pada beban di generator, maka pengaturan akan mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurasi nilai eksitasi.

### **2.2.7 Pengertian Daya**

Daya adalah perkalian antara arus dan tegangan keluaran dari generator. Daya juga diartikan sebagai jumlah energi yang diserap ataupun dihasilkan dalam suatu rangkain listrik. Sumber energi seperti tegangan listrik yang memiliki arus akan menghasilkan daya listrik sedangkan beban-beban yang terhubung dengan energi listrik akan menyerap daya listrik tersebut. Dengan

kata lain daya listrik merupakan tingkat konsumsi energi dalam sebuah rangkaian listrik.

Daya bernilai positif apabila arus yang mengalirinya bernilai positif, yang artinya arus mengalir dari sumber tegangan listrik ke rangkaian beban listrik. Sedangkan daya dikatakan negative apabila arus yang mengalirinya bernilai negative juga yang artinya arus mengalir dari rangkaian listrik menuju sumber listrik dalam suatu sistem pembangkit daya dapat dibagi mejadi tiga sebagai berikut:

1. Daya Aktif/Nyata (P)

Daya nyata atau aktif memiliki satuan W (watt). Daya aktif adalah daya yang dibutuhkan oleh konsumen untuk mensuplai energi listrik ke beban-beban.maka daya yang tertulis pada KWh meter merupakan daya aktif dan merupakan daya yang harus dibayarkan oleh pelanggan Dalam kati lain daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif , dimana daya ini akan menunjukan adanya aliran energi listrik dari pembangkit menuju ke beben.

Secara matematis rumus daya aktif (P) untuk system 3 fasa adalah sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3}x V x I x Cos\varphi.....(2.8)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (watt)
- V = Tegangan (volt)
- I = arus yang mengalir (ampere)
- $Cos\varphi$  = Faktor daya

2. Daya reaktif (Q)

Daya reaktif adalah daya yang tidak dimanfaatkan oleh konsumen, daya ini muncul karena diakibatkan oleh komponen yang pasif di luar resistor yang merupakan daya rugi-rugi atau daya yang tidak diinginkan. Namun daya reaktif ini juga dapat dimanfaatkan pada sistem pembangkitan energi listrik, dimana pada pembangkitan daya reaktif ini



berfungsi untuk membangkitkan medan, magnet pada sistem eksitasi, sehingga dari pembangkitan itu di hasilkan fluks-fluks medan magnet. Daya reaktif memiliki satuan (VAR) dan memiliki persamaan matematis sebagai berikut:

$$Q = \sqrt{3} x V x I x \sin\phi \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = arus yang mengalir (Ampere)

$\sin\phi$  = Faktor daya

### 3. Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya yang sebenarnya dipakai oleh PLN, yang merupakan resultan antara daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). satuan dari daya semu adalah VA dan memiliki persamaan matematis sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} x V x I \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = arus yang mengalir (Ampere)

#### A. Faktor daya

Faktor daya atau *power factor* (pf) merupakan perbandingan antara daya nyata (P) terhadap daya semu (Q). Faktor daya menunjukkan besarnya rasio daya nyata yang bisa dimanfaatkan pada daya semu yang dihasilkan oleh sumber energi listrik. Persamaan matematis factor daya adalah sebagai berikut

$$\cos \phi = \frac{p}{s} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

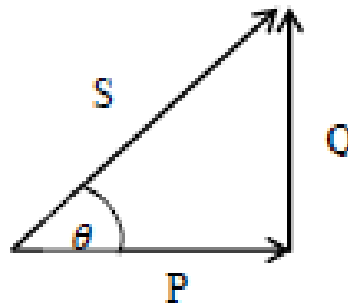
$\cos \phi$  = Faktor daya

P = Daya aktif

S = Daya semu

### B. Segitiga daya

Hubungan antara ketiga daya yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu dapat dinyatakan pada segitiga daya berikut ini dengan mempresentasikan ke-3 daya tersebut sebagai vector. Dapat dilihat pada gambar berikut ini:



### 2.2.8 Beban pada generator sinkron

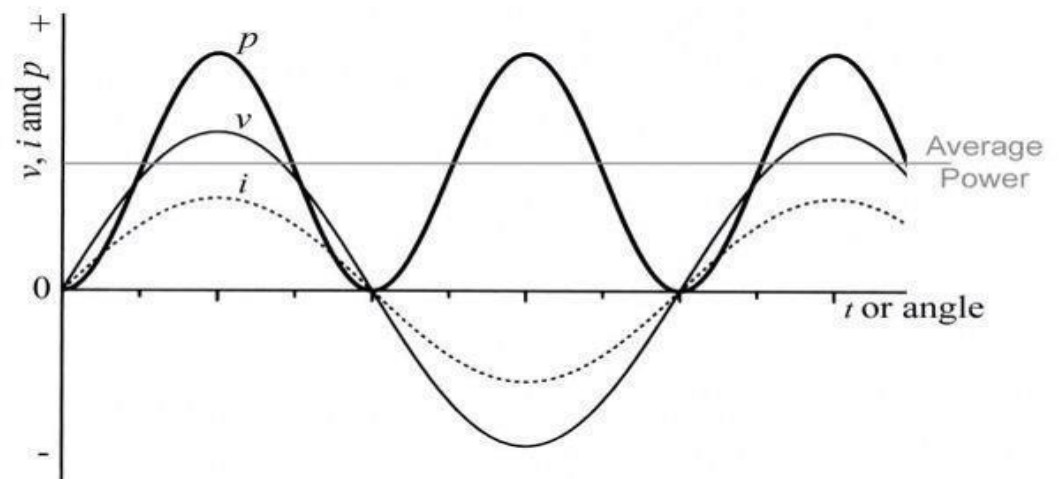
Beban listrik sangat berpengaruh pada proses produksi sistem tenaga listrik karena beban adalah segala sesuatu yang ditanggung oleh pembangkit listrik atau bisa dikatakan sebagai segala sesuatu yang membutuhkan tenaga/daya listrik. Beban listrik juga dikatakan sebagai hambatan/resistan. Dalam listrik arus bolak-balik beban listrik diklasifikasikan menjadi tiga sebagai berikut:

#### 1. Beban resistif

Beban resistif merupakan beban yang dihasilkan oleh rangkaian listrik yang memiliki tahanan/resistor biasa disebut juga sebagai rangkaian yang memiliki tahanan murni. Peralatan listrik yang memiliki

tahanan murni contohnya peralatan yang biasa digunakan dalam rumah tangga seperti lampu, setrika, pemanas, Dll,

Hubungan antara beban resistif terhadap generator sinkron adalah pada reaksi jangkar, sehingga akibat dari reaksi jangkar ini akan menghasilkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet rotor, sehingga mengakibatkan putaran rotor menurun, karena putaran rotor turun maka frekuensi dan tegangan pada generator juga akan ikut menurun. Untuk menaikkan kembali tegangan dan frekuensi maka perlu menambah putaran rotor dengan cara memperbesar suplai arus searah dari sistem eksitasi. Bentuk gelombang dari beban resistif dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 16 Gelombang beban resistif

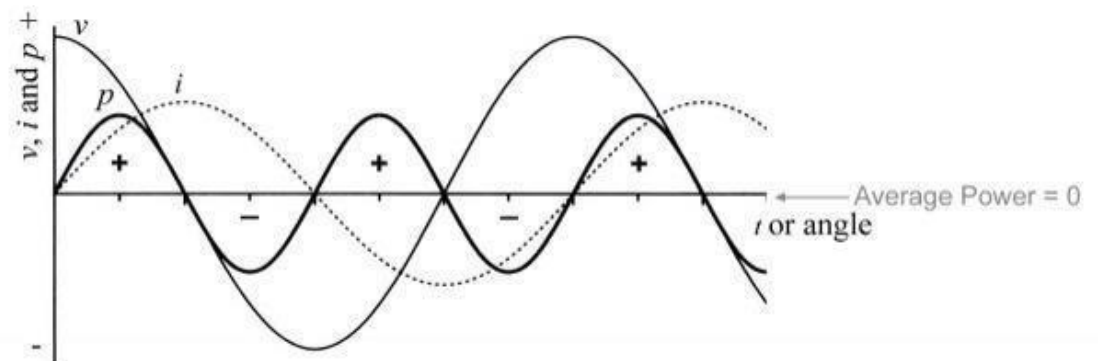
(Sumber: Kurniawan, 2015)

## 2. Beban induktif

Beban induktif merupakan beban yang arusnya mengalir di dalam penghantar yang akan menimbulkan medan magnet dengan arah garis gaya magnetnya mengelilingi penghantar. Kuatnya medan magnet tergantung pada besarnya arus yang mengalir. Apabila arus naik maka rangkaian pengantar akan menyimpan energi didalam medan magnet,

namun jika arus turun maka rangkaian penghantar akan mengeluarkan energi dari medan magnet.

Beban induktif di timbulkan dari berbagai alat listrik yang memiliki lilitan medan seperti transformator, motor induksi, Dll. Sifat yang dimiliki beban induktif bisa menghalangi terjadinya perubahan nilai arus pada listrik. Dalam arus AC, arus memiliki nilai yang meningkat dan menurun sehingga membentuk gelombang sinusoidal. Lilitan pada medan itulah yang menyebabkan arus listrik terhalang sehingga menyebabkan tegangan mendaului arus sebesar  $90^{\circ}$ . Bentuk gelombang dari beban induktif dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

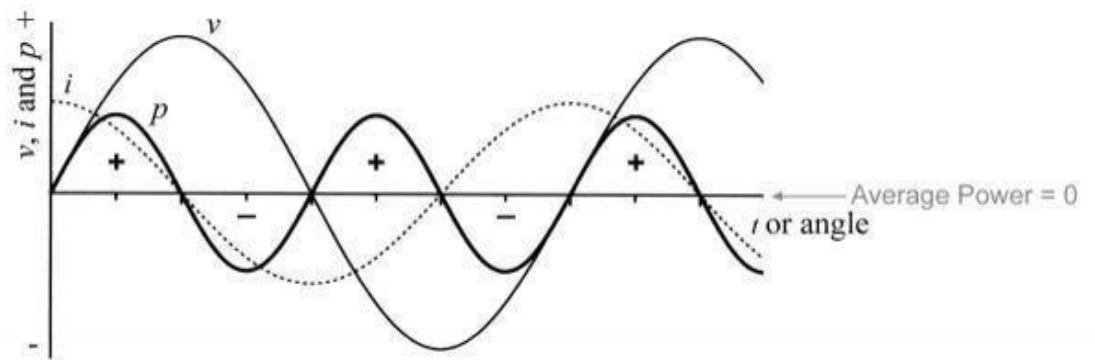


Gambar 2. 17Gelombang beban induktif

(Sumber: Kurniawan, 2015)

