

# Sistem Penguatan Medan Magnet Tanpa Sikat Pada Generator Sinkron

**Armansyah, Jamilah Husna, Raja Harahap, Zulfadli Pelawi**

Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UISU-Medan

[armansyah@ft.uisu.ac.id](mailto:armansyah@ft.uisu.ac.id); [miila\\_jv@yahoo.com](mailto:miila_jv@yahoo.com);

[harahapri@yahoo.com](mailto:harahapri@yahoo.com); [zulfadlipelawi@ft.uisu.ac.id](mailto:zulfadlipelawi@ft.uisu.ac.id)

## Abstrak

Saat ini kebutuhan energi listrik cukup besar, untuk memenuhi energi listrik tersebut, maka kita memerlukan sumber energi listrik yang dapat mensupply energi listrik secara kontiniu. Alternator atau generator ac adalah suatu mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator ac yang akan dibahas adalah generator yang termasuk jenis mesin serempak (mesin sinkron) dimana frekuensi listrik yang dihasilkannya sebanding dengan jumlah kutub dan putaran yang dimilikinya. Dalam hal pemilihan generator, sistem penguatan (eksitasi) pada medan magnet generator juga menentukan apakah generator itu bisa bekerja secara kontiniu tanpa sering mengalami pemeliharaan atau kerusakan. Sistem penyaluran arus penguat (eksitasi) ke medan magnet generator dapat dilakukan dengan sistem eksitasi pakai sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat. Pada penyaluran sistem eksitasi tanpa sikat yaitu arus searah bisa disalurkan langsung ke kumparan medan generator tanpa menggunakan sikat dan cincin geser. Dimana generator ac kecil dipasang pada poros yang sama dengan generator utama yang digunakan sebagai pengekstiasi, pengekstiasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama, keluaran yang telah disearahkan dari pengekstiasi ac diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin slip atau sikat-sikat yang sangat memperbaiki keandalan dan menyederhanakan pemeliharaan mesin

**Kata Kunci :** Generator Sinkron, Eksitasi, Medan Magnet, Sikat

## I. PENDAHULUAN

Sejalan dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan pembangunan industri yang semakin meningkat, maka energi listrik harus selalu tersedia dalam kapasitas yang memadai.

Untuk memenuhi kebutuhan akan energi listrik tersebut maka diperlukan suatu energi listrik yang kontiniu. Sumber energi listrik yang ada sekarang ini yaitu PLN, banyak sekali memiliki kelemahan, terutama dalam hal penyaluran dan daya yang dapat diberikan. Oleh karena itu pada suatu perusahaan ataupun industri diperlukan suatu pembangkit energi listrik sendiri yang dapat memberikan sumber energi listrik yang dibutuhkan secara kontiniu.

Untuk menghasilkan tegangan output dari alternator tersebut maka sangat diperlukan penguat (eksitasi) medan magnet pada generator sinkron. Penguat medan magnet generator sinkron ini merupakan arus searah yang dapat dihasilkan dari baterai, generator dc dan ac yang arus keluarannya telah disearahkan. Sistem penyaluran eksitasi ke medan magnet generator sinkron pada pembangkit energi listrik dilakukan dengan sistem pakai sikat dan tanpa sikat.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Generator Sinkron

Generator sinkro (alternator) atau generator ac adalah suatu mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator ac yang

akan dibahas adalah generator yang termasuk jenis mesin serempak (mesin sinkron) dimana frekuensi listrik yang dihasilkannya sebanding dengan jumlah kutub dan putaran yang dimilikinya. Listrik yang dihasilkan adalah listrik arus bolak-balik (listrik ac). Mesin penggeraknya (prime mover) dapat berasal dari tenaga air, tenaga uap, mesin diesel, dan sebagainya. Generator ac banyak kita jumpai pada pusat – pusat listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD, PLTN, PLTG dan lain-lain. Selain generator AC dengan kapasitas yang relatif besar tersebut, kita mengenal pula generator ac dengan kapasitas yang relatif kecil. Misalnya, generator yang dipakai untuk penerangan daerah-daerah terpencil. Generator tersebut sering disebut “home light” atau “generator set”.

