

PENGARUH ARUS EKSITASI TERHADAP TEGANGAN KELUARAN DAN DAYA REAKTIF GENERATOR SINKRON PADA PLTU PULANG PISAU

Nur Muhamad Fikri¹⁾, Paliling²⁾

email: nrmfikri613@gmail.com, paliling1563@yahoo.com

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin

Ringkasan

Kestabilan tegangan merupakan faktor krusial dalam menjamin kontinuitas dan kualitas suplai energi listrik, khususnya pada sistem pembangkitan tenaga uap yang melayani beban induktif dalam skala besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh arus eksitasi terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif pada generator sinkron pada PLTU Pulang Pisau, Kalimantan Tengah. Metode yang digunakan adalah kuantitatif-deskriptif berdasarkan data sekunder dari log sheet harian selama tujuh hari, yaitu tanggal 1–7 Oktober 2024. Periode pengamatan yang mencakup hari kerja dan akhir pekan dinilai cukup merepresentasikan variasi kondisi pembebanan aktual, sehingga hasil analisis mampu menggambarkan hubungan operasional antara arus eksitasi, tegangan terminal, dan daya reaktif pada generator sinkron. Analisis dilakukan dengan mengkaji hubungan antara perubahan arus eksitasi, tegangan terminal, dan daya reaktif berdasarkan pola operasi aktual generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus eksitasi memiliki pengaruh positif terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif generator. Peningkatan arus eksitasi mampu mempertahankan tegangan terminal tetap berada pada kisaran nominal meskipun terjadi fluktuasi beban induktif, serta meningkatkan kemampuan generator dalam menyuplai daya reaktif ke sistem.

Kata Kunci : Arus Eksitasi, Tegangan Keluaran, Daya Reaktif, Generator Sinkron

1. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem dalam menyuplai beban secara berkelanjutan sangat dipengaruhi oleh kestabilan tegangan, yang perlu diperhatikan sejak tahap perencanaan hingga pengoperasian guna mencegah ketidakstabilan yang dapat berujung pada pemadaman sistem (*blackout*) (Azmi dkk., 2021). Sebagian besar konsumen listrik seperti industri, menggunakan energi listrik untuk kebutuhan beban-beban induktif yang mengakibatkan peningkatan kebutuhan daya reaktif dan berpotensi menurunkan tegangan sistem hingga berada di bawah standar operasional yang diizinkan (Eteruddin dkk., 2020). Kekurangan distribusi daya reaktif dalam sistem kelistrikan dapat menyebabkan penurunan tegangan keluaran generator karena tidak terpenuhinya kebutuhan daya reaktif yang diperlukan untuk menjaga tegangan dan stabilitas sistem tenaga (Widyasmara dkk., 2024).

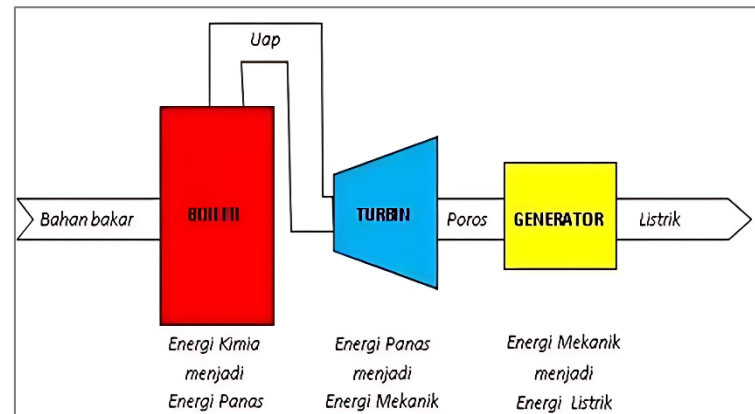
Generator sinkron memiliki peran penting dalam pembangkitan listrik karena selain menghasilkan daya aktif, juga mengatur daya reaktif yang dipengaruhi oleh arus eksitasi rotor (Wibisono dkk., 2024). Arus eksitasi memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran, di mana pengaturannya dilakukan secara otomatis oleh *device* yang bernama *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang membandingkan tegangan keluaran generator dan menyesuaikan arus eksitasi melalui *brush exciter* saat terjadi fluktuasi beban dalam sistem kelistrikan (Liliana dkk., 2021). Pengaturan arus eksitasi yang tepat menjadi aspek krusial dalam memengaruhi tegangan keluaran dan daya reaktif generator sinkron, khususnya dalam konteks operasi sistem tenaga.