### 3. Beban kapasitif

Beban kapasitif merupakan beban yang menyimpan tegangan, ini kebalikan dari beban induktif, pada beban kapasitif tegangan seperti di halangi dan arus mendahului tegangan sebesar  $90^{\circ}$ . Beban kapasitif timbul dikarenakan terdapat bagian yang dapat menyimpan sesaat tegangan listrik yang melewatinya, lalu akan melepaskan dan menyimpan kembali tegangan tersebut sesuai dengan perubahan tegangan masukannya. Bentuk gelombang dari beban kapasitif dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 18 Gambar beban kapasitif

(Sumber: Kurniawan, 2015)

### 2.2.9 Sistem Eksitasi Pada PLTU Kaltim Teluk

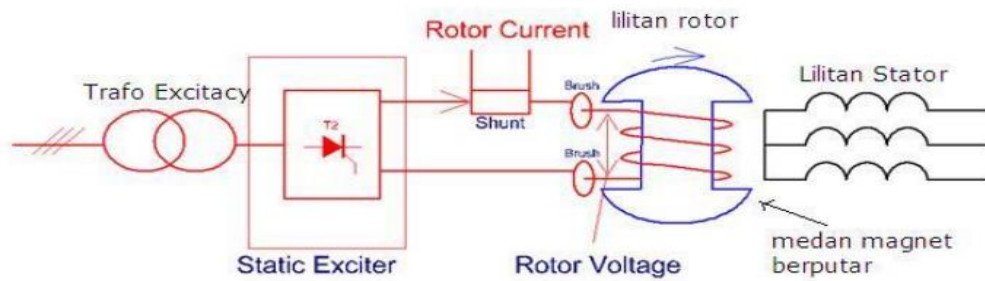
Sistem eksitasi adalah sistem mengalirnya pasokan listrik arus searah sebagai penguatan pada generator listrik, sehingga menghasilkan tenaga listrik yang mana nantinya besar tegangan keluaran dari generator sinkron bergantung pada besarnya arus eksitasi yang di *supply* oleh sistem eksitasi ke rotor generator.

Eksitasi memegang peranan penting dalam mengendalikan kestabilan suatu pembangkit karena apabila terjadi fluktuasi beban maka eksitasi sebagai pengendali akan berfungsi mengontrol keluaran generator seperti tegangan, arus dan faktor daya dengan cara mengatur kembali besaran-besaran input guna mencapai titik keseimbangan baru agar generator sinkron tetap bisa bekerja secara optimal dan selalu tersinkronisasi dengan jaringan. Sistem eksitasi pada generator listrik terdiri dari 2 macam, yaitu:

#### 1. Sistem eksitasi dengan sikat (*brush excitation*)

Sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listrik berasal dari sumber listrik yang berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Jika menggunakan sumber listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanen. Dalam *rectifier*

*cubicle*, tegangan listrik arus bolak balik diubah atau di searahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan exciter utama (*main exciter*). Untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke rotor generator menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot *exciter* ke *main exciter*.

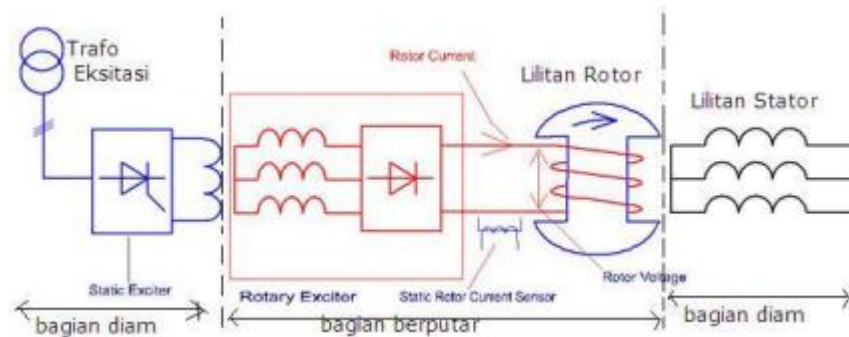


Gambar 2. 19 Eksitasi dengan *brush*

(Sumber: Syahril, 2015)

2. Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)

Penggunaan sikat atau *slip ring* untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, pada generator pembangkit menggunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*). Gambar skema diagram system eksitasi tanpa sikat dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 20 Eksitasi tanpa *brush*

(Sumber: Syahril, 2015)

Sistem eksitasi tanpa sikat ini menggunakan dua buah generator yaitu generator penguat pertama (*pilot exciter*) dan generator penguat kedua

yaitu genetrator penguat utama (main exciter). Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah:

- Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya akan tinggi.
- Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
- Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada *farnish* akibat sikat arang.
- Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosfere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung kontinu pada waktu yang lama.
- Pemutus medan generator (*Generator field breaker*), *field generator* dan *bus exciter* atau kabel tidak diperlukan lagi.
- Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan *bus exciter* atau kabel tidak memerlukan pondasi.