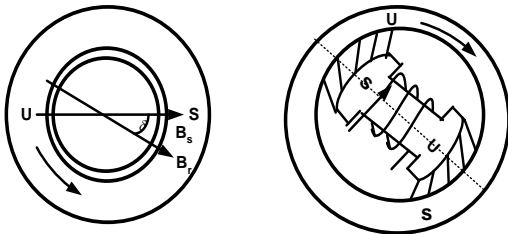
Sebuah mesin serempak atau alternator dapat dipakai sebagai generator ataupun sebagai motor, tanpa mengalami perbedaan berarti dalam disain atau konstruksi. Sebagai generator, mesin serempak dapat dioperasikan sebagai mesin tunggal, akan tetapi biasanya mesin ini akan tergabung dalam suatu sistem interkoneksi, sehingga bekerja sejajar serempak dengan alternator-alternator lainnya. Untuk dapat beroperasi secara baik dalam kondisi demikian alternator harus tetap berada dalam keadaan sinkron dengan sistem dan memikul bahagiannya yang tertentu dari beban keseluruhan. Kiranya jelas, bahwa untuk dapat mempelajari operasi mesin-mesin serempak dalam suatu jaringan, harus terlebih dahulu dikenal dan dianalisa sifat –

sifat alternator itu sendiri, baik dalam keadaan peralihan maupun dalam keadaan tunak atau ajek (*steady state*).

Sebagaimana halnya dengan mesin listrik berputar lainnya, seperti mesin arus searah, dan mesin tak serempak, pada dasarnya mesin serempak terdiri atas sebuah stator dan sebuah rotor. Konstruksi dan belitan stator adalah sama dengan dari sebuah mesin serempak. Akan tetapi rotornya mempunyai bentuk yang khas. Ia dapat memiliki bentuk silinder ataupun mempunyai kutub – kutub yang menonjol. Belitan rotor dihubungkan dengan cincin geser dan diisi dengan arus searah. Rotor berputar yang dialiri arus akan menghasilkan suatu medan putar dan yang pada gilirannya akan membangkitkan suatu gaya gerak listrik pada belitan stator yang dapat mengakibatkan mengalirnya suatu arus bila stator dibebankan. Dalam disain sebuah alternator adalah penting untuk mengatur agar pembahagian fluks dalam celah udara mendekati bentuk sinus agar diperoleh bentuk tegangan apit yang sebaik mungkin.

## 2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Mesin sinkron mempunyai kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Kumparan jangkarnya berbentuk sama dengan mesin induksi. Sedangkan kumparan medan mesin sinkron dapat berbentuk kutub sepatu (*salient*) atau kutub dengan celah udara sama rata (*rotor silinder*). Arus searah (*dc*) untuk menghasilkan fluks pada kumparan medan dialirkan ke rotor melalui cincin.



Gambar 1. Generator serempak dasar

Apabila kumparan jangkar dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa akan menimbulkan medan putar pada stator. Kutub medan rotor yang diberi penguat arus searah mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama (*sinkron*). Dilihat dari segi adanya interaksi dua medan magnet, maka kopel yang dihasilkan motor sinkron merupakan fungsi sudut kopelnya ( $\delta$ ).

$$T = B_r B_s \sin \delta$$

Dimana:

T = Kopel

$B_r$  = Kerapatan fluks akibat kumparan medan

$B_s$  = Kerapatan fluks akibat arus listrik

$\delta$  = Sudut antara kedua sumbu medan magnet  $B_r$  dan  $B_s$

Pada beban nol, sumbu kutub medan putar berimpit dengan sumbu kumparan medan ( $\delta = 0$ ). Setiap penambahan beban membuat medan motor “tertinggal” sebentar dari medan stator, berbentuk sudut kopel ( $\delta$ ); untuk kemudian berputar dengan kecepatan yang sama lagi. Beban maksimum tercapai ketika  $\delta = 90^\circ$ . Penambahan beban lebih lanjut mengakibatkan hilangnya kekuatan kopel dan motor disebut kehilangan sinkronisasi.

## 2.3 Eksitasi Pada Generator Sinkron

Sumber bagi penguat generator sinkron (*alternator*) adalah arus searah yang dihubungkan kemedan generator ac melalui dua cincin-slip dan sikat-sikat. Banyak cara yang dipakai untuk menghasilkan arus eksitasi (*penguat*) bagi generator sinkron, misalnya generator arus searah yang dipasang pada sumbu yang sama yang digerakkan oleh motor arus bolak-balik. Dalam salah satu sistem, daya diambil dari terminal generator ac, diubah kedaya dc oleh penyearah, dan kemudian dicatukan kemedan generator ac.

