

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut ini adalah beberapa referensi penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini, antara lain:

Heri Irawan (2010) melakukan penelitian yang berjudul Sistem Penguatan Dengan Sikat (*Brush Excitation System*) Pada Generator Unit I PLTU Cilacap. Dari penelitian disimpulkan bahwa sistem eksitasi yang baik memiliki respon yang cepat manakala terjadi gangguan internal maupun eksternal yang mempengaruhi kinerja generator sehingga nilai arus eksitasi harus dijaga agar selalu sesuai dengan arus dasar pada sistem eksitasi sehingga kestabilan sistem secara keseluruhan tetap stabil.

Ennopati Pane (2010) melakukan penelitian yang telah dilakukan mengenai Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi Pada Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama). Dari penelitian disimpulkan bahwa besar penguatan dari penguat utama tergantung dari besarnya nilai arus penguat dari AVR terhadap kecepatan putar motor. Selain itu kenaikan arus beban (IL) dapat menyebabkan perubahan pada tegangan terminal (VL). Supaya tegangan terminal dapat dijaga konstan, maka harus mengatur ggl induksi yang dibangkitkan dengan cara mengatur arus medan (If).

Syahputra Rudi (2012) melakukan penelitian yang telah dilakukan mengenai Pengaruh Perubahan Arus Eksitasi Terhadap Tegangan Keluaran Generator Sinkron. Dari penelitian disimpulkan bahwa tegangan keluaran generator sinkron sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya arus eksitasi yang diberikan. Tegangan keluaran generator sinkron akan berbanding lurus dengan nilai arus eksitasi yang diberikan. Penambahan beban mengakibatkan tegangan output generator mengalami penurunan, hal ini memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik antara penambahan arus beban (I_a) dan tegangan output generator sinkron.

Sepannur Bandri (2013) melakukan penelitian yang berjudul Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Genertor Sinkron (Aplikasi Pltg Pauh Limo Padang). Dari penelitian disimpulkan bahwa perubahan arus beban terjadi akibat perubahan nilai beban yang terpakai, sehingga akan mempengaruhi nilai tegangan yang dibangkitkan oleh generator itu sendiri. Pengoperasian generator sinkron memiliki batas tertentu dari besarnya daya yang dapat dihasilkan dan besarnya daya yang dapat dipikul oleh sebuah generator sinkron agar dapat bekerja dengan normal. Pengoperasian generator dituntut suatu kestabilan agar kinerja generator menjadi efektif dan efisien. Dengan penentuan karakteristik generator maka didapatkan nilai yang tepat dalam pengoperasian generator.

Imron (2013) melakukan penelitian mengenai Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator. Dari penelitian disimpulkan bahwa perubahan arus eksitasi berpengaruh terhadap fluktuasi tegangan nominal generator.

Fluktuasi tegangan berkisar $\pm 0,66\%$ dari tegangan nominal dan mengakibatkan perubahan daya reaktif sebesar $\pm 5,26$ MVAR.

Basofi (2014) melakukan penelitian yang berjudul Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya. Dari penelitian disimpulkan bahwa jika arus eksitasi pada generator sendiri dirubah maka faktor daya generator tidak akan berubah namun tegangan akan berubah sedangkan pada generator yang bekerja paralel jika diatur arus eksitasinya akan merubah faktor daya generator dan tegangan akan tetap.

R. Gerha Terimananda, Nasrun Nariyanto, Syahrial (2015) melakukan penelitian mengenai Studi Pengaturan Arus Eksitasi untuk Mengatur Tegangan Keluaran Generator di PT Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2. Dari penulisan yang ia lakukan dapat disimpulkan bahwa nilai sudut penyalaan *thyristor* berbanding terbalik dengan tegangan keluaran generator. Semakin tinggi nilai sudut penyalaan *thyristor* pada rangkaian semi konverter akan menghasilkan nilai tegangan eksitasi pada eksiter dan tegangan keluaran generator mengecil. sebaliknya semakin kecil nilai sudut penyalaan *thyristor* pada rangkaian semi konverter akan menghasilkan nilai tegangan eksitasi pada eksiter dan tegangan keluaran generator membesar.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron adalah suatu mesin listrik yang digunakan untuk memproduksi energi listrik dari sumber mekanikal dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Energi mekanik diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula, sedangkan energi listrik diperoleh dari perpotongan medan magnet dengan penghantar, maka pada penghantar akan timbul gaya gerak listrik melalui proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan rotor dan stator. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif merupakan terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar.

Dikatakan generator sinkron karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, sehingga kecepatan sinkron dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan generator sinkron terdapat pada rotor, sedangkan kumparan jangkar terdapat pada stator. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan yang suplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor. Karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, maka generator sinkron ini akan menghasilkan

energi listrik bolak balik (AC). Hubungan antara kecepatan putar dengan frekuensi ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$f = \frac{n \cdot p}{120}$$

Dimana: f = Frekuensi (Hz)

n = Kecepatan putar (rpm)

p = Jumlah kutub

Frekuensi adalah banyaknya siklus (gelombang) dalam setiap detik (s). Standar frekuensi listrik di Indonesia adalah 50 Hz. Oleh karena itu apabila generator unit pembangkit diputar oleh turbin dengan kecepatan 3000 rpm, maka jumlah kutub magnetnya adalah 2 pasang. Jumlah kutub magnet suatu generator ditentukan berdasarkan putaran kerja dan frekuensi generator yang diinginkan. Frekuensi listrik harus dijaga konstan sepanjang waktu, karena perubahan frekuensi akan menyebabkan berubahnya putaran motor. Indikator kualitas listrik yang baik salah satunya ditunjukkan dengan frekuensi yang stabil.

2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja alternator menerapkan prinsip pembangkitan listrik berdasarkan induksi. Menurut hukum Faraday, apabila kumparan berputar di dalam medan magnet atau sebaliknya medan magnet berputar di dalam kumparan, maka pada ujung-ujung kumparan tersebut akan timbul gaya gerak listrik (GGL) atau timbul tegangan. Besar

tegangan yang diinduksikan pada kumparan medan sangat bergantung pada panjang penghantar dalam kumparan medan, kecepatan putaran dan kuat medan magnet. (Anonim: 2016)

Suatu mesin listrik akan bekerja apabila memiliki kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar untuk menghasilkan ggl induksi pada konduktor yang terdapat pada medan jangkar, serta celah udara yang berfungsi untuk memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

Secara umum prinsip kerja dari generator sinkron adalah apabila kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan mensuplai arus searah (DC) terhadap kumparan medan, maka dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan akan menimbulkan fluks. Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor generator segera dioperasikan, sehingga rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu sesuai dengan jumlah putaran yang diharapkan. Perputaran dari rotor generator tersebut akan sekaligus memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan rotor. Medan putar yang terdapat pada rotor tersebut, selanjutnya akan diinduksikan pada kumparan jangkar, sehingga kumparan jangkar yang terdapat pada stator generator akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah nilainya setiap waktu. Adanya perubahan fluks yang terdapat suatu kumparan medan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung kumparan medan tersebut sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
E_{\text{ind}} &= -N \frac{d\phi}{dt} \\
E &= -N \frac{d\phi_{\text{maks}} \sin \omega t}{dt} \\
&= -N \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t & (\omega = 2\pi f) \\
&= -N(2\pi f) \phi_{\text{maks}} \cos \omega t & (f = \frac{n \cdot p}{120}) \\
&= -N(2\pi \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{\text{maks}} \cos \omega t \\
&= -N(2.3,14 \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{\text{maks}} \cos \omega t \\
E_{\text{maks}} &= N(2.3,14 \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{\text{maks}} \\
E_{\text{eff}} &= \frac{e_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2.3,14 \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \\
&= \frac{4,44 \cdot Npn\phi}{120} & (\frac{4,44Np}{120} = C) \\
E_{\text{eff}} &= Cn\phi
\end{aligned}$$

Dimana: E = ggl induksi (volt)

N = jumlah lilitan

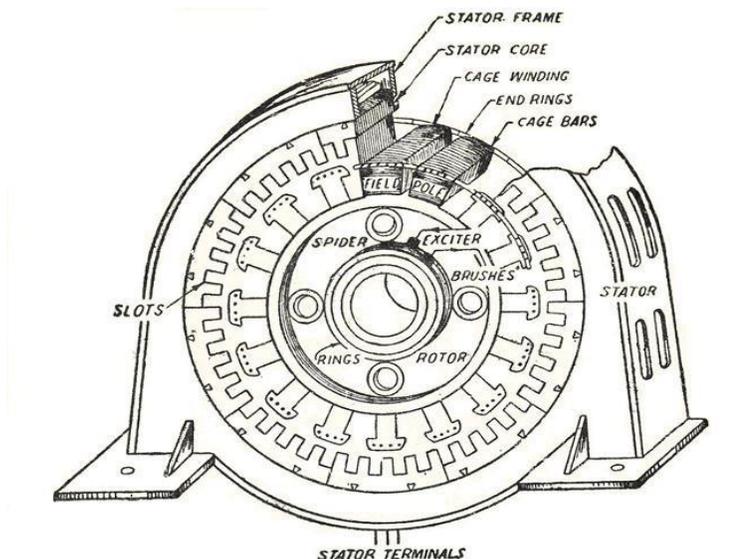
C = konstanta

n = putaran sinkron (rpm)