Sistem eksitasi pada PLTU kaltim Teluk menggunakan sistem eksitasi dengan sikat (*brush excitation*) dengan tipe regulator eksitasinya adalah EXC9000 dan tipe eksitasinya FJL-5GAI-PADE2B. Dalam sistem eksitasi statis ini (eksitasi shunt atau eksitasi sendiri), tenaga eksitasi diambil dari terminal generator, Output dari generator yang sebesar 13,8KV di alirkan ke Generator Transformator (GT) dan ke Auxilary trafo yang dimana dari auxilary trafo ini tegangan yang dari 13,8KV di turunkan menjadi 6KV lalu dari auxilary trafo ini di alirkan lagi ke trafo eksitasi yang besar teganganya di turunkan lagi menjadi 400V yang kemudian di

proses di ruang *cubicle* dimana di ruang *cubicle* terdapat *Regulator cubicle*, *AC inlet cubicle*, *rectifier cubicle* dan *F.C.B cubicle*.

Arus medan dari generator sinkron mengalir melalui transformator eksitasi, penyearah tenaga, dan pemutus medan. Transformer eksitasi berfungsi untuk menyesuaikan tegangan generator dengan tegangan masukan yang disyaratkan untuk penyearah tenaga, dan memberikan isolasi elektrik antara terminal mesin dan kumparan medan. Tegangan sekunder transformator eksitasi didesain sedemikian rupa sehingga tegangan keluaran konverter sesuai dengan batas tertinggi tegangan DC. Untuk membangkitkan eksitasi, peralatan medan sesaat disuplai dari sumber AC atau suplai medan sesaat DC. Konverter tenaga (SCR), dikontrol oleh AVR, dan disuplai oleh transformator eksitasi yang terhubung ke terminal generator, suplai secara kontinu dan arus eksitasi yang masuk ke medan generator melalui pemutus medan (F.C.B) besarnya dapat diubah-ubah. Untuk sistem *Start up* proses eksitasi di PLTU Kaltim Teluk menggunakan *battery*, dibawah ini di jelaskan bagian-bagian dari proses sistem eksitasi dengan sikat pada PLTU Kaltim Teluk. Struktur Sistem eksitasi sebagian besar tersusun oleh lima komponen sebagai berikut:

- Komponen suplai tenaga eksitasi: transformator eksitasi (TE)
- Komponen Kontrol: *automatic voltage regulator/Regulator Cubicle*(AVR)
- Komponen tenaga: penyearah tenaga jembatan/*Rectifier cubicle*(SCR)
- Komponen medan sesaat dan de-eksitasi: lemari pemutus medan (FCB)
- Komponen *Battery*





Gambar 2. 21 ruang cubicle sistem eksitasi  
(Sumber: Setyo,2019)

Sistem eksitasi self & shunt statis yang berada di PLTU Kaltim teluk yang dilengkapi dengan generator berukuran besar, disusun seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. 1 Spesifikasi unit-unit sistem eksitasi di PLTU Kaltim Teluk

Nama unit	No.	Ukuran(W×D×H)(mm <sup>3</sup> )	Deskripsi unit
Regulator (AVR)	1 Unit	800×1000×2260 or 800×800×2260	3-chanel, 2-bus, intelligent detecting, intelligent interface, color LCD touching

Tabel 2. 1 Spesifikasi unit-unit sistem eksitasi di PLTU Kaltim Teluk (lanjutan)

Nama unit	No.	Ukuran(W×D×H)(mm <sup>3</sup> )	Deskripsi unit	
Rectifier cubicle	2~4 Units	800×800×2260	1000 A	Intelligent local BUS
		800×1000×2260	2000 A	
		1000×1200×2260	4000 A	
Field circuit breaker (F.C.B) cubicle	1 Unit	800×1000×2260	Field circuit breaker, De-excitation control circuit, excitation starting unit, outlet BUS bar	
Non-linear cubicle	1 Unit	800×1000×2260	High-capacity non-linear resistor, crystal tube flyover	
Excitation Transformer	1 Set		3-phase epoxy dry transformer or transforming dry	

#### 2.2.9.1 Single line diagram sistem eksitasi PLTU Kaltim Teluk

Seperti yang ditunjukkan dalam diagram, sistem eksitasi EXC9000 terdiri dari regulator, *interface human-machine*, *interface eksternal*, penyearah, de-eksitasi, perlindungan *over-voltage* dan transformator eksitasi dll. Diagram rangkaian sistem eksitasi pada PLTU Kaltim Teluk dapat dilihat pada diagram di bawah ini.