Sistem pembangkit lain yang masih digunakan adalah sistem tanpa sikat-sikat, yang mana generator ac kecil dipasang pada poros yang sama sebagai generator utama yang digunakan sebagai pengekstasi. Pengekstasian mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian di searahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama. Keluaran yang telah disearahkan dari pengekstasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengekstasi ac yang dibangkitkan oleh generator sinkron dapat dikendalikan dengan mengubah kekuatan medan pengekstasi ac. Sistem eksitasi tanpa sikat ini tidak mempunyai komutator, cincin slip, atau sikat-sikat yang sangat memperbaiki keandalan dan menyederhanakan pemeliharaan mesin.

## 2.4 Penyearah

Rangkaian penyearah adalah suatu rangkaian yang mengubah tegangan bolak-balik (*ac*) menjadi tegangan searah (*dc*). Terdapat beberapa jenis rangkaian penyearah, yang masing-masing jenis memberikan hasil yang berbeda-beda terhadap bentuk tegangan dc yang keluar. Perbandingan antara tegangan dc yang keluar terhadap tegangan ac hasil output-nya, dinamakan faktor ripple (*riak*). Notasi untuk faktor ripple yang diberikan disini adalah r.

$$r = \frac{\text{Komponen ac}}{\text{Komponen dc}} \times 100\%$$

Komponen dc

yang komponen dc-nya adalah harga rata-rata tegangan dc pada output-nya. Ini dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int V_0 t dt$$

Komponen ac adalah harga rms dari tegangan ac yang keluar. Untuk menghitung faktor ripple ini, digunakan suatu rumus pendekatan yaitu:

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2} - 1 \times 100\%$$

di mana  $V_{rms}$  ini merupakan harga rms total dari tegangan output-nya. Dan ini dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int V_0 t^2 dt}$$

### 2.5 Sikat-Sikat

Fungsi dari sikat-sikat adalah untuk jembatan bagi aliran arus dari lilitan jangkar dengan beban. Disamping itu sikat-sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Agar gesekan antara komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator, maka sikat harus lebih lunak daripada komutator. Biasanya dibuat dari bahan arang (coal).

### 2.6 Komutator

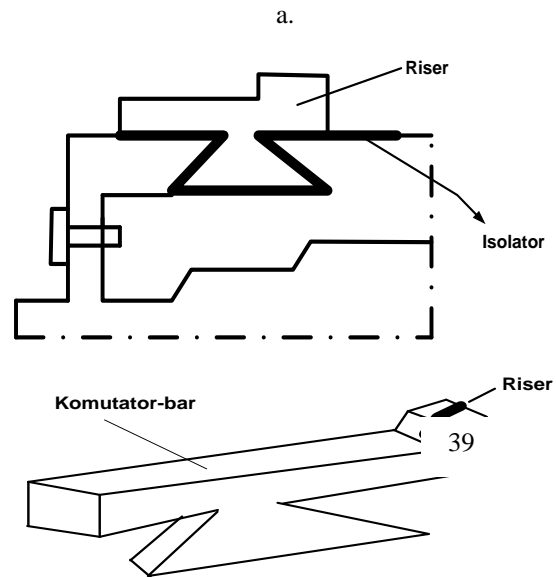
Sebagaimana diketahui komutator berfungsi sebagai penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat-sikat membuat suatu kerjasama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearahan yang lebih baik (lebih rata) maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar. Dalam hal ini setiap belahan (segmen) komutator tidak lagi merupakan bentuk separo dari cincin, tetapi sudah berbentuk lempeng-lempeng. Diantara setiap lempeng (segmen komutator) terdapat bahan isolator.

Komutator terdiri dari:

- a. Komutator bar, merupakan (tempat) terjadinya pergesekan antara komutator dengan sikat-sikat.
- b. Riser, merupakan bagian yang menjadi tempat hubungan komutator dengan ujung dari juluran lilitan jangkar.

Telah dijelaskan bahwa disamping sebagai penyearah mekanik maka komutator juga berfungsi untuk mengumpulkan GGL induksi yang terbentuk pada sisi-sisi kumparan. Oleh karena itu komutator dibuat dari bahan konduktor, dalam hal ini digunakan dari campuran tembaga.

Isolator yang digunakan yang terletak antara komutator-komutator dan komutator-komutator dengan as (poros) menentukan kelas dari generator berdasarkan kemampuan terhadap suhu yang timbul dalam mesin tersebut. Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik, maka isolator yang digunakan harus mampu terhadap panas tertentu.