ϕ = fluks magnetik (weber)

2.2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan komponen utama dalam sistem pembangkitan yang berfungsi untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Kapasitas generator dari waktu ke waktu berkembang semakin besar dengan teknologi konstruksi dan rancang bangun yang semakin maju. Kapasitas generator pembangkitan di Indonesia sangat bervariasi, karena pembangunannya disesuaikan dengan kebutuhan energi yang harus dilayani. Konstruksi generator sinkron semuanya menggunakan medan magnet putar stator. Hal ini bertujuan untuk memudahkan penyambungan (*connection*) energi listrik keluar generator, karena titik terminal penyambungannya terdapat pada stator generator. Dapat dilihat pada gambar 2.1 konstruksi sederhana dari sebuah generator sinkron sebagai berikut:



Gambar 2.1 Konstruksi Generator Sinkron

(Sumber: Ennopati, 2009)

Secara umum konstruksi generator sinkron sama dengan motor sinkron, dimana konstruksi generator sinkron terdiri dari rotor, stator dan celah udara. Rotor yaitu bagian yang berputar dalam suatu generator dimana kumparan medan disuplai arus searah dari eksitasi. Stator yaitu bagian dari generator sinkron yang diam, dimana akan menghasilkan ggl induksi pada konduktor yang terdapat pada medan jangkar. Celah udara adalah ruang antara rotor dan stator yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluks atau induksi energi listrik dari rotor ke stator dan memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

1. Rotor

Rotor berfungsi sebagai tempat ketika medan magnet dibangkitkan, dimana belitan medan magnet tersebut akan membentuk kemagnetan antara litrik kutub utara dan selatan yang terjadi pada inti rotor. Terdapat beberapa komponen utama dalam rotor generator yaitu:

a. *Slip Ring*

Slip ring berfungsi untuk mengaliri arus searah menuju medan magnet pada rotor. *Slip ring* ini terbuat dari bahan yang kuat dan tahan terhadap panas sehingga *Slip ring* ini mampu mengaliri arus ke rotor generator dengan baik. Kemudian *Slip ring* dipasangkan pada terminal kumparan rotor dan dihubungkan ke sumber arus searah menggunakan sikat (*brush*).

b. Kumparan Medan

Kumparan medan adalah kumparan medan terbuat dari tembaga berlapis perak yang dibuat dengan rapi. Kumparan ini berfungsi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor yang mendapat sumber dari eksitasi.

c. Sikat

Pada umumnya generator sinkron memiliki dua jenis yaitu generator sinkron yang menggunakan sikat (*brush*) dan tanpa menggunakan sikat (*brushless*). Sikat pada generator sinkron berguna sebagai saklar putar untuk mengalirkan arus searah ke kumparan medan. Namun daya yang dihasilkan dengan menggunakan sikat pada generator ini sangat terbatas tidak sebesar seperti daya yang dihasilkan oleh generator yang menggunakan sistem *brushless*. Penggunaan sikat pada generator dengan daya yang besar dapat menimbulkan *losses* yang besar dan lonjatan api yang dapat menimbulkan kebakaran pada sistem pembangkit tersebut.

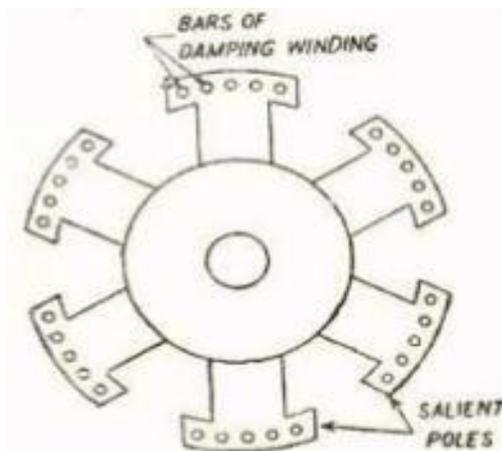
d. Poros rotor

Poros rotor adalah sebagai tempat untuk meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor generator tersebut berbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Pada dasarnya rotor generator sinkron adalah sebuah elektromagnet yang besar, dimana kutub medan magnet pada rotor generator sinkron berupa *salient pole* (kutub menonjol) dan *non-salient pole* (kutub tak menonjol).

a. *Salient pole* (Kutub Menonjol)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. *Salient pole* mempunyai jumlah kutub yang banyak, hal ini ditandai dimana *salient pole* memiliki diameter yang besar dan panjang serta memiliki sumbu pendek. Kumparan pada *salient pole* ini dibelitkan pada tangkai kutub yang diberi laminasi untuk mengurangi panas berlebihan yang timbul karena arus Eddy. Bentuk dari *salient pole* (kutub menonjol) dapat dilihat pada gambar berikut:



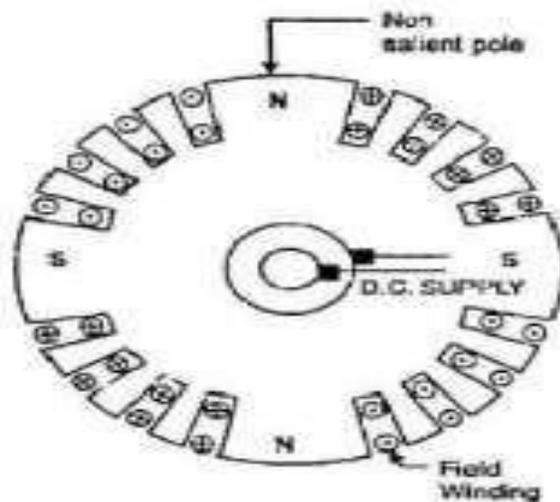
Gambar 2.2 Rotor *salient pole*

(Sumber: Anthony, 2013)

Pada umumnya rotor *salient pole* (kutub menonjol) digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran yang rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron menggunakan rotor *salient pole* seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor *salient pole* sangat bagus untuk digunakan pada putaran rendah dan sedang, hal ini dikarenakan apabila digunakan pada kecepatan yang tinggi rotor ini dapat menimbulkan rugi-rugi yang besar, menimbulkan bersuara bising dan tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

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

Pada jenis *non-salient pole*, rotor jenis ini terbuat dari plat baja yang berbentuk silinder dimana konstruksi medan magnetnya rata dengan permukaan rotor generator sinkron. Belitan medannya dipasang pada alur-alur sisi luar dan terhubung seri yang mendapatkan pasokan listrik yang terhubung dengan *exciter*. Konstruksi dari rotor *non-salient pole* adalah dengan memberikan keseimbangan mekanis yang lebih baik dibandingkan rotor *salient pole* karena rugi-ruginya lebih kecil. Bentuk dari rotor *non-salient pole* generator sinkron adalah seperti gambar 2.3 sebagai berikut:



Gambar 2.3 Rotor Kutub *non-salient pole*

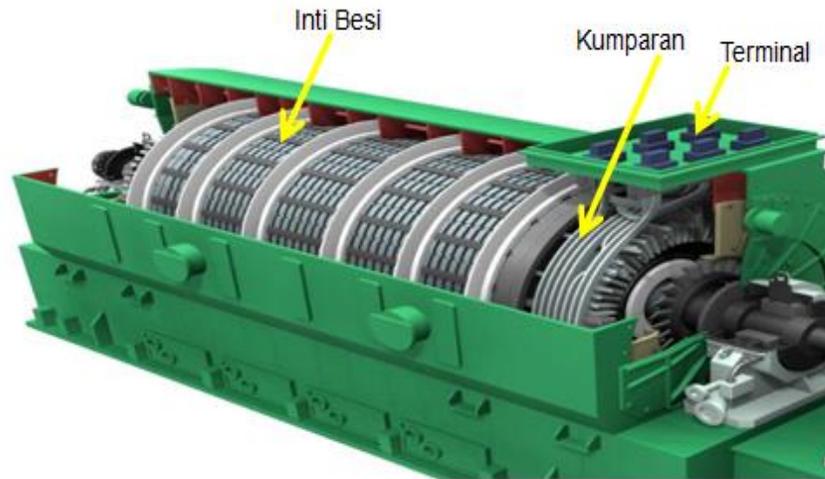
(Sumber: Anthony, 2013)

Rotor kutub *non-salient pole* ini biasanya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar yang tinggi (lebih dari 1500 rpm) dengan diameter kecil dan panjang. Kumparan rotor diatur sedemikian sehingga terdapat fluks maksimum pada satu posisi tertentu. Rotor dengan bentuk ini biasanya lebih *balance* dan memiliki kebisingan (*noise*) yang rendah. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi. Selain itu distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2. Stator

