

Analisa Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Unit 1 Pada PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Teluk Sirih

Sepannur Bandri^{1*)}, Zuriman Anthony²⁾, Rafika Andari³⁾
^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro Sarjana, Fakultas Teknik
Institut Teknologi Padang

*) Korespondensi : *sepannurb@yahoo.com*

Abstrak

Beban listrik suatu pembangkit selalu berubah-ubah sesuai dengan kebutuhan beban pada sisi konsumen, PLTU Teluk Sirih menggunakan media sikat arang sebagai medan penguat, Eksitasi berperan penting memberikan arus DC terhadap rotor generator untuk menciptakan perpotongan gaya gerak listrik, Perubahan beban pada generator yang selalu berubah-ubah dapat berdampak kerusakan pada generator dan sistem eksitasi, Hal ini terjadi pada tanggal 6 Desember 2017 arus eksitasi terbaca rendah pada 473,7 Ampere berbanding lurus pada arus jangkar 1404,2 sehingga daya yang dihasilkan akan menurun yaitu sebesar 13,2 Kw dengan frekuensi 49,9 Hz, dengan fluks magnetic 0,125 wb lebih besar atau terasa berat sehingga berakibat putaran generator tersebut rendah 2999 rpm begitu pun sebaliknya, Oleh sebab itu diperlukan sistem eksitasi untuk mengatur arus medan guna memberikan arus penguatan sehingga akan menjaga penguatan medan tetap stabil, Meningkatnya arus eksitasi menyebabkan meningkatnya gaya gerak listrik induksi (E_a) yang dihasilkan generator, Kenaikan nilai E_a ini juga berdampak pada nilai tegangan terminal (V_t) yang cenderung berfluktuatif, Korelasi ini menunjukkan bahwa arus eksitasi yang lebih tinggi menghasilkan tegangan terminal yang ditinggikan, sehingga berkontribusi pada stabilitas tegangan terminal, Untuk mengatasi masalah tegangan terminal rendah yang disebabkan oleh perubahan beban, penting untuk meningkatkan arus penguat medan, Hal ini dapat dicapai dengan meningkatkan arus eksitasi pada rotor generator sinkron, Dengan memahami karakteristik sistem eksitasi, menjadi mungkin untuk meminimalkan dan mencegah kerusakan generator akibat *overexcitation* atau *underexcitation*, memastikan pemeliharaan voltase terminal yang stabil,

Kata kunci : Arus Eksitasi, Generator Sinkron, Sistem Eksitasi

Abstract

The electricity load of a generator always changes according to the load demand on the consumer side, Teluk Sirih PLTU uses charcoal brush media as a field excitation, The excitation plays an important role in providing DC current to the generator rotor to create of electromotive forces, Changes in the load on the generator which are always changing can have an impact on damage to the generator and the excitation system, This happened on December 6, 2017, the excitation current read low at 473,7 amperes directly proportional to the armature current of 1404,2 so that the power generated would decrease by 13,2 Kw with a frequency of 49,9 Hz, with a magnetic flux of 0,125 wb more large or feels heavy so that it results in a low rotation of the generator 2999 rpm and vice versa, Therefore an excitation system is needed to regulate the field current to provide excitation current so that it will keep the field gain stable, The increase in excitation current causes an increase in the induced electromotive force (E_a) produced by the generator, The increase in the value of E_a also has an impact on the value of the terminal voltage (V_t), which tends to fluctuate, This correlation indicates that a higher excitation current results in a higher terminal voltage, thereby contributing to terminal voltage stability, To solve the problem of low terminal voltage caused by load changes, it is important to increase the field amplifier current, This can be achieved by increasing the excitation current in the synchronous generator rotor, By understanding the characteristics of the excitation system, it becomes possible to minimize and prevent damage to the generator due to overexcitation or underexcitation, ensuring the maintenance of a stable terminal voltage

Keywords : load demand, Synchronous Generator, Excitation System

I. PENDAHULUAN

Info Makalah:

Dikirim : 06-07-2023;
Revisi 1 : 06-19-2023;
Revisi 2 : mm-dd-yy;
Diterima : 06-20-2023.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-812-6804-5469
e-mail : sepammurb@yahoo.com

Alternator, juga dikenal sebagai generator, berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui induksi medan magnet. Ketika menghadapi beban listrik yang bervariasi atau beban maksimum, alternator sering dioperasikan secara paralel. Hal ini dilakukan karena jika hanya menggunakan satu alternator, kapasitas terpasangnya harus mampu menangani beban maksimum, yang pada akhirnya mengurangi efisiensi alternator tersebut. Dalam sistem paralel alternator, perubahan faktor daya generator dapat diatur dengan mengatur arus eksitasi pada setiap alternator yang diparalelkan. Arus eksitasi adalah arus listrik yang diberikan ke kutub magnetik pada generator. Dengan mengatur besarnya arus eksitasi, tegangan output generator dapat diatur sesuai kebutuhan [1][2][3].

Kemampuan generator untuk menyerap dan menyediakan daya reaktif terbatas oleh kurva kapabilitas reaktif yang dimilikinya. Ketika generator memberikan daya reaktif, itu berarti generator tersebut bersifat kapasitif. Namun, jika eksitasi generator terlalu tinggi (*over excitation*), hal ini dapat menyebabkan panas berlebihan pada lilitan rotor. Sebaliknya, jika generator menyerap daya reaktif, itu berarti generator bersifat induktif. Namun, jika eksitasi generator terlalu rendah (*under excitation*), hal ini dapat menyebabkan panas berlebihan pada lilitan stator [4]. Pada generator, terdapat berbagai gangguan yang sering terjadi, termasuk gangguan pada stator, rotor (sistem penguat), mesin penggerak, dan instalasi cadangan di luar generator [5]. Gangguan pada sistem eksitasi dapat memiliki dampak fatal pada generator, menyebabkannya mati (tidak menghasilkan listrik), dan juga mempengaruhi sistem kelistrikan bagi konsumen yang terhubung [6].

Perubahan beban menyebabkan fluktuasi tegangan keluaran generator. Perubahan tegangan keluaran bisa menimbulkan bermacam-macam efek ke generator. Untuk menghasilkan tegangan keluaran generator yang konstan diperlukan suatu pengaturan tegangan keluaran generator. Pengaturan tegangan tersebut dilakukan dengan mengatur arus eksitasinya. Arus eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator atau sebagai pembangkit medan sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasi. Pengaturan arus eksitasi ini akan mempengaruhi tegangan terminal (tegangan keluaran) generator. Arus eksitasi yang tidak dikendalikan akan menyebabkan distribusi fluks menjadi tidak merata.