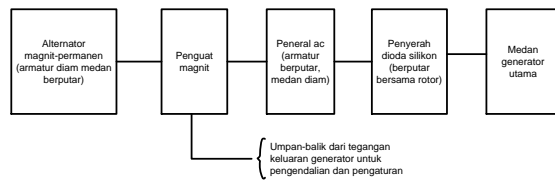


Gambar 2. a. Pemasangan komutator  
b. Segmen komutator

### 2.8 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Bersamaan dengan makin besarnya ukuran generator yang ada, masalah mengenai pemberian eksitasi pada medan dc (dapat mencapai 4000 A atau lebih pada mesin yang lebih besar) menjadi semakin sukar pula. Sumber eksitasi konvensional adalah sebuah generator dc yang keluarannya diberikan pada medan generator melalui sikat dan cincin slip. Masalah pendinginan dan pemeliharaan akan selalu berkaitan dengan cincin slip, komutator, dan sikat. Banyak sistem eksitasi modern telah berhasil memperkecil masalah tersebut dengan cara memperkecil penggunaan kontak geser dan sikat.

Suatu diagram sistem eksitasi tanpa sikat tampak pada Gambar 3-10. Pusat dari sistem ini adalah penyearah dioda silikon, yang dipasang pada poros yang sama dengan medan generator dan yang memberikan penguatan langsung pada medan. Suatu eksiter ac dengan armatur berputar memberikan daya sepanjang poros pada penyearah yang berputar. Medan diam dari eksiter ac diberikan melalui sebuah penguat magnet yang mengendalikan dan mengatur tegangan keluaran dari generator utama. Untuk membuat sistem tersebut mandiri dan bebas dari kontak geser, daya eksitasi untuk penguat diperoleh dari armatur diam suatu generator magnet permanen kecil yang juga digerakkan dari poros utama. Tegangan dan frekwensi dari exciter ac dipilih untuk mengoptimasikan keluaran dan rancangan sistem keseluruhan. Penundaan waktu sebagai tanggapan terhadap sinyal pengendali sangat singkat jika dibandingkan dengan tetapan waktu dari medan generator utama. Sistem tersebut dapat mempunyai keuntungan lain yaitu meniadakan kebutuhan akan eksitasi cadangan, pemutus arus medan generator dan reostat medan.



**Gambar 3- Diagram blok sistem eksitasi tanpa sikat**

Turbin besar mengatur kerugian tenaga generator di dalam lilitan eksitasi yang membatasi tiap faktor didalam disain, kerugian ini bisa dihilangkan oleh penggunaan suatu lilitan superkonduktif, yang mana memberikan suatu prospek berbeda pada mesin yang didesain untuk kapasitas diatas 1000 MW. Mesin sinkron konvensional beroperasi pada tiga fasa, memberikan arus bolak-balik yang menyediakan gelombang sinusoidal dengan frekwensi tetap.

### III. PEMBAHASAN

#### 3.1. Eksitasi

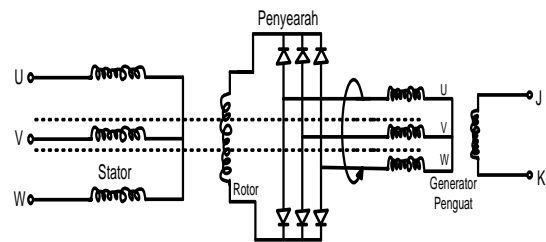
Untuk menghasilkan tegangan output pada terminal alternator (generator sinkron), diperlukan arus penguat medan ( $I_f$ ) pada medan rotor dari alternator tersebut. Untuk menghasilkan arus medan tersebut dibutuhkan suatu alat yang disebut generator penguat magnet (eksiter). Arus penguat yang diberikan kemedan alternator merupakan arus searah yang dapat dihasilkan dari generator dc atau arus bolak-balik dari generator ac yang telah disearahkan dengan rectifier. Besarnya arus medan yang diberikan boleh tetap ataupun berubah-ubah tergantung kepada keadaan tegangan terminal alternator. Ada beberapa sistem eksitasi yang dipergunakan untuk pengaturan arus medan ini, diantaranya adalah sistem eksitasi pakai sikat dan tanpa sikat. Sedangkan sumber arus medan yang digunakan diperoleh dari:

1. Generator DC
2. Generator AC eksiter dengan rectifier (penyearah arus)
2. Magnet sisa dari alternator utama yang disearahkan

#### 3.2 Rangkaian Kerja Eksitasi Tanpa Sikat

Sistem eksitasi yang dipergunakan adalah sistem penguatan sendiri (*selfexcitation*). Pada sistem ini arus searah yang diberikan kepada belitan medan generator eksiter diperoleh dari magnet sisa (remanensi) generator utama pada saat operasi awal dan dapat juga disuplay dari baterai yang dihubungkan keterminal eksiter. Dengan adanya suplay arus searah ini pada belitan generator AC eksiter maka dihasilkan fluks dengan kerapatan tertentu. Seperti terlihat pada Gambar 4. Di sebelah kiri adalah belitan stator U, V, dan W tersambung dalam hubungan bintang. Diujung kanan terdapat generator penguat tiga fasa yang dipasang pada poros rotor. Belitan generator penguat u, v, dan w dengan demikian turut

berputar, sedangkan belitan medannya J-K tidak berputar. Generator AC eksiter ini menghasilkan arus tukar tiga fasa. Arus bolak-balik ini disearahkan oleh penyearah yang juga turut berputar. Arus searah yang dihasilkan ini disalurkan kebelitan medan generator utama sehingga medan generator utama menjadi magnet yang selanjutnya menghasilkan fluksi. Dengan berputarnya belitan medan generator utama, maka fluks akan memotong konduktor pada stator yang mengakibatkan timbulnya gaya gerak listrik pada stator. Gaya gerak listrik ini merupakan gaya gerak listrik bolak-balik karena mempunyai kutub dengan polaritas yang berubah-ubah secara terus menerus melewati konduktor tersebut.



**Gambar 4. Rangkaian kerja generator tanpa sikat dengan penyearah**

Pada mesin-mesin yang besar maka kutub-kutublah yang berputar, dan belitan arus putar yang dipasang pada stator. Dengan demikian, maka yang harus melalui sikat dan cincin geser adalah daya penguatan berupa arus searah yang tidak begitu besar. Dan ini merupakan suatu titik lemah dari generator sinkron. Hal ini menjadi lebih menonjol dengan meningkatnya satuan daya nominal generator serempak sampai beberapa ratus megawatt. Di tahun-tahun belakangan ini bahkan melebihi seribu megawatt. Dengan demikian daya penguat medan turut meningkat dan turut meningkat kelemahan yang terdapat pada sistem sikat dan cincin geser.

Dengan memutar generator sinkron pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ); tegangan ( $E_o$ ) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator, maka kita akan memperoleh persamaan tegangan yang dibangkitkan:

$$E_o = cn\phi$$

Dimana:

c = Konstanta mesin

n = Putaran sinkron

$\phi$  = Fluks yang dihasilkan  $I_f$

Apabila  $I_f$  (arus medan) dinaikkan dengan harga tertentu maka  $E_a$  yang dihasilkan akan mengalami kenaikan, sehingga daya yang dihasilkan juga bisa besar. Ini dapat kita lihat dari persamaan daya :

$$P = IV$$

Atau rumus daya dapat juga diperoleh dari hukum ohm  $V=IR$ , harga  $V$  ini dapat disubsitusikan kedalam persamaan, sehingga diperoleh rumus daya:

$$P = IV = I \times IR$$

$$P = I^2 R$$

Rumus daya ketiga dapat diturunkan dari kenyataan bahwa  $I = V/R$  oleh hukum ohm. Disubsitusikan kepersamaan (4.1)

$$P = IV = \frac{V \times V}{R}$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Dimana:  $P$  = Daya (Watt)

$I$  = Arus (Amper)

$V$  = Tegangan (Volt)

$R$  = Tahanan (ohm)

Pada saat generator tanpa beban menggambarkan hubungan antara tegangan jepit sebagai fungsi dari arus kemagnetan dimana generator dalam keadaan tanpa beban dan putaran tetap.

$$E_o = f(I_m), \text{ Dimana } I = 0 \\ n = \text{konstan}$$

Dimana:

$E_o$  = Tegangan tanpa beban

$I_m$  = Arus kemagnetan

$I$  = Arus fase

$n$  = Jumlah putaran permenit (rpm)

Sedangkan saat generator berbeban merupakan penggambaran dari hubungan antara tegangan jepit ( $V$ ) sebagai fungsi arus kemagnetan ( $I_m$ ), dimana beban generator tetap, dan jumlah putaran tetap.