Stator, bagian ini tersusun dari plat-plat stator yang mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan ini berfungsi untuk

membangkitkan ggl induksi. Konstruksi suatu stator dari generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Kosntruksi rotor

(Sumber: Anonim, Pemeliharaan Listrik Pembangkit,.2016)

Terdapat beberapa komponen utama dalam stator generator sinkron yaitu sebagai berikut:

a. Rangka stator (*Stator Frame*)

Rangka stator merupakan sebagai tempat dari kumparan jangkar pada generator. Rangka stator berupa kerangka (rumah pembangkit) yang terbuat dari elemen plat baja yang dibentuk sedemikian rupa hingga diperoleh rangka stator yang sesuai dengan kebutuhan. Pemasangan rangka stator dilakukan dengan cermat agar diperoleh kedudukannya yang tepat dan mampu menahan hal-hal dan kondisi yang tidak menguntungkan baik pada saat gangguan seperti hubung singkat maupun gangguan bencana alam. Gambar dibawah memperlihatkan rangka stator pada generator.

b. Inti Stator

Inti stator merupakan tempat mengalirnya fluks magnet yang memotong kumparan jangkar di stator. Dimana inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator. Tujuan dari laminasi-laminasi tersebut adalah untuk mengurangi besarnya arus pusar (*eddy current*), karena arus pusar ini dapat menimbulkan panas pada inti stator yang dapat merusak inti stator dan isolasi kumparan penghantar.

c. *Slot* (alur) dan Gigi

Slot (alur) dan gigi adalah tempat konduktor berada yang letaknya pada bagian dalam sepanjang keliling stator. Pada *Slot* (alur) dan gigi terdapat tiga bentuk yaitu, slot terbuka, slot setengah terbuka dan slot tertutup. Ketiga bentuk *slot* (alur) dan gigi tersebut dapat terlihat seperti gambar 2.5 berikut:



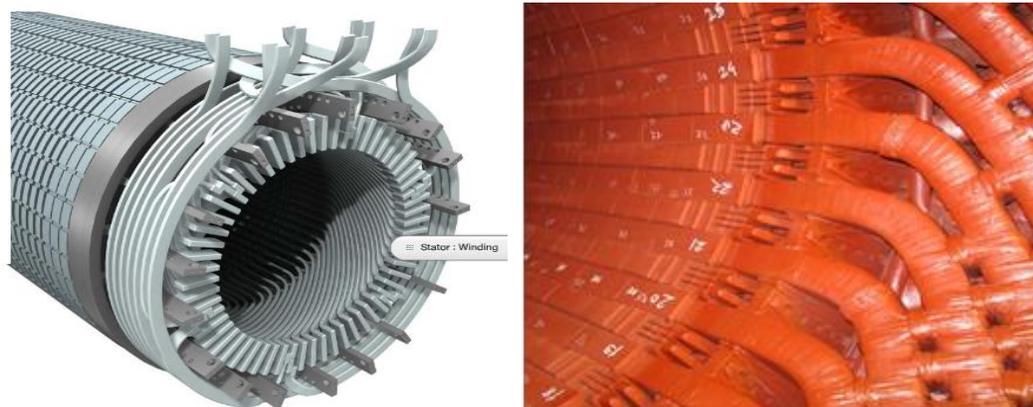
Gambar 2.5 Bentuk-bentuk Alur

(Sumber: Anonim, Pemeliharaan Listrik Pembangkit, 2016)

d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar adalah tempat terbentuknya GGL induksi yang diakibatkan adanya perpotongan medan magnet putar dari rotor yang memotong kumparan jangkar atau penghantar stator. Kumparan jangkar ini berupa gulungan kawat penghantar yang berisolasi yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi..

Pada kumparan jangkar stator akan mengalirkan arus jangkar bolak – balik 3 fasa apabila pada kumparan tersebut terhubung dengan beban. Dimana arus tersebut akan menimbulkan panas pada kumparan yang dapat merusak isolasi kumparan jangkar dan memberi efek pemanasan pada inti besi. Kumparan tersebut dibagi menjadi 3 bagian yang berbeda fasa 120^0 listrik. Dimana umumnya dihubungkan dengan sambungan bintang (Y) dan delta (Δ). Adapun gambar konstruksi kumparan jangkar stator dapat diperlihatkan pada gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Konstruksi Kumparan Stator

(Sumber: Anonim, Pemeliharaan Listrik Pembangkit, 2016)

2.2.4 Sinkronisasi Generator

Sebuah generator dapat terhubung ke dalam sistem maka ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi untuk menjaga generator agar bekerja seperti halnya generator, bukan menjadi motor. Syarat-syarat yang harus dipenuhi sebelum terhubung ke sistem diantaranya yaitu:

1. Tegangan kedua alternator harus sama

Pada saat tegangan sinusoidal memiliki nilai sama baik tegangan yang ada pada jaringan maupun yang dibangkitkan dari generator sinkron. Saat proses sinkronisasi perbedaan tegangan generator sangat sensitif terhadap pembebanan. Pengaturan generator sinkron dapat dilakukan dengan cara penurunan arus eksitasi yang masuk pada kumparan medan (*field winding*) generator.

Hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi kerusakan pada aspek mekanis generator. Perbedaan tegangan akan menimbulkan loncatan bunga api sehingga dapat merusak transformator. Pada saat proses paralel generator, tegangan pada generator lebih besar dibandingkan tegangan pada jaringan. Oleh karena itu maka generator akan menerima lonjakan beban *lagging* (induktif) yang apabila dalam jumlah yang besar dapat menimbulkan panas pada belitan stator.

2. Frekuensi kedua alternator harus sama

Sebelum proses sinkronisasi dilakukan, generator harus diputar, sehingga frekuensi tegangan *output* sama dengan frekuensi sistem. Namun untuk

memastikan fungsi kerja mesin tersebut adalah sebagai generator, maka sebelum proses sinkronisasi, frekuensi dinaikkan sedikit diatas frekuensi sistem. Namun yang perlu diketahui, bahwa semakin besar perbedaan frekuensi maka semakin besar hentakan mekanis yang akan diterima generator. Untuk mencegah terjadinya kerusakan pada sistem maka perbedaan frekuensi sistem dan frekuensi generator di ubah sekecil mungkin. Frekuensi generator dengan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakan frekuensi tersebut, maka putaran generator harus diatur terlebih dahulu dengan mengatur katup *governor* (aliran uap masuk turbin). Ketika frekuensi generator lebih besar dari frekuensi sistem, maka sistem akan mengalami sentakan beban (MW) dari mesin yang menyebabkan mesin membangkitkan MW. Namun sebaliknya ketika frekuensi generator lebih rendah dari frekuensi sistem, maka mesin akan mengalami sentakan (MW) dari sistem yang menyebabkan mesin menjadi motor (*motoring*).

Standar frekuensi yang digunakan di Indonesia yaitu 50 Hz. Sesuai standar dari PLN, frekuensi sebaiknya tidak melebihi ± 0.5 dari 50 Hz, yaitu: 49,5 - 50,5 Hz atau 2970 - 3030 Rpm. (Anonim, 2016).

3. Urutan sudut *phase* harus sama

Urutan sudut *phase* pada generator sinkron terhadap jaringan jala-jala harus sama, dimana urutan U,V dan W dari generator sinkron urutannya harus sama dengan phase R,S dan T jaringan jala-jala. Urutan phase ini sangat berkaitan dengan kontruksi awal dari penyambungan paralel *phase* generator dengan

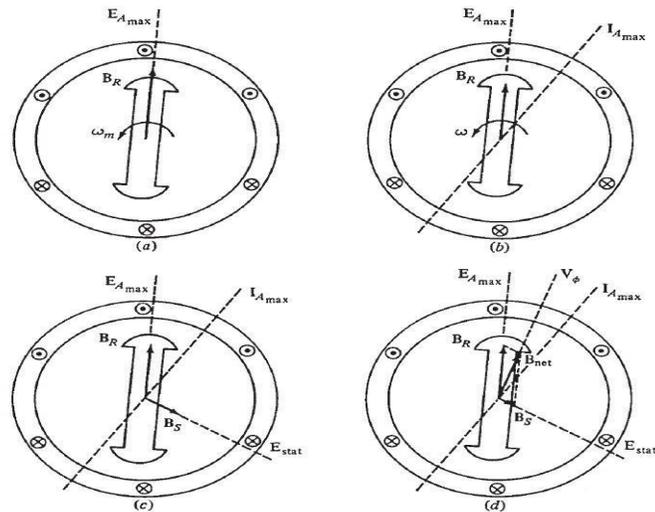
jaringan. Apabila terjadi perbedaan urutan *phase* pada generator terhadap jaringan, maka mengakibatkan sentakan perpindahan daya antara mesin dengan jaringan, sehingga mengakibatkan terjadinya gangguan dan kondisi sirkulasi arus antara mesin dengan jaringan dimana besarnya ditentukan oleh perbedaan antara mesin dan jaringan tersebut.