Dalam konteks PLTU Teluk Sirih, sistem eksitasi menggunakan sikat dipilih sebagai salah satu metode eksitasi yang digunakan pada generator sinkron. Dengan menggunakan sistem eksitasi ini, dapat mengatur dan mengontrol tingkat eksitasi generator untuk menghindari kerusakan akibat eksitasi berlebihan atau kekurangan. Penerapan sistem eksitasi dengan menggunakan sikat pada generator sinkron di PLTU Teluk Sirih memungkinkan respons yang cepat terhadap perubahan pembebanan yang selalu berubah-ubah. Hal ini penting karena ketika pembebanan berubah, karakteristik sistem eksitasi juga harus diatur agar tetap sesuai dengan kebutuhan yang diharapkan [7].

Dengan pemahaman yang baik mengenai karakteristik sistem eksitasi dan responsnya terhadap perubahan pembebanan, dapat dihindari potensi kerusakan pada generator akibat eksitasi yang berlebihan atau kekurangan. Dengan demikian, penerapan sistem eksitasi menggunakan sikat pada generator sinkron di PLTU Teluk Sirih dapat membantu menjaga kinerja optimal generator dan mencegah kerusakan yang tidak diinginkan [8].

A. Generator Sinkron (Alternator)

Generator sinkron, juga dikenal sebagai alternator, adalah mesin listrik yang menghasilkan arus bolak-balik (*alternating current*) dan tegangan bolak-balik. Prinsip kerja generator sinkron melibatkan konversi energi mekanik menjadi energi listrik melalui induksi medan magnet,

***Analisis Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Exitasi Unit 1 Pada PT PLN
(Persero) Sektor PLTU Teluk Sirih
(Sepannur Bandri, Zuriman Anthony, Rafika Andari: Halaman 14 - 27)***

Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dan kumparan generator, Pergerakan relatif ini terjadi ketika medan magnet berubah terhadap kumparan jangkar (tempat tegangan dihasilkan pada generator) atau sebaliknya, Ketika medan magnet bergerak terhadap kumparan jangkar, terjadi perubahan fluks magnetik melalui kumparan tersebut, Hal ini menginduksi tegangan dalam kumparan, yang kemudian menghasilkan arus bolak-balik sesuai dengan prinsip elektromagnetik,

B, Prinsip Dasar Generator

suatu mesin listrik akan berfungsi bila memiliki :

- (1) Kumparan medan untuk menghasilkan medan magnet,
- (2) Kumparan jangkar, untuk mengimbaskan ggl pada konduktor- konduktor yang terletak pada alur- alur jangkar,
- (3) Celah udara yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet,

C, Listrik Dan Magnet

Medan magnet umumnya dipolarisasi menjadi dua kutub, yaitu kutub utara dan kutub selatan, Medan magnet buatan dapat dihasilkan melalui arus listrik, Ketika arus mengalir melalui penghantar, seperti kawat, medan magnet terbentuk di sekitar penghantar tersebut, Garis gaya magnet yang timbul dapat mempengaruhi benda di sekitarnya, terutama bahan yang mudah dipengaruhi oleh medan magnet, seperti besi, tembaga, dan sejenisnya, Contohnya, dalam pembangkit listrik seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), digunakan magnet buatan, Arus listrik dialirkan melalui inti rotor generator yang terbuat dari tembaga, yang merupakan konduktor listrik yang baik, Dengan mengalirkan arus listrik melalui rotor, rotor tersebut menjadi magnet [9],

Dalam aliran listrik, arus listrik mengalir melalui penghantar (konduktor) dari kutub positif ke kutub negatif, Aliran arus listrik ini akan menghasilkan medan magnet di sekitar penghantar tersebut, Arah arus listrik pada penghantar disebut sebagai "I", sementara arah medan magnet yang dihasilkan di sekitar penghantar bergerak berlawanan arah jarum jam dan disimbolkan sebagai "F", Jika penghantar berbentuk kawat dan dibentuk menjadi kumparan atau lilitan, gaya magnetik yang terjadi di sekitar kawat tersebut (F) akan sebanding dengan besar arus listrik yang mengalir dan jumlah lilitan kawat tersebut [10], Hubungan ini dapat dijelaskan menggunakan persamaan (1):

$$F = N , I \quad (1)$$

dengan F adalah gaya magnetik yang dihasilkan di sekitar kawat, N adalah jumlah lilitan kawat, dan I adalah besar arus listrik yang mengalir melalui kawat,

Kekuatan medan magnet dapat digambarkan melalui kerapatan fluks magnet yang terjadi di dalam inti magnet, Selain itu, kekuatan medan magnet juga dipengaruhi oleh intensitas medan magnet yang terbentuk dan permeabilitas bahan yang digunakan, Hubungan ini dapat dijelaskan dengan persamaan (2):

$$B = \mu_0 , H \quad (2)$$

Dari penjabaran rumus diatas terlihat bahwa intensitas medan magnet sangat bergantung pada jumlah lilitan kumparan dan besar arus listrik yang mengalir melalui kumparan tersebut, Semakin tinggi intensitas medan magnet, semakin besar kekuatan medan magnet yang dihasilkan, Selain itu, banyaknya fluks magnet yang terjadi juga berbanding lurus dengan rapat fluks yang terjadi pada inti dan luas penampang inti, Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$\emptyset = B , A \quad (3)$$

$$= \mu , H , A \quad (4)$$

$$= \mu_0 , \mu_r , N , I f \quad (5)$$

dimana :

B = rapat fluks

$\mu = \mu_0 \times \mu_r$ (permeabilitas bahan)

μ_0 = permeabilitas absolute = $4,314 \times 10^{-7}$
 μ_r = Permeabilitas relative bahan (tergantung dari jenis bahan)
 H = intensitas medan magnet (Amp,lilit/meter)
 N = jumlah lilitan
 I = kuat arus (ampere)

D, Ggl Induksi Pada Alternator

GGL induksi (E_a) pada alternator terjadi ketika rotor diputar di sekitar stator, dan kumparan jangkar alternator (yang ditempatkan di stator) terinduksi oleh medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan di rotor, Besarnya arus medan pada rotor dapat diatur dengan mengontrol arus medan (I_f) yang mengalir melalui kumparan medan [1], Besarnya GGL induksi (E_a) yang dihasilkan oleh kumparan jangkar alternator dapat disederhanakan menggunakan rumus berikut:

$$E_{a \text{ eff}} = 4,44 \cdot F \cdot N \cdot \phi \text{ (Volt/fase)} \quad (6)$$