$$V = f(I_m), \text{ dimana } Z_L = \text{konstan} \\ n = \text{konstan}$$

Dimana :

$V$  = Tegangan berbeban

$I_m$  = Arus kemagnetan

$Z_L$  = Impedansi beban

$n$  = Jumlah putaran generator permenit (rpm)

Bila dilihat dari sistem penyaluran arus eksitasi ke medan generator utama sistem eksitasi tanpa sikat lebih sederhana karena generator eksiter yang dipergunakan memiliki jangkar dirotor yang menghasilkan arus medan untuk generator utama. Karena generator utama dan generator eksiter seporos maka penyaluran arus eksitasi dapat langsung disalurkan dengan menggunakan dioda penyearah yang ikut berputar pada poros utama. Sedangkan sistem penyaluran eksitasi pakai sikat dan cincin geser yang mana menggunakan generator dc sebagai eksiter,

Sehingga sistem penyalurannya lebih sulit, karena searah yang dihasilkan oleh penyearah komutator yang berputar dengan sikat yang diam, tidak dapat langsung disalurkan kemedan generator utama yang berputar. Penyaluran arus eksitasi ini harus menggunakan sikat-sikat yang diam dan slip ring yang berputar yang dihubungkan dengan lilitan medan yang berputar.

Bila dilihat dari segi pemeliharaan, sistem eksitasi tanpa sikat lebih sederhana, karena dioda-dioda yang digunakan untuk penyearah dipasang pada poros rotor generator eksiter sedemikian rupa hingga posisinya tetap kokoh dan juga dilindungi oleh pengikat ring dan kondenser yang berguna untuk melawan gaya sentrifugal yang diakibatkan oleh putaran rotor, juga dilindungi penurun panas(heat sink) sebagai alat pendingin. Dengan konstruksi dan perlindungan dioda yang sedemikian rupa maka penggantian dioda akibat kerusakan jarang terjadi, sehingga generator dapat bekerja secara kontinu. Sedangkan bila menggunakan komutator dan sikat-sikat, kemungkinan terjadi loncatan bunga api dapat terjadi. Hal ini akan mengakibatkan sikat dan komutator akan menjadi aus sehingga pemeliharaan dan penggantian sikat menjadi lebih sering mengakibatkan mesin lebih sering dihentikan selanjutnya akan menimbulkan kerugian produksi.

Bila dibandingkan efisiensi generator sinkron yang menggunakan generator DC sebagai eksiter dengan generator sinkron yang menggunakan generator AC sebagai eksiter lebih baik. Hal ini disebabkan karena pada generator ini tidak terjadi rugi-rugi gesekan yang disebabkan oleh penggesekan komutator dengan sikat-sikat seperti yang terjadi pada generator DC. Secara teoritis analisa dari efisiensi adalah sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\text{Daya output } (P_o)}{\text{Daya input } (P_i)} \times 100\%$$

atau :

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{[\text{Daya input } (P_i)] - [\text{Rugi total}]}{[\text{daya input } (P_i)]} \times 100\%$$

atau :

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \left[ 1 - \frac{[\text{Rugi total}]}{[\text{Daya input } (P_i)]} \right] \times 100\%$$

atau :

$$\text{Efisiensi} = \left[ 1 - \frac{[\text{Rugi total}]}{(P_o) + [\text{Rugi total}]} \right] \times 100\%$$

atau :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{daya output } (P_o)}{(P_o) + [\text{Rugi total}]} \times 100\%$$