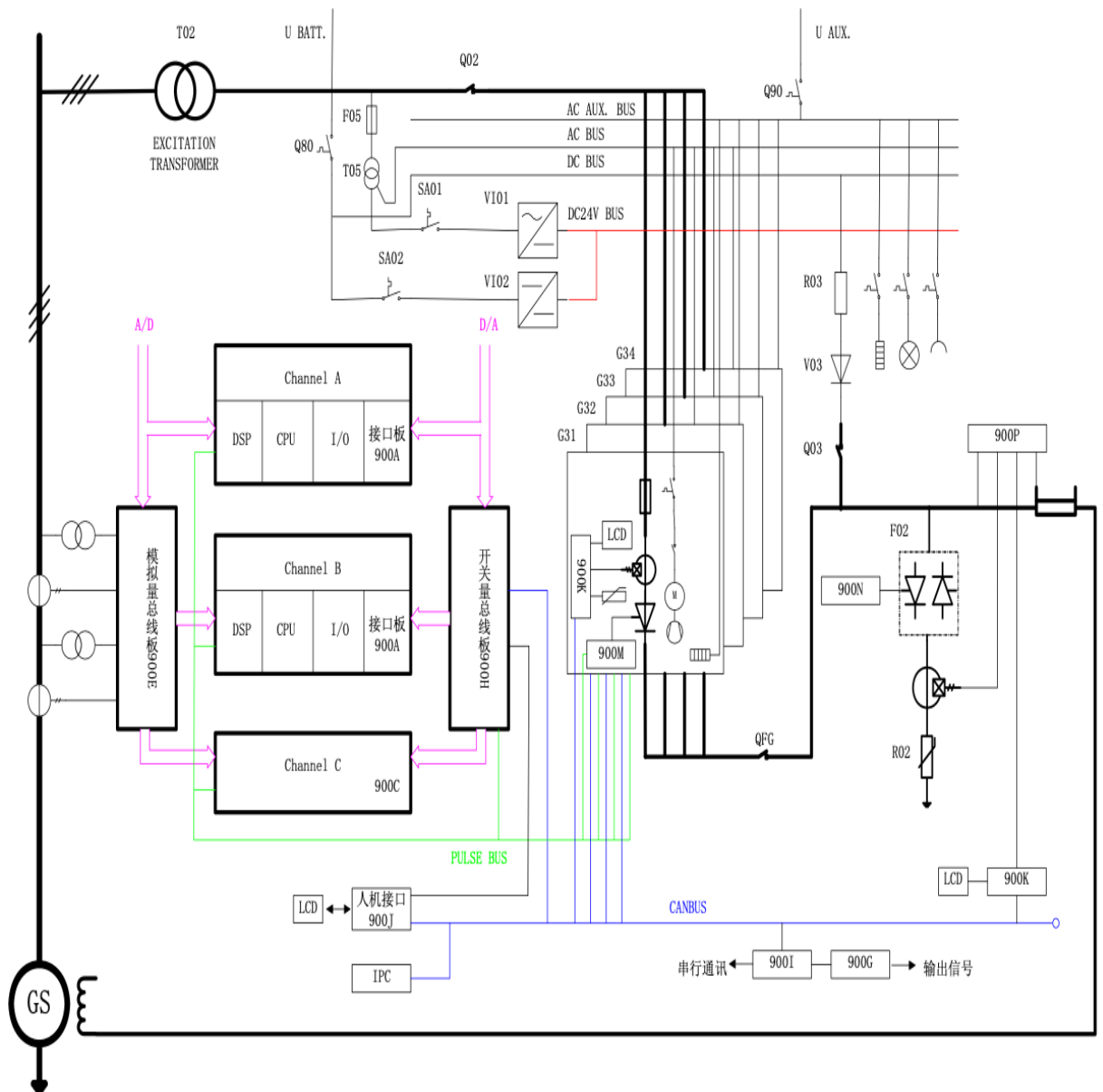


Diagram 2. 1 Diagram sistem eksitasi PLTU Kaltim Teluk

### 2.2.9.2 Unit-unit peralatan sistem eksitasi pada PLTU Kaltim Teluk

#### 1. Trafo eksitasi

Dalam sistem eksitasi, Trafo Eksitasi adalah sumber tenaga eksitasi yang bersumber dari generator unit keluaran tegangan sebesar 13,8 KV. Dari generator di salurkan ke trafo *auxiliary* yang tegangananya di step down dari 13,8K menjadi 6,3 KV yang kemudian dari trafo *auxiliary* tadi tegangan di salurkn kembali ke trafo

eksitasi yang tegangannya di step down lagi dari 6,3 KV menjadi 400V.

Trafo ekitasi juga berfungsi untuk 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, parameter trafo eksitasi pada PLTU Kaltim Teluk dapat dilihat pada tabel dbawah:

Tabel 2. 2 Parameter trafo eksitasi

Nama	Desain
Tipe	Three-phasedry-type transfoermer
Model trafo eksitasi	ZSCB91100/13,8/0,42
Kapasitas	1100KVA
Frekuensi	50HZ
Batas rasio trafo	13,8KV/420V
Impedansi	6%
Model pendingin	Udara natural/pendingin



Gambar 2. 22 Trafo eksitasi  
(Sumber: Setyo,2019)

## 2. *Automatic voltage regulator (AVR)*

AVR terletak di bagian dalam lemari pengatur. Fungsi AVR adalah untuk menjaga tegangan generator tetap konstan, sehingga kuantitas umpan baliknya adalah tegangan keluaran terminal generator. Mikroprosesor komputer mengatur semua jenis simulasi pengaturan nilai tegangan dan nilai switching, kemudian menghitung dan melatih semua jenis simulasi dan nilai switching untuk mengontrol keluaran SCR dan untuk mengatur sistem eksitasi. Dengan begitu apabila terjadi perubahan tegangan output generator maka akan dapat langsung distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan AVR memiliki kemampuan untuk

mengendalikan penguatan medan serta memiliki batas pengaturan penguatan medan minimum dan maksimum.