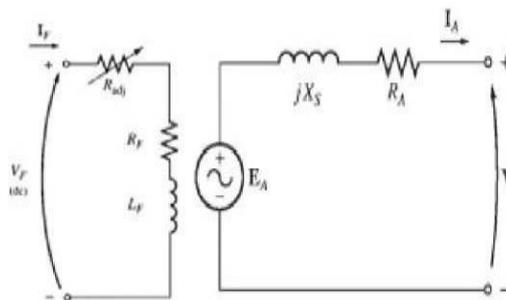
dimana :

$E_{a \text{ eff}}$ = GGL Induksi efektif
 F = Frekuensi
 N = Jumlah lilitan
 ϕ = Fluks magnetic (wb)

E, Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Stator pada motor terdiri dari belitan-belitan, di mana setiap belitan konduktor memiliki tahanan (R_A) dan induktansi (L), Ketika motor beroperasi, arus mengalir melalui konduktor dan menghasilkan fluks jangkar (ϕ_a), yang menciptakan medan putar, Fluks jangkar (ϕ_a) akan berinteraksi dengan fluks medan (ϕ_m), sehingga terjadi konversi energi dari energi listrik menjadi energi mekanik, Namun, dalam kondisi ini, ada juga fluks yang tersisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan, yang disebut sebagai reaktansi bocor (X_A),

Akibat adanya pengaruh reaksi jangkar dan reaktansi bocor, maka rangkaian ekivalen suatu motor sinkron akan menjadi seperti gambar 1, berikut:



Gambar 1 Rangkaian ekivalen generator sinkron

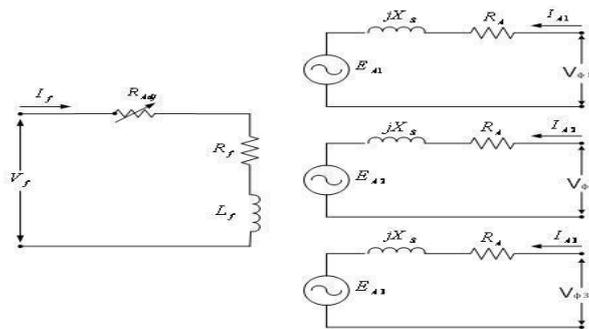
Dimana :

E = Tegangan 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_{ia} = Reaktansi bocor belitan jangkar
 I_a = Arus jangkar

Dari Gambar 1 dapat ditulis persamaan tegangan generator sinkron sebagai berikut:

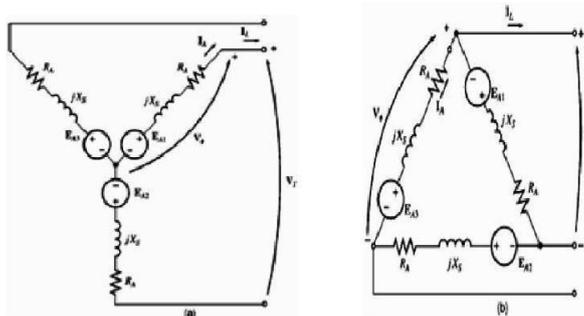
$$E_a = (R_a + jX_s) I_a + V \quad (7)$$

Tegangan induksi perfasa dengan terminal generator akan ditunjukkan pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2 Rangkaian ekivalen generator sinkron tiga fasa

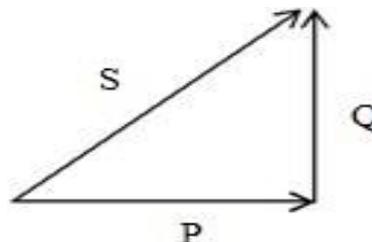
Sedangkan untuk generator tiga fasa, rangkaian ekivalen generator sinkron ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3 Rangkaian ekivalen generator sinkron (a) hubung-Y (b) hubung-D

F, Segitiga Daya

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dalam sistem listrik dapat direpresentasikan dengan menggunakan segitiga daya atau diagram vektor, Segitiga daya adalah metode grafis untuk menggambarkan hubungan antara tiga komponen daya tersebut yang ditunjukkan seperti Gambar 4, Dalam segitiga daya, panjang segitiga mewakili daya semu (S), sedangkan panjang tegak lurus terhadap panjang segitiga tersebut mewakili daya reaktif (Q), Panjang horizontal segitiga mewakili daya aktif (P),



Gambar 4 Sigitiga Daya

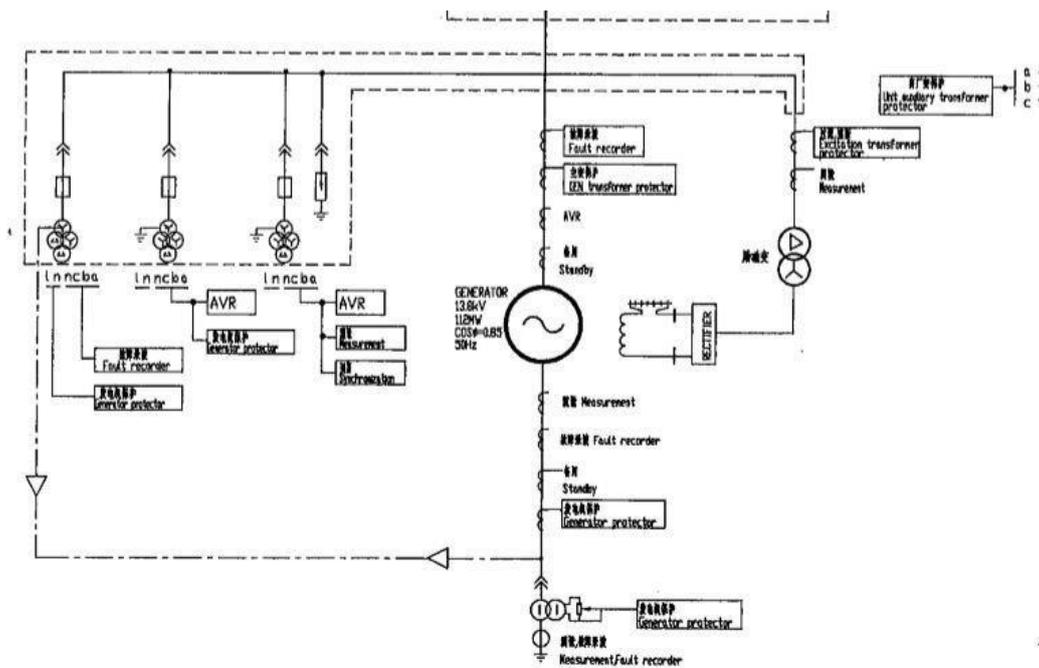
Rumusan untuk daya untuk 3 phase adalah sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} , V , I , \cos \varphi \quad (8)$$

$$Q = \sqrt{3} , V , I , \sin \varphi \quad (9)$$

$$S = V , I \quad (10)$$

G, Sistem Eksitasi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Teluk Sirih