## V. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Pada sistem eksitasi pakai sikat, eksisternya berupa mesin arus searah, dimana penyearahannya dilakukan oleh sikat dan komutator, sehingga penyaluran arus kekumparan penguat harus melalui sikat dan komutator. Sedangkan pada sistem yang lebih modern yaitu sistem penguatan tanpa sikat, generator eksiter dipasang seporos dengan generator utama sehingga arus eksitasi dapat langsung disalurkan dengan menggunakan dioda penyearah silikon yang ikut berputar pada poros utama tanpa harus menggunakan komutator dan sikat.
2. Dalam hal pemeliharaan generator sinkron tanpa sikat jarang dilakukan perbaikan dibanding dengan generator sinkron pakai sikat. Sehingga kesinambungan operasi pada generator sinkron tanpa sikat lebih terjamin.
3. Dalam hal efisiensi secara teknis, generator eksiter tanpa sikat jauh lebih efisien daripada generator eksiter pakai sikat yaitu tidak terdapatnya rugi-rugi gesekan antara komutator dan sikat.
4. Daya nominal yang dihasilkan generator sinkron tanpa sikat bisa lebih besar dibandingkan dengan generator sinkron pakai sikat, karena generator eksitasi pakai sikat ini tidak bisa dilalui arus yang besar pada sikat, karena bisa menimbulkan bunga api sehingga akan terjadi keausan pada sikat.
5. Kestabilan operasi suatu pembangkit juga ditentukan oleh sistem pengaturannya baik pengaturan daya maupun pengaturan tegangannya. Keunggulan dari sistem eksitasi tanpa sikat yaitu semua sistem pengaturan daya dan tegangan pada sistem eksitasi pakai sikat dapat juga diterapkan pada sistem eksitasi tanpa sikat. Sehingga terbuka kesempatan untuk menerapkan sistem lain yang lebih modern.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D Umans “Mesin – Mesin Listrik” Erlangga, Jakarta 1992.
- [2]. Abdul Kadir “Mesin Serempak” Djambatan. Abdul Kadir, 1996, *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia-Press.
- [3]. Alam, Syahrial, dan Taryana, 2015, *Pemodelan Dan Simulasi Automatic Voltage Regulator Untuk Generator Sinkron 3kV Berbasis Proportional Integral*. Vol.3, No.2. Juli 2015. Bandung. Institut Teknologi Nasional.
- [4]. Antono dan Khambali, 2013, *Penerapan Sinkronisasi Jaringan Listrik Tiga Fasa PLN Dengan Generator Sinkron Menggunakan*

*Trainer Power System Simulation*. Vol.2, No.3. Desember 2013. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.

- [5]. Amien, 2014, *Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya*. Vol. 7, No.1. April 2014. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [6]. Arismunandar, 1982, *Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmis*. Jakarta: A. PT. Pradnya Paramita.
- [7]. Arozaq, Wibowo, dan Penangsang, 2012, *Analisis Pembebanan Ekonomis Pada Jaringan 500 Kv Jawa Bali Menggunakan Software Power World*. Vol. 1, No.1. September 2012. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [8]. Aryadi dan Amien, 2015, *Analisis Penentuan Tegangan Terminal, Regulasi, Dan Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa Rotor Salient Pole Dengan Metode Blondel (Two Reaction Theory)*. Vol. 13, No.36. Nopember 2015. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [9]. Gunawan et al, 1993, *Mesin Dan Rangkaian Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [10]. Khatimah et al., 2014, *Analisis Pengaturan Tegangan Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan Bintang Akibat Pembebanan Tidak Seimbang*. Sinergi No.2, Tahun.12 Oktober 2014. Jakarta: Seminar Nasional.
- [11]. Laksono dan Febrianda, 2015, *Analisa Performansi Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Terhadap Perubahan Parameter*. Vol.4, No.1. Maret 2015. Padang: Universitas Andalas.
- [12]. Mitani et al. 2014, *PID-MPC Based Automatic Voltage Regulator Design In Wide-Area Interconnect Power System*. Vol.4, No.8. Agustus 2014. Jepang: Kyushu Institute Of Technology.
- [13]. Ridzki, 2013, *Analisis Perubahan ksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator*. Vol.11, No.2. Oktober 2013. Malang: Politeknik Negeri Malang.
- [14]. Suheri dan Harahap, 2016, *Analisis Dan Simulasi Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguatan Sendiri Dengan Menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM)*. Vol.14, No.40. Maret 2016. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [15]. Suyitno, 2011, *Pembangkit Energi Listrik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- [16]. Wijaya, Mochtar, 2001, *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.
- [17]. Yulianto dan Laksono, 2013, *Evaluasi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma Bass-Gura*. Vol.2, No.2. September 2013. Padang: Universitas Andalas.

- [18]. Hamzah Berahim, *Teknik Tenaga Listrik*, Andi Yogyakarta
- [19]. J. D. Edwards, *Electrical Machines*, Macmillan
- [20]. Lister, 1993, *Mesin dan Rangkaian Listrik*, Erlangga, Jakarta.
- [21]. Sumanto, *Mesin Sinkron*, Andi Yogyakarta.
- [22]. Sumanto, *Mesin Arus Searah*, Andi Yogyakarta
- [23]. Zuhul, *Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*, Gramedia Pustaka Utama.