PLTU Pulang Pisau yang dikelola oleh PT PLN Nusantara Power UP Pulang Pisau merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap di wilayah Kalimantan Tengah yang memiliki peran strategis dalam mendukung keandalan sistem kelistrikan Kalimantan Selatan-kalimantan Tengah (KSKT). Generator pada pembangkit ini dioperasikan dalam kondisi beban yang dinamis, sehingga diperlukan kemampuan adaptif terhadap perubahan kebutuhan daya aktif dan daya reaktif. Dengan demikian, keterkaitan antara arus eksitasi, tegangan keluaran, dan daya reaktif menjadi sangat esensial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh arus eksitasi terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif melalui pendekatan deskriptif berbasis data historis, guna memperoleh pemahaman operasional yang representatif terhadap hubungan parameter tersebut.

2. KAJIAN PUSTAKA

Pembangkit Listrik Tenaga Uap

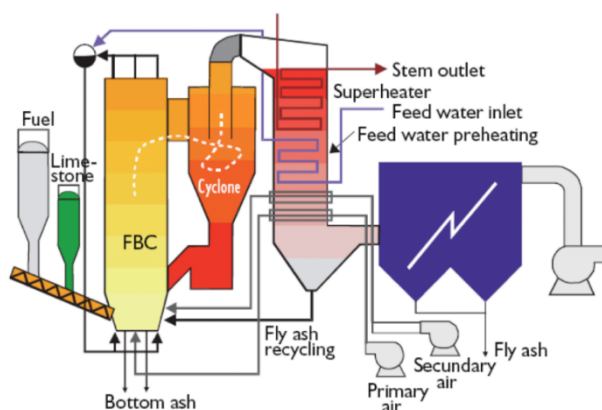
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu penyedia utama energi listrik di Indonesia. Proses kerja PLTU melibatkan beberapa tahapan konversi energi yang terstruktur. Energi kimia dari bahan bakar seperti batu bara atau biomassa diubah secara bertahap menjadi energi listrik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 (Pambudi dkk., 2023).



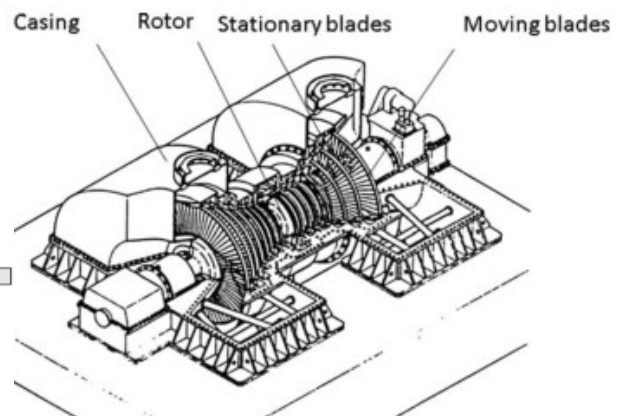
Gambar 1 Proses Konversi Energi PLTU

Beberapa komponen utama yang memengaruhi efisiensi dan kinerja sistem PLTU dalam proses konversi energi meliputi *boiler*, turbin uap, dan generator. *Boiler* adalah komponen pertama dalam sistem konversi energi pada pembangkit tenaga termal yang berfungsi mengubah energi kimia dari pembakaran batu bara di ruang bakar (*furnace*) menjadi energi panas, yang kemudian digunakan untuk memanaskan air sehingga menghasilkan uap bertekanan tinggi yang dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin uap yang porosnya terhubung langsung dengan generator (Raharjo dkk., 2023). Pada Gambar 2, boiler tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) merupakan teknologi pembakaran modern yang unggul dan banyak digunakan dalam industri pembangkit listrik. Teknologi ini memanfaatkan aliran fluida untuk menciptakan kondisi partikel padat yang *terfluidisasi*, sehingga memungkinkan proses pembakaran berlangsung pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan boiler tipe *pulverized coal* (PC) (Wang dkk., 2022).