Gambar 5 Skema Sistem Eksitasi Pada PLTU Teluk Sirih

Pada PLTU Teluk Sirih, sistem eksitasi yang digunakan adalah jenis eksitasi dengan sikat atau brush excitation, Dalam sistem eksitasi ini, slip ring dan carbon brush digunakan sebagai media untuk mengalirkan arus eksitasi ke generator, Sistem eksitasi ini menggunakan tegangan keluaran generator itu sendiri sebagai sumber eksitasi, sehingga disebut *self excitation*,

Dalam sistem eksitasi *self excitation*, tidak diperlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi untuk generator sinkron, Sebagai gantinya, tegangan output generator digunakan sebagai sumber eksitasi, Tegangan tersebut kemudian disearahkan atau diarahkan menggunakan penyearah thyristor, Proses penyearahan ini memungkinkan tegangan *output* generator untuk digunakan sebagai sumber eksitasi, Namun, dalam kondisi ketika generator dalam keadaan mati dan akan dinyalakan, injeksi awal arus eksitasi dilakukan menggunakan baterai, Baterai digunakan untuk memberikan arus eksitasi awal sebelum tegangan output generator terbentuk, Setelah generator mulai beroperasi dan menghasilkan tegangan output, tegangan tersebut digunakan sebagai sumber eksitasi, dan baterai tidak lagi diperlukan untuk eksitasi generator, Sistem eksitasi *self excitation* ini memberikan keuntungan dalam hal keandalan dan efisiensi, karena tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi dan dapat mengandalkan tegangan output generator itu sendiri, Namun, injeksi awal arus eksitasi menggunakan baterai diperlukan dalam kondisi awal saat generator belum beroperasi [11],

II. METODE

A. Peralatan Sistem Eksitasi PLTU Teluk Sirih[12]

Peralatan utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Teluk Sirih yang digunakan dalam sistem eksitasi dan spesifikasinya adalah sebagai berikut:

1. Sistem Eksitasi

PLTU Teluk Sirih menggunakan sistem eksitasi statis, Pada sistem ini sumber arus eksitasi diambil dari produksi generator itu sendiri, Sedangkan untuk menyalurkan arus eksitasi ke generator, slip ring dan sikat arang (carbon brush) digunakan sebagai media konduktor yang menghubungkan sistem eksitasi dengan kumparan medan di rotor generator, Slip ring adalah cincin logam yang terpasang pada rotor, sementara sikat arang berfungsi sebagai penghubung konduktor yang bersentuhan dengan slip ring, memungkinkan arus eksitasi mengalir melalui system [13] , Spesifikasi sistem eksitasi yang digunakan pada PLTU Teluk Sirih ditunjukkan pada Tabel 1,

Tabel 1 Spesifikasi Sistem Eksitasi PLTU Teluk Sirih

Rated Capacity	132 MVA
Rated Power	112 MW
Rated Power Faktor	0,85 Lag
Rated Stator Voltage	13800 V
Rated Stator Current	5512 A
Rated Excitasi Voltage	339 V
Rated Excitasi Current	789,5 A
No load Excitation Current	339,5 A
DC Operating Power Supply	220 V

2. Generator

Generator memiliki fungsi untuk menghasilkan daya listrik yang ditransmisikan ke jaringan interkoneksi Sumatera Bagian Selatan, serta digunakan untuk mencatu daya sistem eksitasi generator itu sendiri, Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, sistem eksitasi yang digunakan pada PLTU Teluk Sirih adalah tipe *self excitation*, Dalam sistem ini, generator menggunakan keluarannya sendiri sebagai sumber tegangan untuk eksitasi, Ini berarti tegangan *output* generator digunakan untuk memberikan eksitasi pada kumparan medan di rotor generator [14][15], Spesifikasi dari generator di PLTU Teluk Sirih terdapat pada Tabel 2,

Tabel 2 Spesifikasi Generator PLTU Teluk Sirih

Model	QFW-112-2, equipped with a coaxial AC exciter
Rated Power	112 MW
Rated Voltage	13,8 kV
Rated Current	5512 A
Number set	1#
Rated Power	112 MW
Rated Field Current	1451 A
Rated Power Faktor	0,85 (lagging phase)
Rated Frequency	50 Hz
Rated Speed	3000 rpm
Phase	3
Jumlah Alur Stator	66 Alur
Diameter Rotor scala (1:10)	1075 mm
Conduktor Stator	22
Synchronous Reactance	1,63
Resistansi	Stator Phase U =0,0011617 Ω Stator Phase V =0,0011577 Ω Stator Phase W =0,0011758 Ω
Rated Field Current	1451 A

B. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT, PLN (Persero) Pembangkitan SUMBAGSEL Sektor Pengendalian Pembangkitan Teluk Sirih yang beralamatkan di Jalan Lintas Sumatera Padang – Painan Km,25 Teluk Kabung Tengah, Bungus Teluk Kabung, Kota Padang, Sumatera Barat, Kodepos 25241.