2.2.5 Reaksi Jangkar Generator

Ketika generator sinkron bekerja pada saat tanpa beban, maka tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar I_a akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluks jangkar akan mempengaruhi fluks arus medan yang menyebabkan berubahnya nilai tegangan terminal generator sinkron. Ketika beban terhubung ke terminal generator, maka belitan stator akan mengalirkan arus yang menimbulkan medan magnet pada belitan stator.

Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_{Amax} pada gambar 2.7.a. Saat generator melayani beban induktif, maka tegangan resultan menghasilkan arus *lagging* pada gambar 2.7.b. Arus stator akan menghasilkan medan magnet sendiri dan tegangan stator E_{Stator} di belitan stator pada gambar 2.7.c. Vektor penjumlahan antara E_{Stator} dengan E_{Amax} akan menghasilkan V_t pada outputnya, seperti

pada gambar 2.7.d. Dari penjelasan diatas dapat dilihat pada gambar 2.13 sebagai berikut:



Gambar 2.7 Reaksi Jangkar

(Sumber: Ennopati, 2009)

Reaksi jangkar pada generator sinkron bergantung pada jenis beban yang dilayani atau dengan kata lain tergantung dari sudut fase antara arus jangkar dan tegangan induksi. Arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar yang bersifat reaktif ketika dalam keadaan berbeban. Oleh karena itu dinyatakan sebagai reaktansi pemagnetan. Reaktansi pemagnetan bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor dikenal sebagai reaktansi sinkron. Reaksi jangkar dapat menimbulkan beberapa pengaruh pada stator generator yaitu berupa distorsi, *magnetising*, maupun *demagnetising* fluks arus medan pada celah udara. Pengaruh yang ditimbulkan reaksi jangkar adalah sebagai berikut:

1. Untuk beban resistif ($\cos \theta = 1$)

Beban resistif adalah beban yang hanya mengkonsumsi daya nyata atau daya aktif. Ketika generator dibebani oleh beban resistif, maka putaran *prime mover* dan tegangan terminal akan menurun. Tegangan terminal generator dapat dijaga agar tetap berada pada tegangan jaringan interkoneksi dengan memperbesar fluks medan yang terlebih dahulu memperbesar arus eksitasi yang disuplai ke dalam kumparan medan. Pada beban resistif, pengaruh fluks jangkar terhadap fluks medan hanya mendistorsi tanpa mempengaruhi kekuatannya (*magnetising*).

2. Untuk beban induktif ($\cos \theta = 0$ *lagging*)

Beban yang bersifat induktif hanya mengkonsumsi daya reaktif saja. Untuk memperbesar daya reaktif (MVAR) dari pembangkit, maka dapat dilakukan dengan memperbesar fluks medan yang terlebih dahulu memperbesar arus eksitasi yang disuplai ke dalam kumparan medan pada generator. Pada beban induktif dengan $\cos \theta = 0$ dan bersifat *lagging*.

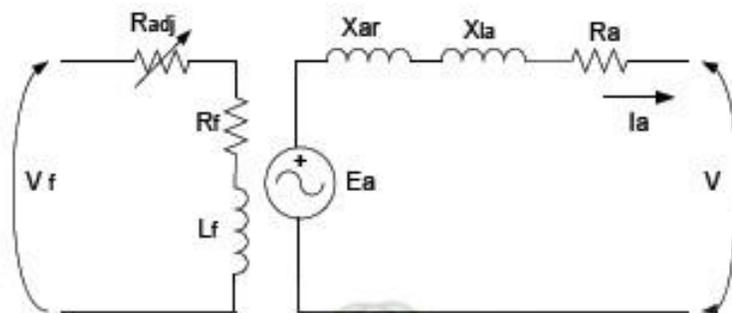
3. Untuk beban kapasitif ($\cos \theta = 0$ *leading*)

Pada generator, ketika terjadi penguatan fluks medan pada kumparan akan mengakibatkan kenaikan tegangan terminal. Agar tegangan terminal generator sama dengan besar tegangan jaringan, maka arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan rotor generator dikurangi. Apabila pemakaian beban kapasitif meningkat, maka arus eksitasi yang disuplai ke rotor akan dikurangi. Pada beban

kapasitif dengan $\cos \theta = 0$ dan bersifat *leading*, maka arus akan mendahului tegangan sebesar 90° . Fluks resultan pada celah udara akan bertambah dari fluks medan ketika fluks yang dihasilkan arus jangkar searah dengan fluks arus medan.

2.2.6 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Stator merupakan belitan jangkar yang terbuat dari tembaga. Belitan belitan ini diletakkan pada alur-alur (slot), dimana belitan konduktor hanya terdiri dari tahanan (R_a) dan induktansi (L). Arus akan mengalir pada konduktor ketika konduktor bekerja, sehingga membentuk fluks jangkar yang membangkitkan medan putar. Fluks jangkar akan berinteraksi dengan fluks medan yang menyebabkan terjadinya konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Reaktansi bocor (X_A) merupakan suatu kondisi dimana masih ada fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang timbul akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar (X_{ar}) dan reaktansi bocor jangkar (X_{la}) sehingga rangkaian ekivalen generator sinkron akan menjadi seperti Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 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

Berdasarkan gambar 2.8 diatas, maka dapat ditulis persamaan tegangan generator sebagai berikut:

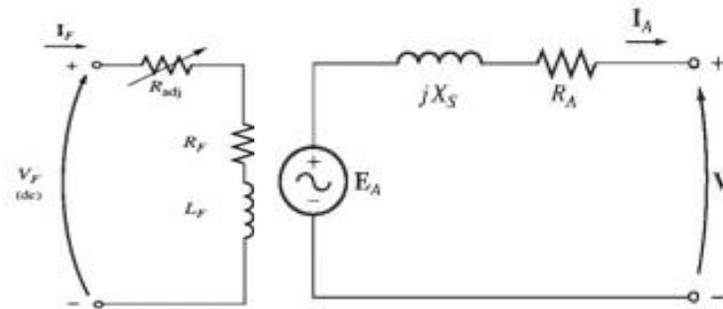
$$E_a = V + jX_{ar} I_a + jX_{la} I_a + R_a I_a$$

Dari persamaan tegangan terminal generator sinkron dapat di tulis:

$$V = E_a - jX_{ar} I_a - jX_{la} I_a - R_a I_a$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_{ar} + X_{la}$, maka dapat dilihat pada gambar 2.9 persamaannya menjadi sebagai berikut:

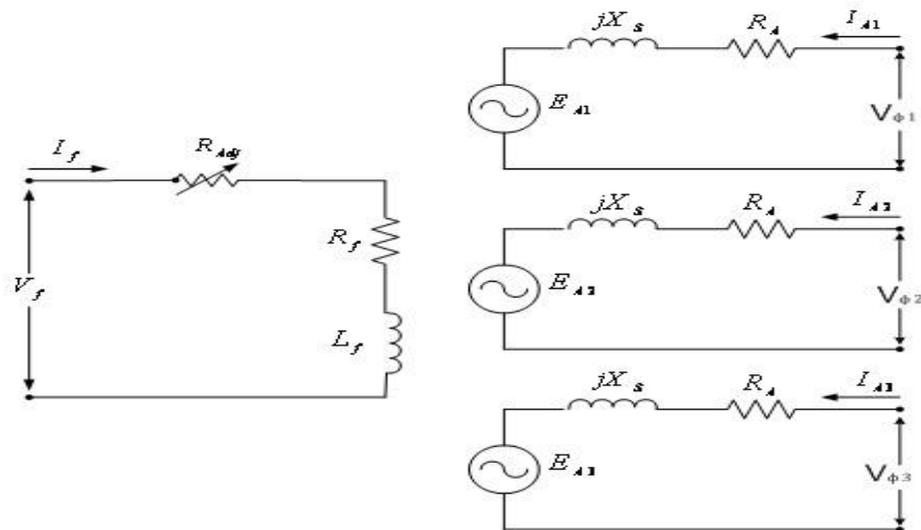
$$V = E_a - jX_s I_a - R_a I_a \quad (volt)$$



Gambar 2.9 Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

(Sumber: Ramdhani, 2008)

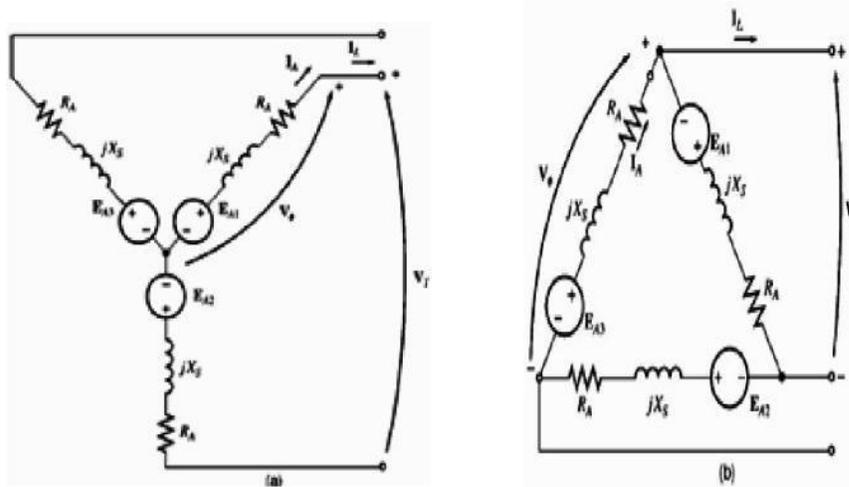
Tegangan yang dibangkitkan pada generator sinkron merupakan tegangan bolak balik (AC) tiga fasa, dimana biasanya ditampilkan dalam bentuk fasor. Diagram fasor yang menunjukkan dalam bentuk hubungan antara tegangan induksi perfasa dengan tegangan terminal generator seperti pada gambar 2.10 berikut:



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tiga Fasa

(Sumber: Ramdhani, 2008)

Sedangkan untuk generator sinkron tiga fasa, rangkaian ekivalen generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut:



Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

(a) Hubung-Y (b) Hubung-D

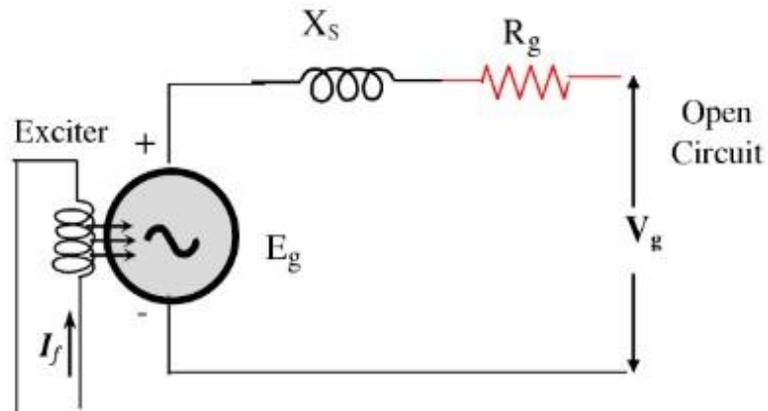
(Sumber: Ramdhani, 2008)

2.2.7 Karakteristik Generator Sinkron

Ada beberapa karakteristik yang digunakan untuk menentukan parameter mesin listrik yaitu:

1. Karakteristik *Open Circuit*

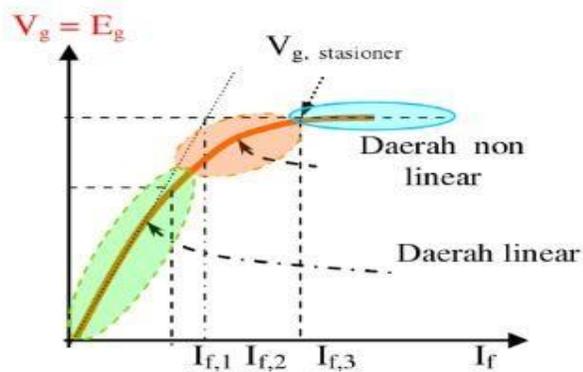
Seperti pada mesin arus searah karakteristik kurva magnetisasi dari mesin sinkron adalah kurva perubahan tegangan terminal atau ggl sebagai fungsi dari perubahan fluks atau arus medan eksitasi.



Gambar 2.12 Rangkaian Generator Sinkron Pada Kondisi Open Circuit

(Sumber: Muslim, 2008)

Ketika nilai arus medan eksiter diperbesar hingga I_f tertentu maka tegangan terminal akan naik dari nol dan bertambah secara linear, sampai pada suatu titik arus eksitasi terjadi perubahan arah tegangan yang tidak lagi linear dan menuju suatu kondisi yang stasioner atau kondisi jenuh dan kemudian ketika I_f terus dinaikkan sampai pada titik tertentu maka tegangan tidak lagi mengalami perubahan harga atau konstan.



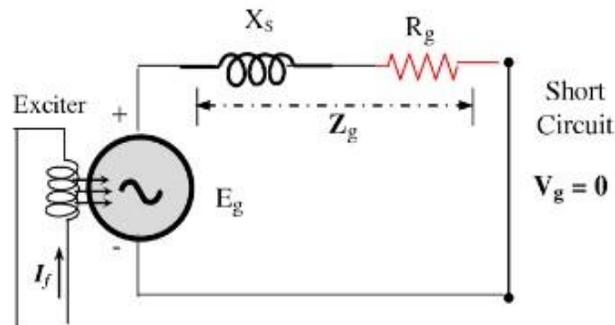
Gambar 2.13 Kurva V_g Terhadap I_f Pada Kondisi *Open Circuit*

(Sumber: Muslim, 2008)

Harga dari I_{f2} sampai dengan I_{f3} adalah tambahan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh. Dan besar tegangan terminal jangkar generator dalam keadaan rangkaian terbuka (*open circuit*) adalah sama dengan besar ggl ($V_g = E_g$).

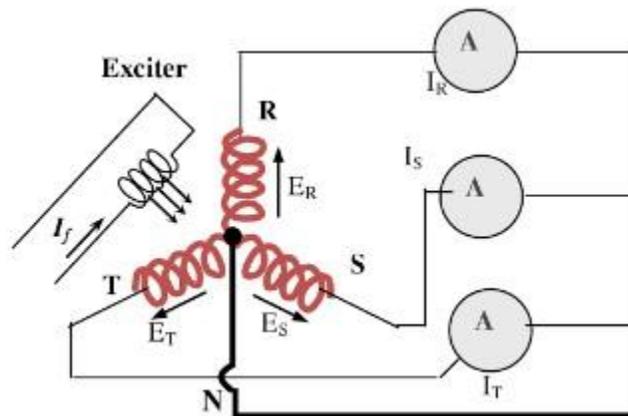
2. Karakteristik Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Karakteristik *short circuit* adalah suatu bentuk penggambaran dari hubungan arus fasa hubung singkat sebagai fungsi arus medan, di mana ketiga fasa generator dihubung singkat dengan kecepatan putaran yang konstan.



Gambar 2.14 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Satu Fasa

(Sumber: Muslim, 2008)



Gambar 2.15 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Tiga Fasa

(Sumber: Muslim, 2008)

Dari persamaan umum generator diperoleh:

$$E_a = V_g + I_g(R_g + jX_s)$$

Karena generator dalam keadaan hubung singkat, nilai tegangan terminalnya menjadi nol, sehingga:

$$E_a = I_g(R_g + jX_s)$$

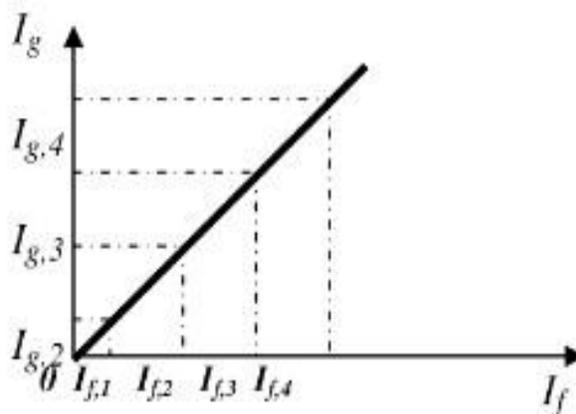
Pada kondisi ini $(R_g + jX_s)$, adalah konstan = K_2 , dan $I_g = I_{hs}$, sehingga:

$$K_1 I_f = I_{hs} K_2$$

$$I_{hs} = \frac{K_1}{K_2} I_f$$

Dari persamaan di atas, pengukuran hubung singkat ini berdasarkan pada penambahan arus medan ketika kondisi nol hingga batas yang diperlukan.

Karakteristik hubung singkat ini dapat dilihat pada gambar 2.16 sebagai berikut:



Gambar 2.16 Karakteristik Pada Kondisi Hubung Singkat

(Sumber: Muslim, 2008)

2.2.8 Daya Generator

2.2.8.1 Pengertian Daya

Daya listrik memiliki satuan Watt dalam Standar Internasional (SI), dimana daya listrik berfungsi sebagai bentuk besaran terukur yang ditunjukkan dengan adanya produksi energi listrik dari pembangkit, maupun penyerapan energi listrik pada beban. Secara umum daya listrik adalah kecepatan aliran suatu energi listrik pada suatu jaringan listrik ke beban dalam tiap satuan waktu. Dalam suatu sistem pembangkit daya dikenal dengan tiga daya yaitu:

1. Daya Aktif / Nyata (P)

Daya nyata yang memiliki satuan Watt (W). Daya aktif merupakan daya yang dibutuhkan oleh beban resistif, dimana daya ini akan menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit ke beban. Secara umum daya ini sering digunakan oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik. Dalam kehidupan sehari-hari energi listrik yang disalurkan dari PLN ke rumah-rumah, maka daya yang tertulis pada kWh meter merupakan daya aktif dan itu merupakan daya yang akan dibayarkan oleh pelanggan.