AVR yang digunakan pada PLTU kaltim teluk merupakan AVR yang menggunakan penyearah jenis *thyristor*, yang mana sumber masukan 3 fasa berasal dari transformator eksitasi yang kemudian di searahkan oleh penyearah yang terdiri dari penyearah gelombang penuh *thyristor* yang terkontrol oleh AVR sebelumnya. AVR dapat mendeteksi perubahan tegangan yang terjadi pada output pada belitan stator melalui instrument pengukuran berupa *Potensial Transformer* (PT) yang kemudian dibandingkan dengan tegangan nominal dari genereator, pembandinga tersebut dilakukan oleh rangkaian komparator atau mikroproesor. Dengan begitu AVR dapat menjaga tegangan keluaran pada batas yang ditetapkan.

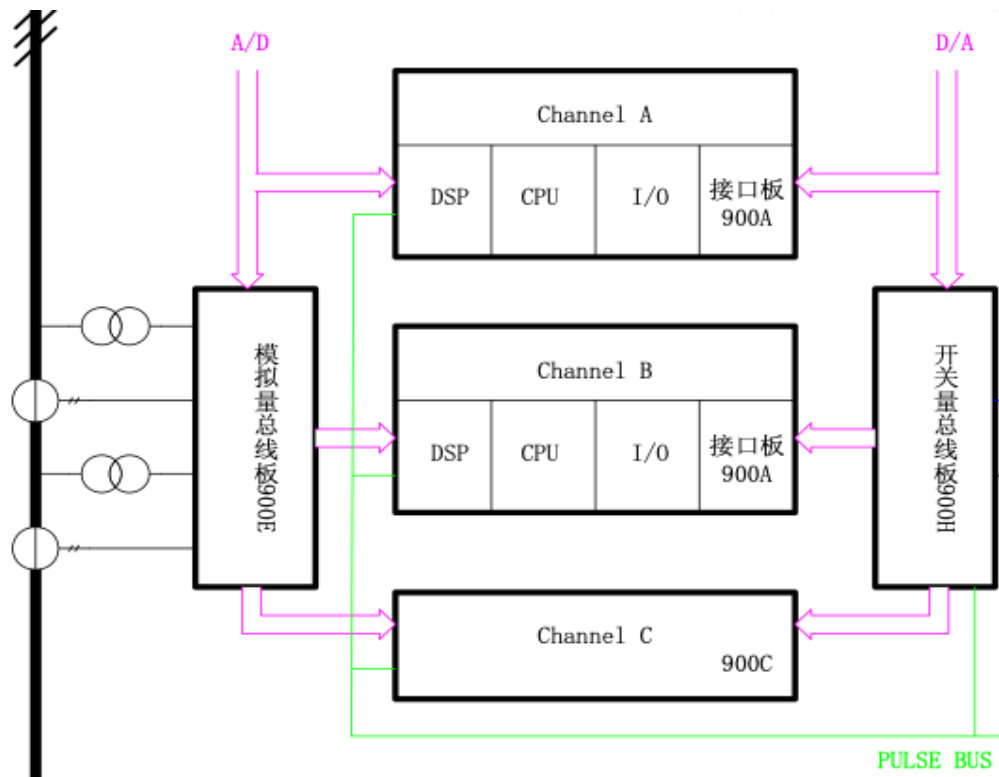


Diagram 2. 2 Diagram blok AVR



Gambar 2. 23 *Cubicle AVR* tampak depan  
(Sumber: Setyo,2019)



Gambar 2. 24 *Cubicle AVR* tampak belakang  
(Sumber: Setyo, 2019)

### 3. Penyearah/*Rectifier cubicle* (SCR)

Generator membutuhkan penyearah untuk proses sistem eksitasi karena keluaran dari transformator eksitasi merupakan AC 3 fasa. Penyearah tenaga yang digunakan adalah *thyristor* (SCR) yang mengubah suplai tenaga AC yang disalurkan oleh transformator eksitasi ke suplai tenaga DC dan menyalurkannya ke rangkaian medan magnet generator. Sesuai dengan nilai arus medan, beberapa penyearah jembatan beroperasi secara paralel untuk membagi arus medan secara bersama. Ketika suatu penyearah tertentu mengalami gangguan, penyearah jembatan yang lain dapat menyediakan arus medan yang stabil untuk generator. Parameter generator dan tipe SCR menentukan jumlah jembatan paralel dan arus keluaran tiap jembatan.

Sistem kerja dari *thyristor* sama dengan saklar, yang mana *thyristor* mempunyai 2 keadaan yaitu ON (menghantarkan) dan OFF (tidak menghantarkan). Dalam operasi menyearahkan tegangan, *thyristor* dikendalikan oleh AVR. Pengaturan tegangan pada AVR akan menghasilkan sinyal pesaklaran yang diumpangkan ke *driver thyristor* dengan tujuan untuk menguatkan arus pensaklaran atau disebut sebagai *buffer*. Setelah itu keluaran dari *driver* tersebut diumpangkan pada terminal *gate thyristor* penyearah.