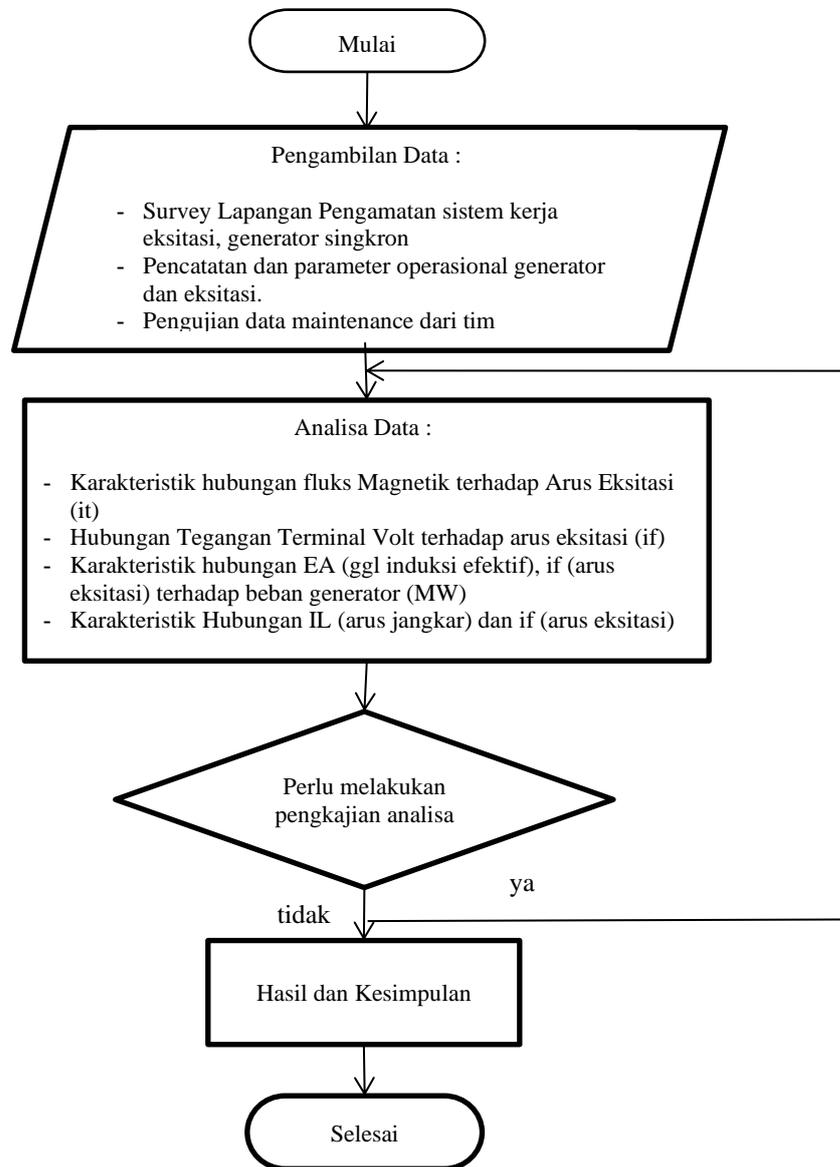
C. Pengambilan Data

Penelitian dan Pengambilan data penelitian ini dilakukan pada 1 s/d 12 Desember 2017, Untuk mendapatkan data yang berhubungan dengan analisa arus pembebanan terhadap arus eksitasi

generator, penulis mengumpulkan data–data melalui logsheet operasional harian dan maintenance Generator dan Eksitasi system serta data lapangan Unit 1 PLTU Teluk Sirih,

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram penelitian ditunjukkan seperti pada Gambar 6,



Gambar 6 Diagram alir penelitian

E. Langkah-langkah diagram alir penelitian:

1. Melakukan pengukuran parameter operasional harian generator
2. Menentukan nilai fluks magnet sebagai penguat medan
3. Menentukan nilai arus beban sebagai fungsi dari arus eksitasi
4. Menghitung besarnya tegangan terminal generator (V_t) sebagai fungsi dari arus eksitasi
5. Menghitung besarnya gaya gerak listrik (E_a) yang dibangkitkan generator
6. Menghitung besarnya arus jangkar sebagai fungsi dari arus eksitasi

Analisis Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Unit 1 Pada PT PLN (Persero) Sektor PLTU Teluk Sirih (Sepannur Bandri, Zuriman Anthony, Rafika Andari: Halaman 14 - 27)

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisis Karakteristik Sistem Eksitasi Generator Sinkron di PLTU Teluk Sirih

Dalam analisis mengenai pengaruh pembebanan terhadap arus eksitasi pada PLTU Teluk Sirih, digunakan data operasional harian PLTU Teluk Sirih yang mencakup tegangan generator, daya beban, arus jangkar, dan arus eksitasi, Data yang dianalisis dalam pembahasan ini diambil dan diamati selama periode 12 hari, hal ini karena data pengamatan valid dilakukan pada saat penelitian yaitu mulai dari tanggal 1 Desember hingga 12 Desember 2017, Data rata-rata operasional harian PLTU Teluk Sirih ditunjukkan pada Tabel 3,

Tabel 3 Data Operasional Harian Unit 1

Tgl/ Des jam 15,0 2	Gen Active Power (MW)	Gen Stator Current IR (A)	Gen Stator Current IS (A)	Gen Stator Current IT (A)	Gen Stator Voltage RS (Volt)	Gen Stator Voltage ST (Volt)	Gen Stator Voltage TR (Volt)	Exitation		Spee d Turb in (Rp m)	Frek uensi (Hz)	Gen Power Facto r
								Curr ent (A)	Volta ge (V)			
1	92,2	3970,9	3949,8	4059,9	13750	13910	13730	585,6	219,3	3014, 1	50,3	0,94
2	84,0	3693,6	3696,6	3791,6	13760	13880	13750	574,5	215,3	3014, 6	50,3	0,93
3	94,6	4089,6	4075,6	4179,2	13780	13840	13750	591,1	223,2	3016, 6	50,3	0,95
4	81,9	3488,3	3483,1	3594,9	13790	13850	13770	536,5	200,2	3018, 5	50,3	0,94
5	37,6	1949,6	1884,7	1983,6	13820	13860	13800	484,4	177,9	2989, 8	49,9	0,80
6	13,2	1404,2	1339,7	1336,8	13800	13870	13800	473,7	172,5	2999, 8	49,9	0,47
7	11,3	1834,2	1740,0	1723,4	13650	13750	13670	509,2	188,2	3018, 3	50,3	0,45
8	18,4	1913,1	1819,7	1817,1	13620	13810	13640	513,8	189,9	3018, 5	50,4	0,48
9	56,6	2405,7	2365,4	2475,4	13750	13820	13740	459,8	168,7	3014, 9	50,2	0,95
10	60,9	2751,6	2687,9	2806,4	13620	14020	13640	513,1	190,5	3011, 6	50,2	0,91
11	62,7	2818,3	2766,2	2867,3	13800	13870	13800	515,0	190,8	2990, 0	50,0	0,96
12	70,0	3144,1	3104,6	3198,8	13790	13860	13780	543,3	202,1	3006, 8	50,1	0,91

Dari Tabel 3, dapat dilihat bahwa besarnya arus yang melewati arus jangkar atau arus tiap per phase berbanding lurus dengan kenaikan daya yang dihasilkan, Terkadang perhitungan matematis akan melebihi atau kekurangan akibat faktor- faktor rugi-rugi daya,

Dibawah ini akan membuktikan bahwa hubungan antara arus jangkar terhadap ggl induksi yang di bangkitkan yang bertujuan mengetahui karakteristik dari sistem eksitasi pada generator itu sendiri,

Mengacu pada Tabel 2 spesifikasi Generator PLTU Teluk Sirih di peroleh diameter rotor, yakni:

$$1075 \text{ mm (diameter rotor)} \times 10 \text{ (scala drawing)} = 10750 \text{ mm} = 1,07 \text{ m}$$