Komponen kedua adalah turbin uap seperti pada gambar 3, yaitu mesin penggerak yang berfungsi mengkonversi energi potensial dari uap menjadi energi kinetik, kemudian diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros. Energi mekanis ini selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator pada sistem pembangkit listrik, baik secara langsung maupun melalui mekanisme roda gigi reduksi (ISLAMI, 2023). Komponen mesin konversi ketiga adalah generator yang berperan mengubah energi mekanik dari turbin uap menjadi energi listrik melalui mekanisme elektromagnetik, dengan memutar rotor di dalam medan magnet sehingga menginduksi arus listrik pada konduktor (Kiswantono, 2024).



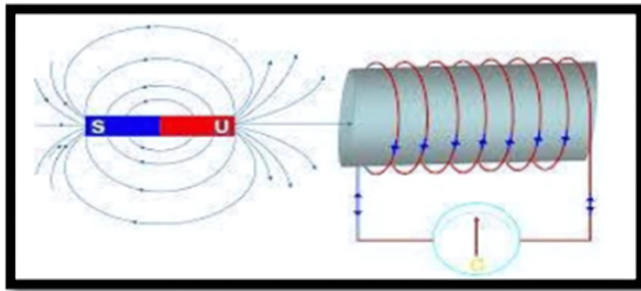
Gambar 2. Skema Boiler Tipe CFB



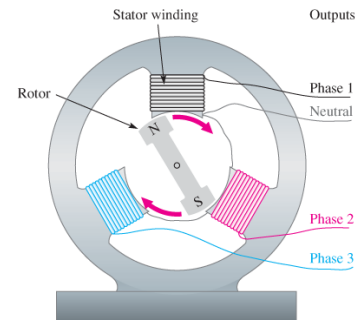
Gambar 3. Skema Turbin Uap

Generator Sinkron

Melalui percobaannya seperti pada gambar 4, Michael Faraday menemukan bahwa pergerakan medan magnet di dalam kumparan dapat menimbulkan tegangan listrik yang dikenal sebagai tegangan induksi (gaya gerak listrik). Tegangan ini terjadi akibat perubahan jumlah garis gaya magnet yang melintasi kumparan, sehingga menghasilkan gaya gerak listrik pada ujung-ujung kumparan. Prinsip ini menjadi dasar kerja generator sinkron, yaitu mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui pergerakan relatif antara medan magnet dan kumparan jangkar (Hardiansyah dkk., 2024).



Gambar 4. Percobaan Michael Faraday



Gambar 5 Skema Generator Sinkron

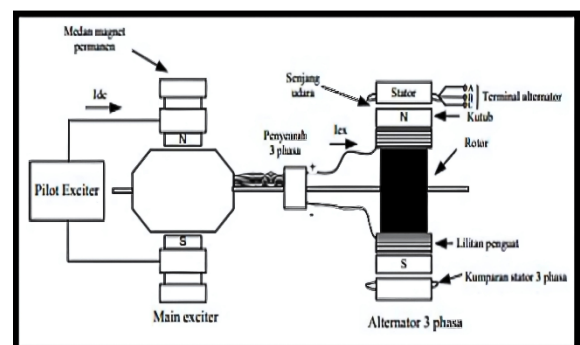
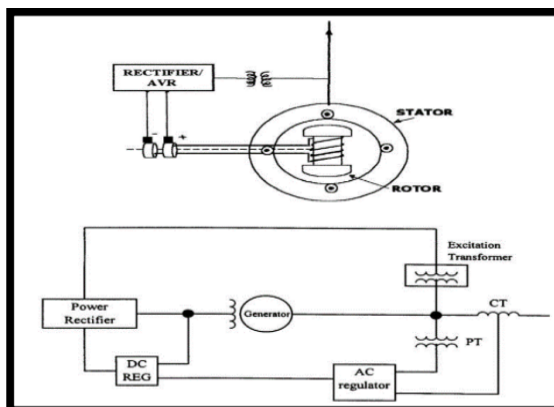
Generator sinkron terdapat dua komponen utama, yaitu rotor yang berputar untuk membangkitkan medan magnet menggunakan arus searah dari sumber eksitasi melalui slip ring dan sikat, serta stator yang diam untuk menerima induksi elektromagnetik dan menghasilkan arus bolak-balik (AC). Rotor tersusun atas slip ring, kumparan medan, dan poros rotor, sementara stator terdiri dari rangka stator, inti stator, alur dan gigi tempat kumparan dipasang, serta kumparan stator tempat timbulnya gaya gerak listrik (GGL) (Maulana dan Helmizar, 2022). Skema dari generator sinkron 3 fasa dapat dilihat pada Gambar 5.

Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi pada generator sinkron berfungsi menyediakan arus searah ke kumparan medan rotor untuk membentuk medan magnet yang berputar, sehingga memungkinkan stator menghasilkan tegangan listrik melalui proses induksi elektromagnetik (Wicaksono dan Prabowo, 2022)(Putra dan Santoso, 2022). Berikut ini adalah beberapa mekanisme dalam sistem eksitasi pada generator sinkron:

a. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis menggunakan tegangan keluaran dari generator 3 fasa itu sendiri sebagai sumber dayanya (*self excitation*), sehingga tidak memerlukan generator tambahan. Tegangan AC dari generator ini kemudian diturunkan melalui sebuah trafo yang dikenal sebagai trafo eksitasi. Setelah itu, tegangan yang telah diturunkan disearahkan menggunakan *rectifier* (*thyristor*) untuk menghasilkan tegangan DC yang dibutuhkan oleh sistem eksitasi (Hardiansyah dkk., 2024). Pada Gambar 6 merupakan skema dari sistem eksitasi ini.



Gambar 6. Skema Sistem Eksitasi Statis

Gambar 7. Skema Sistem Eksitasi Dinamis

b. Sistem Eksitasi Dinamis

Sistem eksitasi dinamis mendapatkan sumber eksitasinya dari mesin yang bergerak, seperti generator kecil. Dalam sistem ini, terdapat dua generator yang berada dalam satu poros dan digerakkan oleh turbin yang sama, mirip dengan sistem eksitasi tanpa sikat. Generator utama menghasilkan daya untuk konsumen, sedangkan generator kecil yang disebut *exciter* digunakan khusus untuk memasok daya ke sistem eksitasi (Hardiansyah dkk., 2024). Pada Gambar 7. Merupakan skema dari sistem eksitasi dinamis.

Reaksi Jangkar

Pada saat generator sinkron beroperasi tanpa beban, hanya fluks magnetik dari arus medan rotor yang mengalir melalui celah udara, sementara arus pada kumparan jangkar tidak ada. Namun ketika generator menerima beban, arus jangkar (I_a) mulai mengalir dan menghasilkan fluks jangkar yang berinteraksi dengan fluks medan utama. Interaksi ini mengubah konfigurasi medan magnet di dalam mesin dan memengaruhi besar tegangan terminal. Dengan demikian, dalam kondisi berbeban, fluks jangkar menghasilkan efek reaksi medan yang menyebabkan terjadinya penurunan tegangan pada reaktansi sinkron stator. Oleh karena itu, nilai gaya gerak listrik (GGL) yang diinduksikan (E_a) tidak lagi identik dengan tegangan terminal (V), melainkan dinyatakan seperti pada persamaan 1 yang menggambarkan hubungan antara GGL, tegangan terminal, reaktansi sinkron (X_s), dan arus jangkar (Widyasmara dkk., 2024).

$$E_a = V + (jX_s \cdot i_a) \quad (1)$$

Keterangan : E_a = GGL Induksi (Volt) jX_s = Reaktansi Sinkron
 V = Tegangan Terminal (Volt) I_a = Arus Jangkar

Dalam generator sinkron, besar gaya gerak listrik induksi E_a berbanding lurus dengan fluks medan magnet yang dibangkitkan oleh arus eksitasi rotor. Karena fluks medan berbanding lurus terhadap arus eksitasi (Sinaga dkk., 2022). Dengan demikian hubungan antara E_a dan arus eksitasi I_f dapat dinyatakan secara linier dalam bentuk persamaan seperti persamaan (2).

$$E_a = K_f \cdot I_f \quad (2)$$

dengan I_f merupakan arus eksitasi dan K_f merupakan konstanta eksitasi generator yang dipengaruhi oleh karakteristik konstruksi mesin seperti jumlah lilitan, sifat material magnetik serta celah udara rotor dan stator. Persamaan ini menunjukkan bahwa setiap perubahan arus eksitasi I_f akan menghasilkan perubahan langsung pada nilai E_a . Selanjutnya, perubahan E_a tersebut akan memengaruhi tegangan terminal V sesuai Persamaan (1). Dengan demikian, persamaan ini menegaskan secara matematis bahwa arus eksitasi merupakan parameter utama yang mengendalikan besar GGL induksi dan tegangan keluaran generator sebelum berdampak pada karakteristik daya reaktif yang dianalisis dalam penelitian ini.