2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif memiliki satuan (VAR). Daya reaktif merupakan daya yang tidak dimanfaatkan oleh konsumen, namun hanya dapat dimanfaatkan pada pembangkitan. Pada pembangkit daya reaktif ini digunakan untuk

membangkitkan medan magnet, sehingga dari pembangkitan medan magnet tersebut akan terbentuk fluks-fluks magnet.

3. Daya Semu/ Tampak (S)

Daya semu memiliki satuan (VA). Daya semu merupakan daya sebenarnya yang disuplai oleh PLN, yang merupakan resultan antara daya aktif (P) dengan daya reaktif (Q).

2.2.8.2 Faktor Daya

Faktor daya 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.

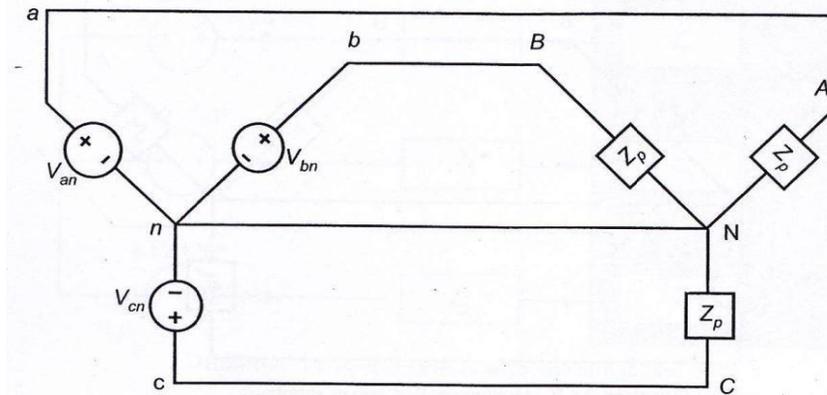
2.2.8.3 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan hubungan terhadap daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang dinyatakan dengan mempresentasikan daya-daya tersebut sebagai vektor.

2.2.8.4 Daya Sistem Tiga Fasa

Dalam menghubungkan beban tiga fasa seimbang ada dua cara yaitu dengan cara hubung delta dan hubung Y. Pada penerapannya dalam menghubungkan beban tiga fasa lebih banyak menggunakan hubung Y. Jika sumber tegangan tiga

fasa hubungan Y dihubungkan dengan beban seimbang (sumber mempunyai tegangan fasa yang sama dan beban tiap fasa sama besarnya), maka didapat:



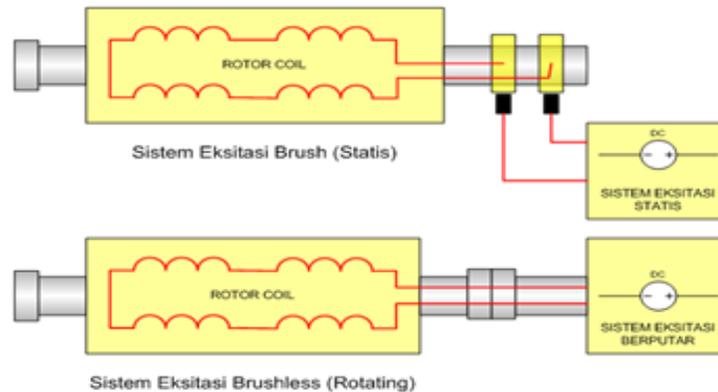
Gambar 2.17 Hubungan Y Beban Seimbang

(Sumber: Ramdhani, 2008)

2.2.9 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi merupakan suatu proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah (DC) pada belitan medan pada rotor generator sinkron. Secara umum ketika suatu konduktor berupa kumparan dialiri arus searah (DC), maka kumparan tersebut akan menjadi magnet yang nantinya akan menghasilkan fluks magnet. Ketika kumparan medan sudah diberi arus searah yang di dapat dari arus eksitasi dan berputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar stator generator akan terinduksi dari fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan, sehingga akan menghasilkan tegangan listrik bolak-balik (AC). Tegangan yang dihasilkan oleh generator sangat tergantung dari besarnya arus eksitasi dan

putaran rotor, hal ini dikarenakan semakin besar arus eksitasi dan putaran yang diberikan, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh generator.



Gambar 2.18 Bentuk sederhana sistem eksitasi pada Generator

(Sumber: Anonim, Pemeliharaan Listrik Pembangkit, 2016)

Seperti yang diketahui bahwa arus eksitasi menggunakan arus searah, maka sebagai eksiternya adalah mesin arus searah (generator DC) atau dapat juga dengan menggunakan mesin arus bolak-balik (generator AC) kemudian disearahkan dengan *rectifier*. Secara umum dalam penyaluran sistem arus searah pada rotor, sistem eksitasi terbagi atas dua jenis yaitu sistem eksitasi menggunakan sikat (*brush excitation*) dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) ada dua jenis yaitu:

1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah).
2. Sistem eksitasi statis.

Sedangkan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*) terdiri dari:

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan baterai.
2. Sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG).

2.2.9.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (*brush excitation*)

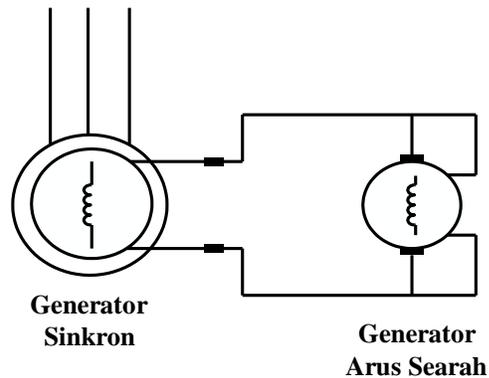
1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah).

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut dengan eksiter. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron. Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter diberikan kebelitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan *slip ring*. Akibatnya arus searah mengalir ke rotor dan menimbulkan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator sinkron. Pada sistem eksitasi konvensional ini terdapat beberapa kerugian yaitu:

- a. Generator arus searah merupakan beban tambahan untuk penggerak mula (*prime mover*).

- b. Penggunaan *slip ring* dan sikat dapat menimbulkan masalah ketika digunakan untuk mensuplai sumber arus searah pada belitan medan generator sinkron.
- c. Terdapat sikat arang yang menekan slip ring sehingga menimbulkan rugi gesekan pada generator utamanya.
- d. Generator arus searah juga memiliki keandalan yang rendah.

Setelah mempertimbangkan segala kerugian tersebut, maka saat ini pada penguatan medan magnet kebanyakan menggunakan sistem eksitasi statis. Gambar 2.19 adalah sistem eksitasi yang menggunakan generator arus searah.



Gambar 2.19 Sistem Eksitasi Menggunakan Generator Arus Searah

(Sumber: Ahmad Faisal, 2011)

2. Sistem eksitasi statis.

Sistem eksitasi statis merupakan sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis (*static excitation system*) ini biasa disebut juga dengan *self*

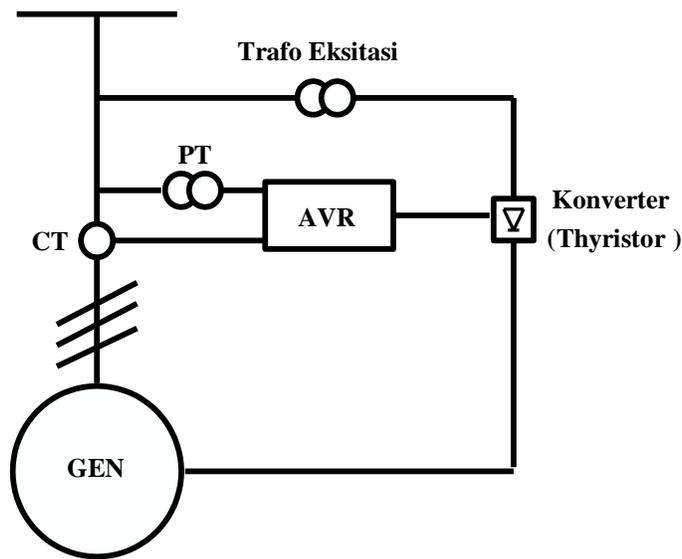
excitation yang merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron tersebut. Sumber eksitasi pada sistem eksitasi statis ini berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah *thyristor*.

Pada mulanya pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini akan masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor. Akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik. Demikian seterusnya hingga dicapai tegangan nominal yang dibutuhkan oleh generator untuk proses pembangkitan. Biasanya penyearah itu juga mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Pengaturan tersebut biasanya dilakukan oleh peralatan yang disebut dengan AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

Sistem eksitasi statis, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional memang sudah jauh lebih baik karena tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban pada penggerak utama berupa generator arus searah dihilangkan.

Pada sistem eksitasi statis ini, untuk keperluan eksitasi awal pada generator sinkron saat belum mampu menghasilkan tegangan keluaran, maka energi yang digunakan untuk sistem eksitasi diambil dari baterai. Dan proses ini dinamakan dengan proses *field flashing*. Di mana pada proses *field flashing* ini baterai menginjeksikan arus eksitasi ke rotor generator. Hal ini dibutuhkan

karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan. Dengan adanya arus eksitasi ini maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran. Gambar 2.20 berikut adalah sistem eksitasi statis.