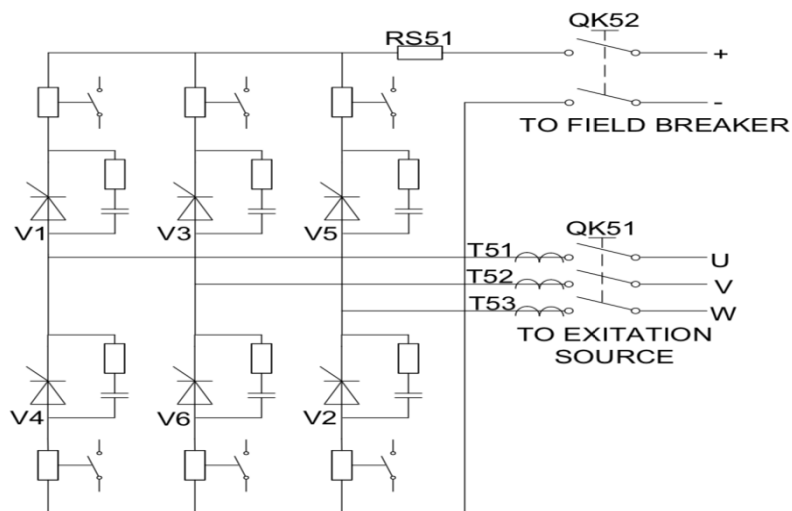
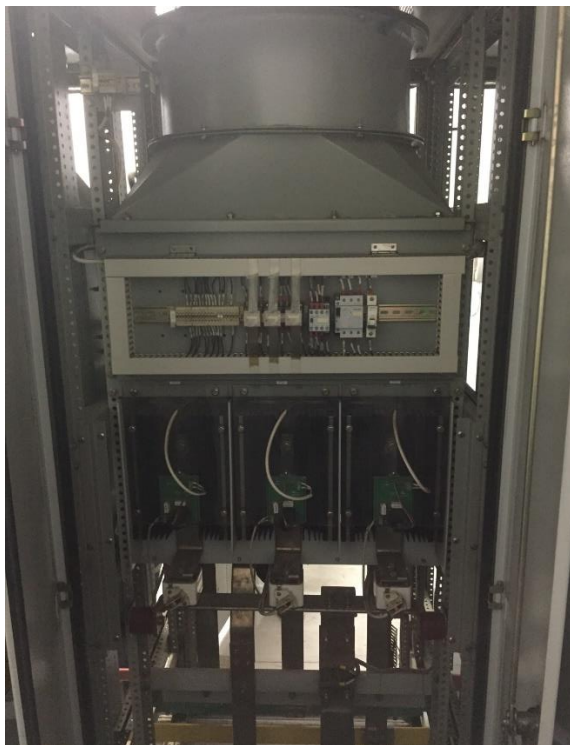


Diagram 2. 3 Diagram rangkaian *rectifier cubicle*





Gambar 2. 25 *Cubicle rectifire* tampak depan  
(Sumber: Setyo, 2019)



Gambar 2. 26 *Cubicle rectifier* tampak belakang  
(Sumber: Setyo,2019)

#### 4. Pemutus medan (FCB)

*Field circuit breaker* (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.

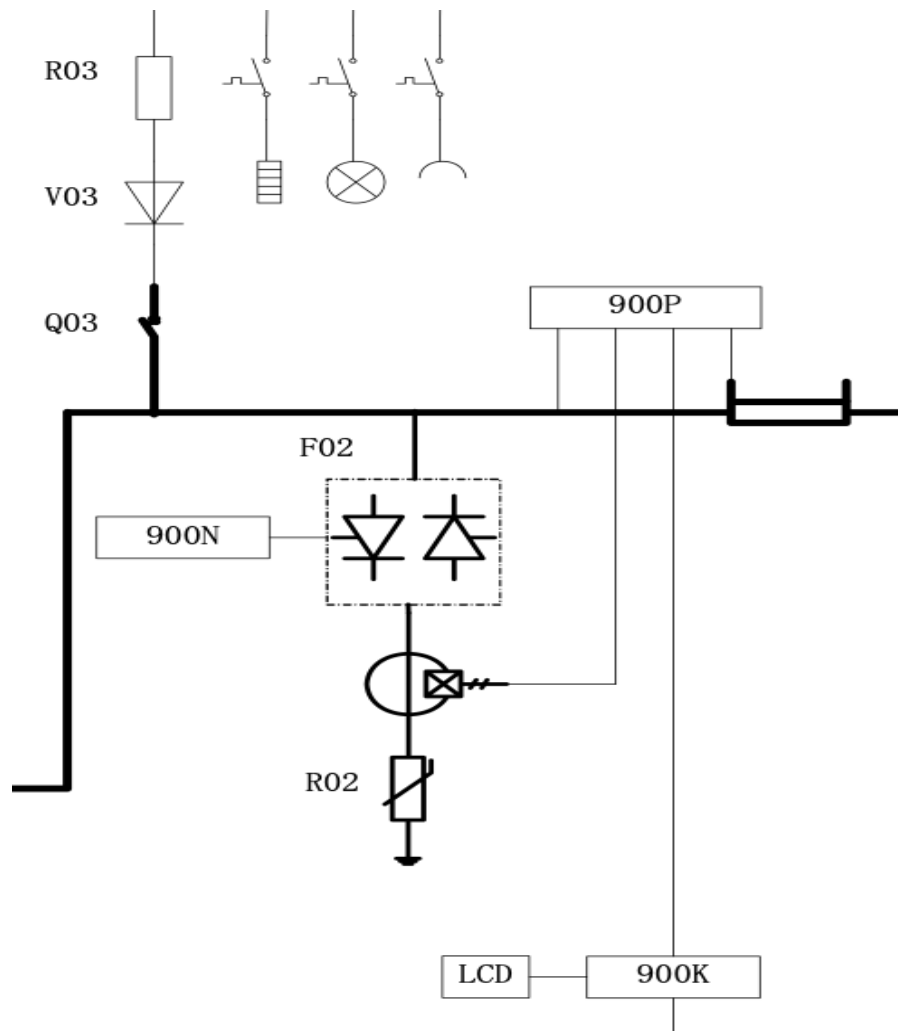


Diagram 2. 4 Diagram rangkaian (FCB)