Daya Listrik

Daya semu, atau dikenal juga sebagai *apparent power*, merupakan total daya dalam sistem listrik yang dihitung dari hasil perkalian antara tegangan efektif (*rms*) dan arus efektif (*rms*). Besaran ini mencerminkan keseluruhan daya yang mengalir dalam rangkaian, baik yang digunakan untuk melakukan kerja maupun yang hilang sebagai reaktansi. Nilai daya semu dinyatakan dalam satuan Volt Ampere (VA) dan dapat dihitung menggunakan Persamaan (3) (Adiwiranto dan Waluyo, 2021).

$$S = V \times I \quad (3)$$

Keterangan : S = Daya Semu (VA) I = Arus Jangkar / Beban (Ampere)
 V = Tegangan Terminal (Volt)

Daya aktif merupakan bagian dari daya listrik yang benar-benar digunakan untuk melakukan kerja atau menghasilkan energi dalam suatu sistem. Besarnya daya ini dipengaruhi oleh tegangan, arus, dan faktor daya, serta dinyatakan dalam satuan watt (W). Rumus perhitungan daya aktif untuk sistem satu fasa ditunjukkan pada Persamaan (4), sedangkan untuk sistem tiga fasa ditunjukkan pada Persamaan (5) (Sumarno dkk., 2024).

$$P = V \times I \times \cos \theta \quad (4)$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta \quad (5)$$

Keterangan : P = Daya Semu (VA) I = Arus Jangkar / Beban (Ampere)
 V = Tegangan Terminal (Volt) θ = Sudut Fasa ($^{\circ}$)

Untuk membangkitkan medan magnet dalam sistem listrik, dibutuhkan sejumlah energi khusus yang dikenal sebagai daya reaktif. Daya reaktif adalah komponen daya listrik yang tidak menghasilkan kerja nyata, tetapi sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan dan mendukung pembentukan medan magnet di peralatan seperti motor dan transformator. Besarnya daya reaktif dapat ditentukan sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (6) untuk 1 fasa dan Persamaan (7) untuk 3 fasa, dan dinyatakan dalam satuan kilo volt ampere reaktif (kVAR) (Ferdiansah dkk., 2023).

$$Q = V \times I \times \sin \theta \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \theta \quad (7)$$

Keterangan : P = Daya Semu (VA) I = Arus Jangkar / Beban (Ampere)
 V = Tegangan Terminal (Volt) θ = Sudut Fasa ($^{\circ}$)

Faktor Daya

Faktor daya bisa disebut juga sebagai nilai dari *cosinus* ($\cos \theta$) sudut fasa pada segitiga daya atau perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Pada prinsipnya faktor daya terdapat tiga jenis tergantung pada beban sistem, yaitu faktor daya *unity*, faktor daya tertinggal (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*) (Jamilah dkk., 2021). Pada Persamaan (8) merupakan persamaan dari faktor daya.

$\cos \theta$ = faktro daya

$$\cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot I \cdot \cos \theta}{V \cdot I} \quad (8)$$

Keterangan : S = Daya Semu (VA) I = Arus Jangkar / Beban (Ampere)
 P = Daya Aktif (W) θ = Sudut Fasa ($^{\circ}$)
 V = Tegangan Terminal (Volt)