Gambar 2.20 Sistem Eksitasi Statis

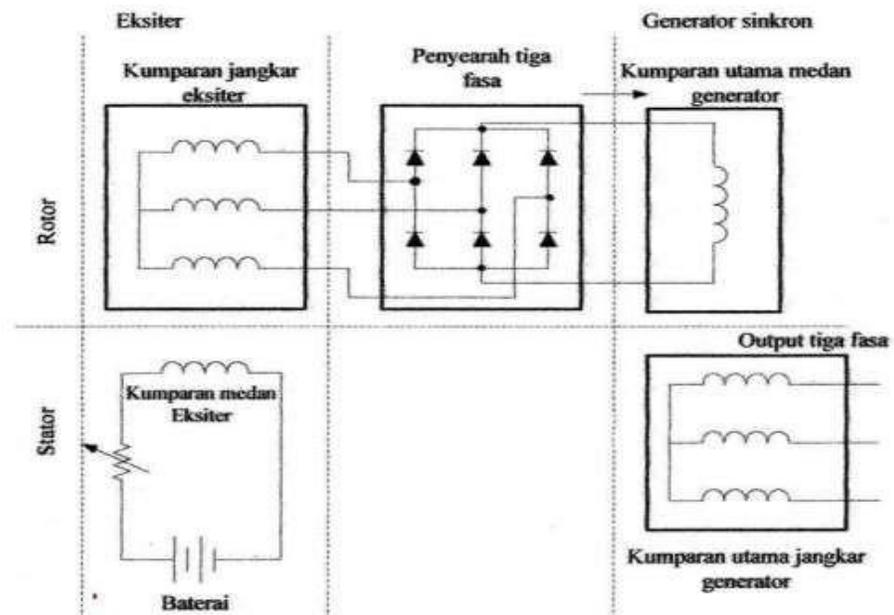
(Sumber: Ahmad Faisal, 2011)

2.2.9.2 Sistem Eksitasi Tanpa Menggunakan Sikat Sikat (*brushless excitation*)

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan baterai.

Sistem eksitasi tanpa sikat diaplikasikan pada generator sinkron, sebagaimana suplai arus searah ke belitan medan dilakukan tanpa melalui sikat. Arus searah yang digunakan untuk suplai eksitasi *start* awal generator menggunakan suplai dari baterai, dimana arus ini selanjutnya disalurkan ke belitan medan AC eksiter. Tegangan keluaran dari generator sinkron ini

disearahkan oleh penyearah yang menggunakan dioda, yang disebut *rotating rectifier*, yang diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam rotor generator sinkron, sehingga *rotating rectifier* tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor, seperti pada Gambar 2.21 berikut:

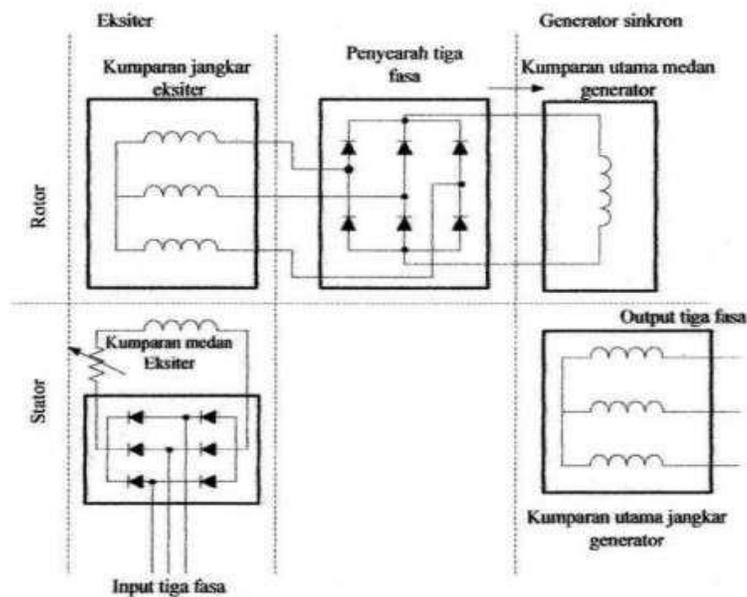


Gambar 2.21 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Baterai

(Sumber: Ennopati, 2010)

Dari gambar 2.21 diatas, untuk menghindari adanya kontak geser pada bagian rotor generator sinkron, maka penguat medan generator dirancang sedemikian sehingga arus searah yang dihasilkan dari penyearah langsung disalurkan kebagian belitan medan dari generator utama. Hal ini dimungkinkan karena dioda penyearah ditempatkan pada bagian poros yang dimiliki bersama- sama oleh rotor generator utama dan penguat medannya.

Arus medan pada generator utama dikontrol oleh arus yang mengalir pada kumparan medan penguat (eksiter). Setelah tegangan generator mencapai tegangan nominalnya maka catu daya DC (baterai) biasanya dilepas dan digantikan oleh penyearah. Penguatan yang dipakai adalah sistem *self excitation system* yaitu sistem dimana sumber untuk penguatannya diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri.



Gambar 2.22 Sistem Eksitasi Dengan Suplai Tiga Fasa

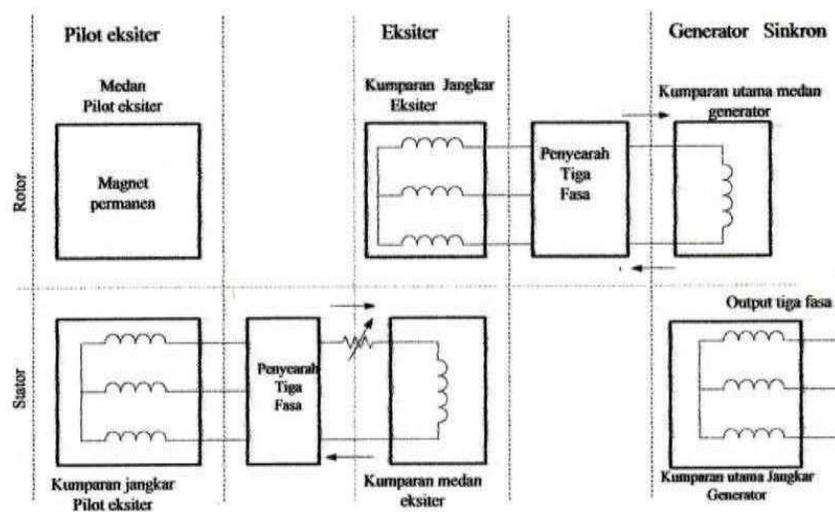
(Sumber: Ennopati, 2010)

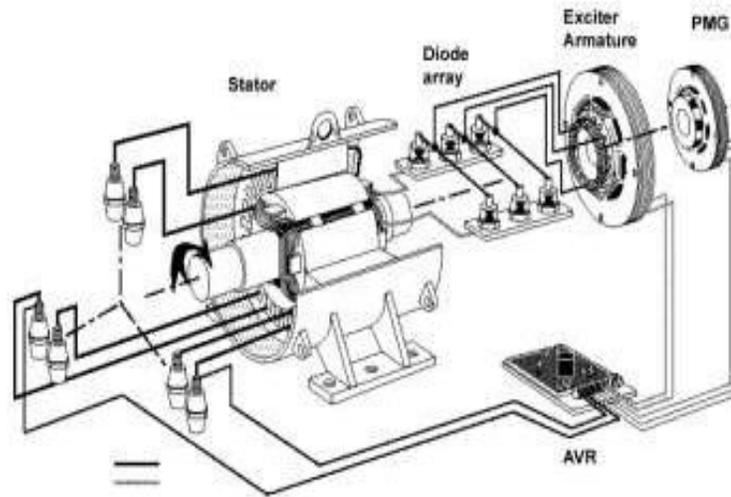
Pada gambar 2.22 diatas, untuk membangkitkan arus medan digunakan penyearah, dimana arus yang disearahkan diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri melalui transformator atau sering disebut Eksitasi Transformator, berfungsi menurunkan tegangan keluaran generator untuk disuplai pada penyearah. (Ennopati, 2010)

2. Sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG).

Suatu generator sinkron harus memiliki sebuah medan magnet yang berputar agar generator tersebut menghasilkan tegangan pada statornya. Medan magnet ini dapat dihasilkan dari belitan rotor yang disuplai dengan sumber listrik arus searah. Cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor adalah dengan menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya ini disebut dengan *Permanen Magnet Generator* (PMG).

Generator sinkron yang berkapasitas besar biasanya menggunakan sistem *brushless excitation* yang dilengkapi dengan permanen magnet generator. Hal ini dimaksudkan agar sistem eksitasi dari generator sama sekali tidak tergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin itu. Pada Gambar 2.23 dapat dilihat bentuk skematik dari sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG).