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1,07 \text{ m}}{2} = 0,53 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang, } L = \pi, r^2$$

$$= 3,14 \cdot 0,532$$

$$= 0,87 \text{ m}^2$$

Permeabilitas hampa udara, $\mu_0 = 4,314 \times 10^{-7}$

Permeabilitas bahan, $\mu_r = 1$ (konstan) mengacu pada Tabel 2, Spesifikasi Generator PLTU Teluk Sirih di peroleh jumlah alur pertiga fasa pada stator generator, yakni = 66 alur

$$\text{Banyak alur perfasa} = \frac{66}{3} = 22$$

$$\begin{aligned} \text{Banyak lilitan perfase adalah} &= \frac{\text{banyak alur perfasa} \times \text{konduktor}}{2} \\ &= \frac{22 \times 22}{2} = 242 \text{ lilitan perfasa} \end{aligned}$$

Mencari Daya, Gaya gerak listrik (E_a), fluks magnetik (Φ) dan E_a efektif pada tanggal 1 Desember 2017 mengacu pada Tabel 4, Data Operasional Harian unit 1 diperoleh hasil :

Diketahui :

$$I_{\text{phase}} = I_{\text{Line}} = 3970,9 \text{ A}$$

$$V_{\text{phase}} = 13750 \text{ Volt}$$

$$R_a = 0,0011617 \Omega \quad X_s = 1,63$$

$$V_{\text{Line}} = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{13750}{1,73} = 7947,9 \text{ Volt}$$

Mengacu pada persamaan 7, tentang tegangan generator sinkron, Gaya gerak listrik yang terjadi diperoleh hasil $E_a = I_{\text{Line}} \cdot (R_a + jX_s) + V_{\text{Lin}}$

$$= 3970,9 \angle 0^\circ, (0,0011617 + j1,63) + 7947,9$$

$$= 3970,9 \angle 0^\circ, 1,63 \angle 89,95^\circ + 7947,9$$

$$= 6472,56 \angle 89,95^\circ + 7947,9$$

$$= 5,64 + j6472,55 + 7947,9$$

$$= 7953,54 + j6472,55$$

$$= 10254,4 \angle 39,1^\circ \text{ volt}$$

Mengacu pada persamaan 8, tentang segitiga daya, dapat diperoleh hasil :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$= \sqrt{3} \cdot 13750 \cdot 3970,9 \cdot 0,94$$

$$= 88895572,1 \text{ watt}$$

$$= 88,8 \text{ MW}$$

Dari perhitungan di atas bahwa daya yang dihasilkan mendapatkan jumlah 88895572,1 watt terbukti benar mendekati dengan nilai beban yang di data pada tanggal 1 Desember yakni 92200000 watt,

Fluks magnetic diperoleh hasil :

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I_f \cdot A$$

$$= 4,314 \times 10^{-7} \cdot 1,242 \cdot 585,6 \cdot 0,87$$

$$= 1548550,3 \times 10^{-7} \text{ wb}$$

$$= 0,154 \text{ wb}$$

Mengacu pada persamaan 6, Tentang GGL induksi efektif pada alternator diperoleh hasil:

$$E_a \text{ eff} = 4,44 \cdot F \cdot N \cdot \Phi$$

$$= 4,44 \cdot 50,3 \cdot 242 \cdot 0,154$$

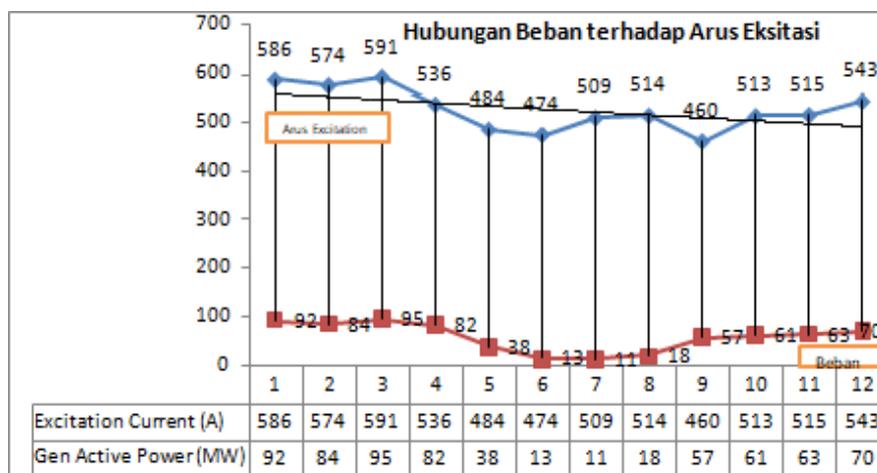
$$= 8323,1 \text{ volt}$$

**Analisis Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Unit 1 Pada PT PLN
(Persero) Sektor PLTU Teluk Sirih
(Sepannur Bandri, Zuriman Anthony, Rafika Andari: Halaman 14 - 27)**

Tabel 4 Hasil Perhitungan Gaya Gerak Listrik dan Fluk Magnetik

Tgl/ Des jam 15,02	Gen Active Power (MW)	Gen Stator Current IR (A)	Gen Stator Current IS (A)	Gen Stator Current IT (A)	Gen Stator Voltage RS (Volt)	Gen Stator Voltage ST (Volt)	Gen Stator Voltage TR (Volt)	Exitation		Speed Turbin (Rpm)	Frekuensi (Hz)	Gen Power Factor
								Current (A)	Voltage (V)			
1	92,2	3970,9	3949,8	4059,9	13750	13910	13730	585,6	219,3	3014,1	50,3	0,94
2	84,0	3693,6	3696,6	3791,6	13760	13880	13750	574,5	215,3	3014,6	50,3	0,93
3	94,6	4089,6	4075,6	4179,2	13780	13840	13750	591,1	223,2	3016,6	50,3	0,95
4	81,9	3488,3	3483,1	3594,9	13790	13850	13770	536,5	200,2	3018,5	50,3	0,94
5	37,6	1949,6	1884,7	1983,6	13820	13860	13800	484,4	177,9	2989,8	49,9	0,80
6	13,2	1404,2	1339,7	1336,8	13800	13870	13800	473,7	172,5	2999,8	49,9	0,47
7	11,3	1834,2	1740,0	1723,4	13650	13750	13670	509,2	188,2	3018,3	50,3	0,45
8	18,4	1913,1	1819,7	1817,1	13620	13810	13640	513,8	189,9	3018,5	50,4	0,48
9	56,6	2405,7	2365,4	2475,4	13750	13820	13740	459,8	168,7	3014,9	50,2	0,95
10	60,9	2751,6	2687,9	2806,4	13620	14020	13640	513,1	190,5	3011,6	50,2	0,91
11	62,7	2818,3	2766,2	2867,3	13800	13870	13800	515,0	190,8	2990,0	50,0	0,96
12	70,0	3144,1	3104,6	3198,8	13790	13860	13780	543,3	202,1	3006,8	50,1	0,91