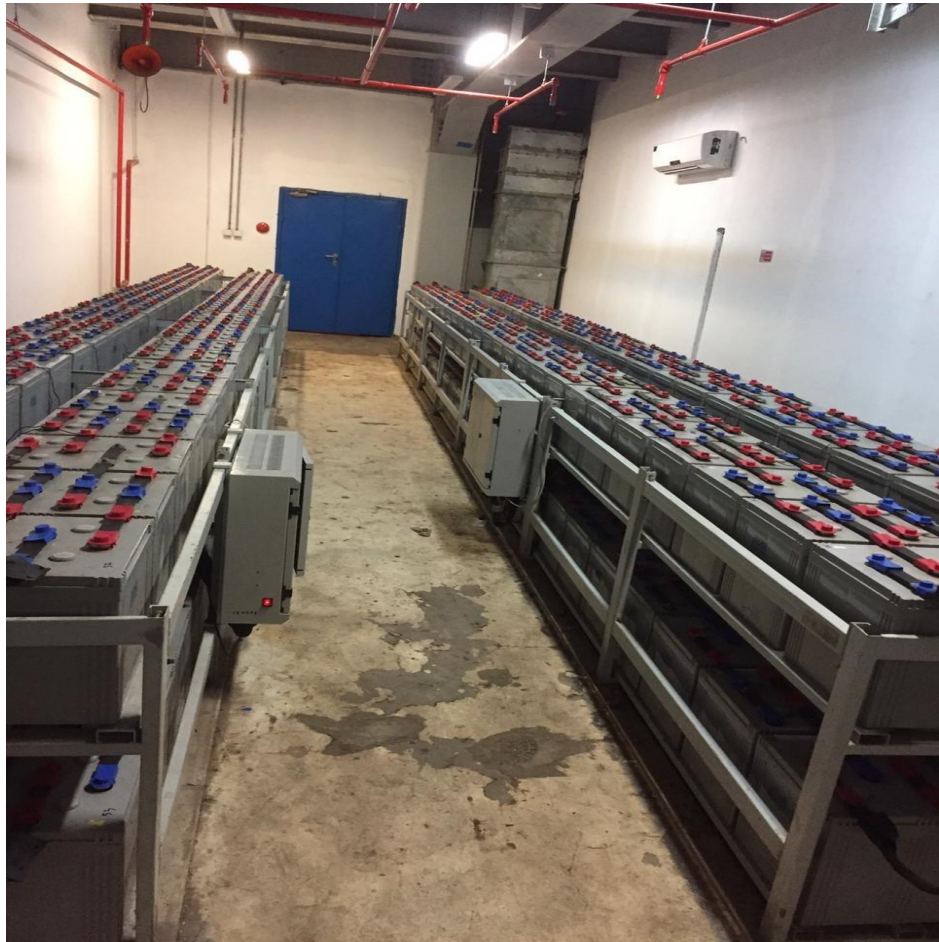
Gambar 2. 27 *Cubicle* FCB tampak depan  
(Sumber: Setyo, 2019)



Gambar 2. 28 *Cubicle* FCB tampak belakang  
(Sumber: Setyo, 2019)

## 5. Battery

*Battery* adalah sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel, adalah didalam baterai dapat berlangsung proses perubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia, pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewatkan arus listrik dalam arah (polaritas ) yang berlawanan didalam sel. *Battery* pada sistem eksitasi di PLTU Klatim teluk berfungsi untuk sistem *start up* eksitasi generator dan jenis *battery* yang digunakan adalah *battery* basah 220VDC



Gambar 2. 29 *Battery* hubung seri  
(Sumber: Setyo, 2019)

### **2.2.10 Pengendalian frekuensi pada generator sinkron**

Pada sistem tenaga listrik frekuensi diperoleh dari kombinasi jumlah putaran dan jumlah kutub listrik pada generator di pembangkit listrik sedangkan ketentuan nilai frekuensi di Indonesia adalah sebesar 50 Hz. Frekuensi di sistem akan konstan apabila total pembangkitan seimbang dengan total beban di tambah rugi-rugi jaringan. Apabila pembangkitan melebihi beban di tambah rugi-rugi, maka frekuensi sistem akan meningkat. Apabila beban di tambah rugi-rugi melebihi pembangkitan, maka nilai frekuensi sistem akan turun. Rentang pengaturan frekuensi yang sempit di perlukan untuk menyediakan frekuensi pasokan yang stabil bagi semua pemakai jaringan dan pelanggan akhir.

Berdasarkan data dari ESDM direktorat jendral ketenagalistrikan batas frekuensi sistem dalam jaringan PLN yang di salurkan ke konsumen di pertahankan dalam batas bawah yaitu -0,2 Hz dan batas atas yaitu +0,2 Hz, kecuali dalam kondisi dan periode transien yang singkat, dimana penyimpangan frekuensi batas bawah sebesar -0,5 Hz dan batas atas maksimal yaitu +0,5 dari 50 Hz masih diizinkan.