Gambar 2.23 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan *Permanent Magnet Generator*

(Sumber: Ennopati, 2010)

Dari gambar 2.23, bahwa pada bagian mesin yang berputar (rotor) terdapat *magnet permanent*, kumparan jangkar generator eksitasi, kumparan medan generator utama. Hal ini memungkinkan generator tersebut tidak menggunakan *slip ring* dan sikat dalam pengoperasiannya sehingga lebih efektif dan efisien. *Permanent Magnet Generator* akan berputar ketika rotor berputar, karena telah terhubung pada satu sumbu atau poros. PMG di sini berfungsi untuk membangkitkan tegangan atau arus AC yang selanjutnya disearahkan dan dimasukkan ke AVR untuk diatur dan dikontrol. Dikarenakan tegangan atau arus AC pada PMG sangat kecil, maka arus AC yang telah disearahkan dimasukkan ke eksiter yang bertujuan untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus keluaran dari eksiter kemudian akan

disearahkan menggunakan *rotating diode*. Dan selanjutnya arus eksitasi diinjeksikan ke rotor sehingga terdapat medan magnet pada generator yang akhirnya menimbulkan fluks listrik yang menghasilkan tegangan keluaran pada generator.

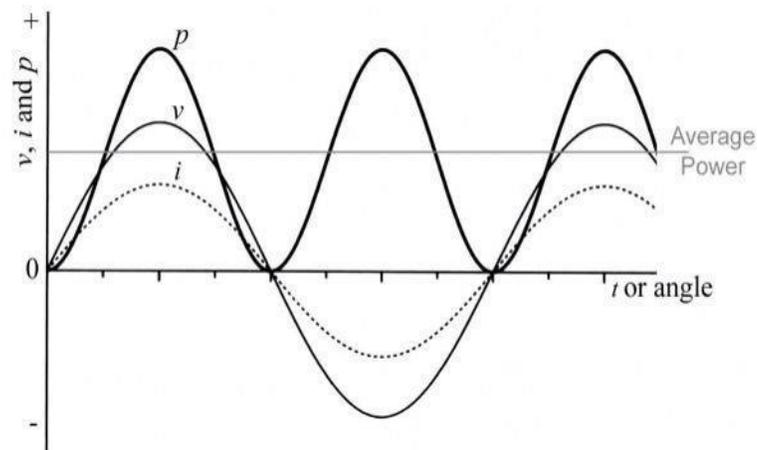
2.2.10 Beban Pada Generator Sinkron

Rangkaian listrik arus bolak-balik yang merupakan beban generator pada dasarnya terdiri dari tiga komponen, yaitu: Resistif (tahanan = R), Induktif (kumparan = L) dan Kapasitif (kapasitor = C). Di dalam kenyataannya beban generator atau sistem tenaga listrik tidak pernah hanya terdiri dari beban resistif murni saja, atau bebas induktif murni saja atau beban kapasitif murni saja, tetapi merupakan gabungan dari dua atau tiga jenis beban tersebut.

2.2.10.1 Beban Resistif (R)

Beban resistif adalah beban yang dihasilkan oleh rangkaian listrik yang memiliki tahanan (resistor) atau biasa disebut rangkaian tahanan murni. Peralatan listrik yang mempunyai tahanan murni contohnya adalah elemen pemanas dan lampu pijar. Pengaruh beban resistif pada generator akan menimbulkan reaksi jangkar pada stator sehingga menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet rotor, sehingga mengakibatkan putaran rotor turun. Karena putaran turun, maka frekuensi dan tegangan juga akan turun. Untuk memulihkannya ke kondisi normal, maka putaran harus di tambah. Akibat

timbulnya medan magnet pada stator, maka pada inti kumparan stator terjadi pemanasan dikarenakan resistor bersifat menghambat aliran elektron yang melewatinya dengan cara tegangan listrik yang mengalir diturunkan. Oleh karena itu, resistor tidak akan merubah sifat listrik arus bolak balik yang mengalirinya.



Gambar 2.24 Bentuk Gelombang Dari Beban Resistif

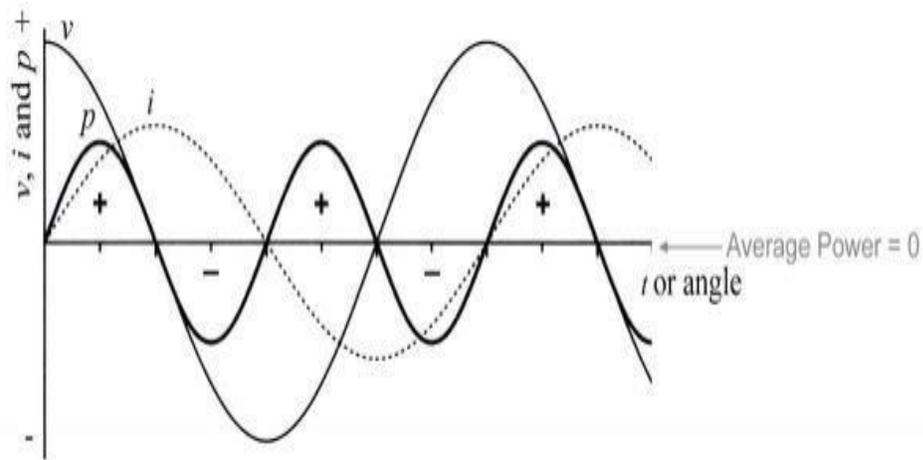
(Sumber: Kurniawan, 2015)

2.2.10.2 Beban Induktif (L)

Arus listrik yang mengalir di dalam penghantar akan menimbulkan medan magnet dengan arah garis gaya magnetnya mengelilingi penghantar. Kuat medan magnet tergantung pada besarnya arus yang mengalir. Jika arus naik maka rangkaian menyimpan energi di dalam medan magnet, namun jika arus berkurang maka rangkaian mengeluarkan energi dari medan magnet.

Beban induktif ditimbulkan dari berbagai alat-alat listrik yang memiliki belitan seperti motor induksi, transformator, dan peralatan lainnya. Sifat yang dimiliki oleh belitan adalah menghalangi terjadinya perubahan nilai pada arus

listrik. Dalam listrik arus bolak-balik, arus memiliki nilai yang naik dan turun sehingga membentuk gelombang sinusoidal. Belitan pada peralatan listrik itulah yang menyebabkan nilai arus listrik terhalang, sehingga mengakibatkan arus listrik tertinggal 90° dari tegangan listrik pada tegangan listrik AC.



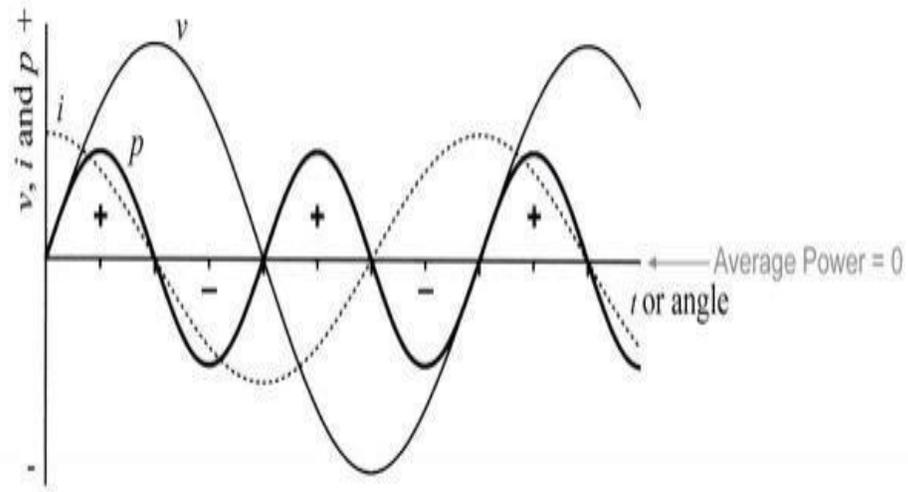
Gambar 2.25 Bentuk Gelombang Dari Beban Induktif

(Sumber: Kurniawan, 2015)

2.2.10.3 Beban Kapasitif (C)

Sifat dari beban kapasitif adalah kebalikan dari beban induktif. Apabila beban kapasitif bersifat menahan perubahan tegangan, maka beban induktif bersifat menghambat terjadinya perubahan dari nilai arus yang mengalir. Beban kapasitif timbul dalam rangkaian listrik karena terdapat bagian yang dapat menyimpan muatan listrik. Saat mendapatkan suplai tegangan AC, maka akan menyimpan dan melepaskan kembali tegangan tersebut sesuai dengan perubahan tegangan masukannya. Karena hal ini, arus akan mendahului tegangan atau

leading 90° . Beban kapasitif ini biasanya terdapat pada peralatan elektronik di rumah-rumah seperti televisi, dan lain-lain. Untuk melihat pengaruh beban kapasitif terhadap tegangan, dapat gambar di bawah ini:



Gambar 2.26 Bentuk Gelombang Dari Beban Kapasitif

(Sumber: Kurniawan, 2015)