Dari data perhitungan diatas dapat diambil suatu tabel guna mempermudah proses analisis, Data diperoleh dengan menggunakan rumus pada rangkaian listrik yang mengacu pada bagian 1, Arus eksitasi pada generator sinkron memang sebanding dengan arus jangkar, Semakin besar arus eksitasi yang diinjeksikan ke kumparan rotor generator, semakin besar pula arus jangkar yang dihasilkan oleh generator tersebut, Dengan demikian, nilai arus eksitasi akan berubah-ubah sejalan dengan nilai arus eksitasi yang diinjeksikan ke kumparan rotor generator, Hal ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara arus eksitasi dan arus jangkar pada generator sinkron, Hubungan antara arus eksitasi dan arus jangkar terhadap pembebanan pada generator sinkron akan dibuktikan pada grafik karakteristik generator seperti pada Gambar 7



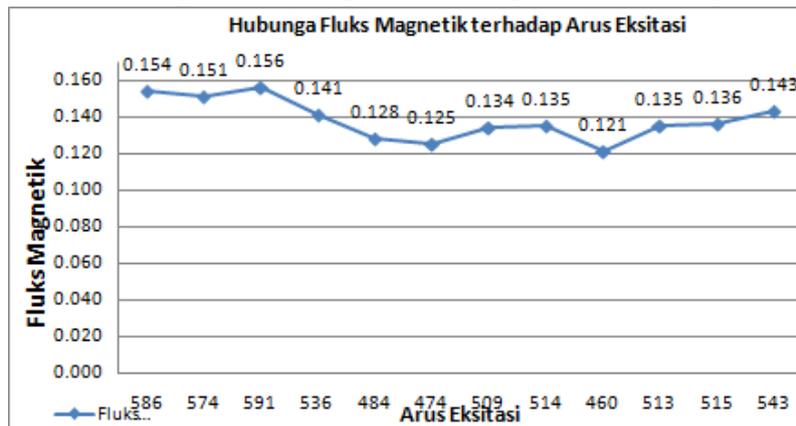
Gambar 7 Grafik hubungan beban terhadap arus eksitasi

Hubungan antara beban terhadap arus eksitasi ialah berbanding lurus, pada data dia atas terlihat semakin besar beban generator yang di hasilkan makan semakin besar pula medan penguat eksitasi yang di injeksikan, Pada beban puncak atau beban tertinggi pada table 95 MW arus penguat medan yang di aliri sebesar 591 Ampere, Begitu pula sebaliknya pada saat

beban rendah terdata pada tanggal 6 Desember 2017 beban tertera 13 MW dengan arus yang rendah 474 Ampere, sebagai medan penguat eksitasi, Adapun faktor-faktor yang dapat merubahnya sistem eksitasi pada generator antara lain meliputi hal fluks magnetic, gaya gerak listrik dan ggl efektif,

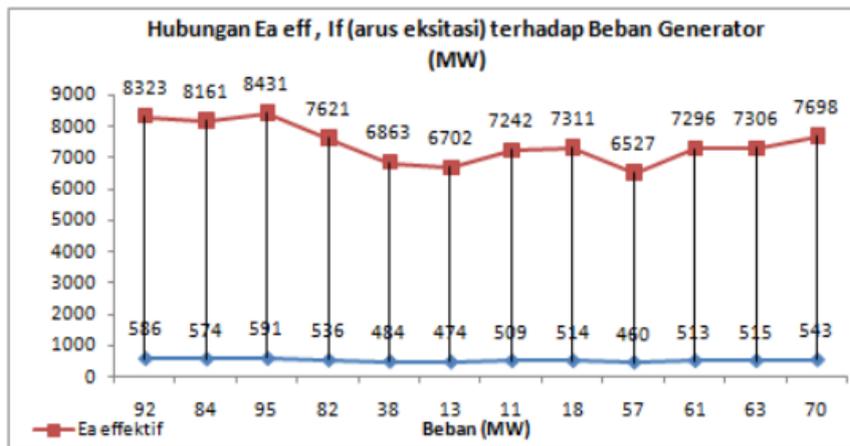
Perubahan beban yang selalu berubah-ubah akan berdampak pada suatu peralatan kelistrikan itu sendiri, terutama pada generator, Dengan kita mengetahui karakteristik pada sistem eksitasi pada generator sebagai medan penguat kita dapat meminimalisir terhadap gangguan-gangguan yang terjadi, Berikut hasil analisa yang di peroleh berdasarkan data-data yang telah di validasi pada Generator Unit 1 PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Teluk Sirih,

B. Karakteristik Hubungan Fluks Magnetik terhadap Arus Eksitasi (If)



Gambar 8 Grafik hubungan fluks magnetik terhadap arus eksitasi

Dari grafik hubungan fluks magnetik terhadap arus eksitasi pada Gambar 8, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi beban pada generator, semakin tinggi pula injeksi arus yang diperlukan pada eksitasi, Hubungan ini berkaitan dengan prinsip bahwa medan penguat (arus eksitasi) berbanding terbalik dengan fluks magnetik yang dihasilkan, Dengan beban yang lebih tinggi, dibutuhkan arus eksitasi yang lebih besar untuk menjaga kinerja generator, Pada data tanggal 3 Desember 2017, terlihat bahwa saat beban sebesar 95 MW, kuat arus eksitasi adalah 591 ampere yang setara dengan fluks sekitar 0,156 wb, Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, arus eksitasi yang diperlukan semakin tinggi, dan sebagai akibatnya fluks magnetik yang dibangkitkan semakin kecil atau berbanding terbalik dengan beban yang diberikan, Akibat dari hal tersebut berdampak pada putaran pada turbin dan generator semakin cepat pada 3016,6 Rpm, Menambah beban generator maka menambah juga uap steam untuk berekspansi pada turbin, disinilah bukti kenapa putaran generator akan semakin cepat pada bisanya, Akibatnya medan magnet atau fluks magnetik akan semakin kecil/ringan terhadap putaran generator, Berbeda pula pada data tanggal 6 Desember 2017 terlihat pada beban rendah yakni 13,2 MW total fluks atau kuat medan magnet yang dibangkitkan akan jauh lebih besar/tinggi 0,125 wb, Berbanding terbalik terhadap arus eksitasi yang diberikan akan semakin kecil 473,7 Ampere, Karakteristik Hubungan E_a eff (ggl induksi efektif), I_f (arus eksitasi) terhadap beban generator (MW)



Gambar 9 Grafik hubungan Ea eff (ggl induksi efektif), If (arus eksitasi) terhadap beban generator (MW)

Hubungan Ea efektif terhadap arus eksitasi ialah seperti Gambar 9, dimana gaya gerak listrik per satu periode (gelombang) berbanding lurus terhadap arus eksitasi, Dimana pada tanggal 6 Desember ggl efektif menunjukkan nilai 6702 Volt sebanding atau sama besar terhadap arus eksitasi yang bernilai 473,7 Ampere, Pada saat beban tinggi perubahan arus dan ggl efektif pun akan mengikuti, Pada beban 95 MW gaya gerak listrik efektif akan semakin besar 8431 Volt akan sama besar dengan arus yang dibangkitkan sebesar 4090 Ampere serta memerlukan arus penguat eksitasi yang tinggi 591 ampere,

IV. KESIMPULAN

Ketika beban jaringan naik, maka tegangan jaringan akan turun, sehingga menyebabkan tegangan terminal generator juga akan turun, Perubahan beban berdampak pada fluks magnetic yang dihasilkan, semakin besar beban maka semakin kecil kuat medan magnet yang terbentuk, terlihat pada data tanggal 3 desember 2017 pada saat beban diberikan 95 MW, kuat arus eksitasi berjumlah 591 ampere $\approx 0,156$ wb fluks akan semakin kecil atau berbanding terbalik, Akibat dari hal tersebut berdampak pada putaran pada turbin dan generator semakin cepat pada 3016,6 Rpm, Berbeda pula pada data tanggal 6 Desember 2017 terlihat pada beban rendah yakni 13,2 MW total fluks yang dibangkitkan akan jauh lebih besar/tinggi 0,125 Berbanding terbalik terhadap arus eksitasi yang diberikan akan semakin kecil 473,7 Ampere, Daya yang dibangkitkan generator (beban) akan sebanding dengan gaya gerak listrik efektif yang dihasilkan pada kumparan akan sebanding juga dengan tegangan terminal generator akan sebanding juga dengan arus eksitasi yang pada rotor generator,

Dengan memahami hubungan antara beban generator, arus eksitasi, dan fluks magnetik, operator atau pengendali sistem dapat mengatur tingkat arus eksitasi yang tepat sesuai dengan kebutuhan beban yang berubah-ubah, Dengan memantau dan mengontrol arus eksitasi, mereka dapat mencegah generator mengalami *over excitation* atau *under excitation* yang dapat menyebabkan kerusakan, Selain itu, pemeliharaan yang teratur dan pemantauan kondisi generator secara rutin juga penting untuk mengidentifikasi potensi masalah dan melakukan tindakan pencegahan yang diperlukan, Dengan demikian, kerusakan pada generator akibat *over excitation* dan *under excitation* dapat diminimalisir, dan kinerja serta umur operasional generator dapat ditingkatkan,

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M, Farhan, “Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Generator Unit 2 Pltmh Curug,” *J, Simetrik*, vol, 11, no, 1, p, 398, 2021, doi: 10,31959/js,v11i1,653,
- [2] S, Armansyah, “Pengaruh Penguatan Medan Generator Sinkron Terhadap Tegangan Terminal,” *J, Tek, Elektro UISU*, vol, 1, no, 3, pp, 48–55, 2016,
- [3] D, R, Pattiapon, J, J, Rikumahu, and M, Jamlaay, “Penggunaan Motor Sinkron Tiga Fasa Tipe Salient Pole Sebagai Generator Sinkron,” *J, Simetrik*, vol, 9, no, 2, p, 197, 2019, doi: 10,31959/js,v9i2,386,
- [4] Hamdan Rizal Maulana, Agus Suandi, and Helmizar, “Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Pada Generator,” *Rekayasa Mek,*, vol, 6, no, 2, pp, 63–70, 2022, doi: 10,33369/rekayasamekanika,v6i2,25458,
- [5] R, Tandioaga, Marhatang, T, T, R, Payung, and H, Khatimah, “Analisis Pengaturan Tegangan Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan Bintang Akibat Pembebanan Tidak Seimbang,” *Sinergi*, no, 2, pp, 170–180, 2014,
- [6] H, Herudin and W, D, Prasetyo, “Rancang Bangun Generator Sinkron 1 Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah 750 RPM,” *Setrum Sist, Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol, 5, no, 1, p, 11, 2016, doi: 10,36055/setrum,v5i1,886,
- [7] F, Sari and A, Darwanto, “Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Pararel Terhadap Daya Reaktif,” *J, Teknol,*, vol, 14, no, 1, pp, 10–19, 2021, doi: 10,34151/jurtek,v14i1,3276,
- [8] Yusniati and Matondang NNS, “Analisis sistem pembebanan pada generator di PT, PLN (persero) pembangkit listrik tenaga diesel titi kuning,” *Semnastek Uisu* , pp, 59–64, 2020,
- [9] P, Dosen *et al,*, “Karakteristik Generator Sinkron Yang,” vol, 2, pp, 115–120, 2017,
- [10] R, Ricky and J, Windarta, “Analisis Komparasi Perhitungan Teori dan Aktual Terhadap Daya Aktif dan Daya Reaktif Steam Turbine Generator 2,0 Pada PT Indonesia Power Semarang,” *J, Energi Baru dan Terbarukan*, vol, 1, no, 1, pp, 8–19, 2020, doi: 10,14710/jebt,2020,8133,
- [11] A, Annisa, W, Winarso, and W, Dwiono, “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron,” *J, Ris, Rekayasa Elektro*, vol, 1, no, 1, pp, 37–53, 2019, doi: 10,30595/jrre,v1i1,4928,
- [12] S, Bandri, “Pengaruh Analisa Beban Perubahan Karakteristik Terhadap Sinkron Generator,” *Inst, Teknol, Padang*, vol, 2, no, 1, pp, 42–48, 2013,
- [13] M, Harahap, “Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator,” *Univ, Prima Indones,*, vol, 3, no, 2, pp, 71–76, 2021,
- [14] S, A, Putra and D, B, Santoso, “Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator Sinkron Unit 3 Plta Ubrug,” *J, DISPROTEK*, vol, 13, no, 2, pp, 113–122, 2022, doi: 10,34001/jdpt,v13i2,3160,
- [15] U, Situmeang, “Analisis Pengaruh Perubahan Besaran,” vol, 1, no, 1, pp, 1–8, 2016,