Secara keseluruhan, Persamaan (1) hingga (8) membentuk keterkaitan matematis yang menjelaskan hubungan antara arus eksitasi, tegangan keluaran, dan daya reaktif generator sinkron. Berdasarkan Persamaan (2), gaya gerak listrik induksi E_a berbanding lurus dengan arus eksitasi I_f , sehingga perubahan arus eksitasi akan langsung memengaruhi besar E_a . Nilai E_a ini selanjutnya berkaitan dengan tegangan terminal V melalui Persamaan (1), di mana V dipengaruhi oleh E_a dan jatuh tegangan (reaktansi sinkron dan beban) $jX_s I_a$. Perubahan tegangan terminal tersebut kemudian memengaruhi besarnya daya semu, daya aktif, dan daya reaktif sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (3) hingga (7), dengan daya reaktif dinyatakan sebagai fungsi tegangan, arus, dan sudut fasa. Selanjutnya Persamaan (8) menjelaskan keterkaitan antara daya aktif, daya semu, dan faktor daya yang menunjukkan kondisi operasi generator terhadap beban (*lagging* atau *leading*). Dengan

demikian, secara matematis dapat dijelaskan bahwa variasi arus eksitasi I_f memengaruhi E_a , kemudian memengaruhi tegangan terminal V , yang selanjutnya menentukan besar daya reaktif Q yang disuplai atau diserap oleh generator. Hubungan inilah yang menjadi dasar teoritis dalam menganalisis pengaruh arus eksitasi terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif pada penelitian ini.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di perusahaan pembangkit listrik PLN Nusantara Power Unit Pembangkit Pulang Pisau yang berlokasi di Desa Buntoi, Kecamatan Kahayan Hilir, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah. Unit ini merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan kapasitas terpasang sebesar 2×60 MW. Pembangkit ini tergabung dalam sistem Kalselteng (Kalimantan Selatan–Tengah/KSKT) yang melayani distribusi energi listrik di wilayah Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah. Objek dalam penelitian ini adalah generator unit 1. Informasi detail mengenai spesifikasi teknis dari generator sinkron unit tersebut, yang beroperasi di PLTU Pulang Pisau, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Generator Sinkron PLTU Pulang Pisau

No	Uraian	Data Teknis
1	Pabrik	<i>Jinan Power Equipment</i>
2	Model	50WX18Z-054
3	No. Seri	-
4	Capacity (MVA)	77,647
5	Rated Power (MW)	66
6	Rated Voltage (kV)	10,5
7	Rated Current 40° (A)	4269,5
8	Power Factor	0,85 <i>Lagging</i>
9	Rated Efficiency (Hz)	50
10	Rated Rotating Speed (r/min)	3000
11	Fasa Number	3
12	Insulation Grade	F
13	Cooling Mode	<i>Air Cooled</i>
14	Wiring Mode	Y
15	Number of Poles	2
16	Excitation Mode	<i>Static Silicon-Control</i>
17	No Load Excitation Current (A)	427,27
18	Rated Excitation Current (A)	1097,8
19	No Load Excitation Voltage (V)	65,5
20	Rated Excitation Voltage (V)	215,5

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari *log sheet* dan sistem SCADA. Fokus analisis diarahkan pada pengamatan hubungan antara arus eksitasi dengan dua parameter utama generator, yaitu tegangan keluaran dan daya reaktif. Data yang digunakan berjumlah 168 sampel, yang dikumpulkan secara *realtime* setiap jam selama 7 hari pada tanggal 1-7 oktober 2024. Hubungan antar parameter dianalisis melalui visualisasi grafik untuk mengidentifikasi pola dan kecenderungan berdasarkan kondisi operasi aktual pembangkit. Analisis dilakukan secara deskriptif teknis, tanpa menggunakan metode statistik inferensial. Interpretasi hasil didasarkan pada observasi langsung terhadap fluktuasi parameter, serta diperkuat dengan kajian teori dan referensi teknis dari literatur kelistrikan yang relevan.

Pendekatan kuantitatif-deskriptif digunakan karena bertujuan untuk menggambarkan dan menganalisis karakteristik hubungan antar arus eksitasi, tegangan keluaran dan daya reaktif berdasarkan kondisi operasi generator di lapangan. Selain untuk mengidentifikasi pola perubahan parameter secara aktual, pendekatan ini juga dapat menjelaskan respon sistem eksitasi pada AVR terhadap perubahan beban. Dengan demikian pendekatan ini dipilih karena penelitian ini lebih

menekankan pemahaman perilaku sistem eksitasi generator pada kondisi operasional di lapangan, bukan pada pembentukan model prediktif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

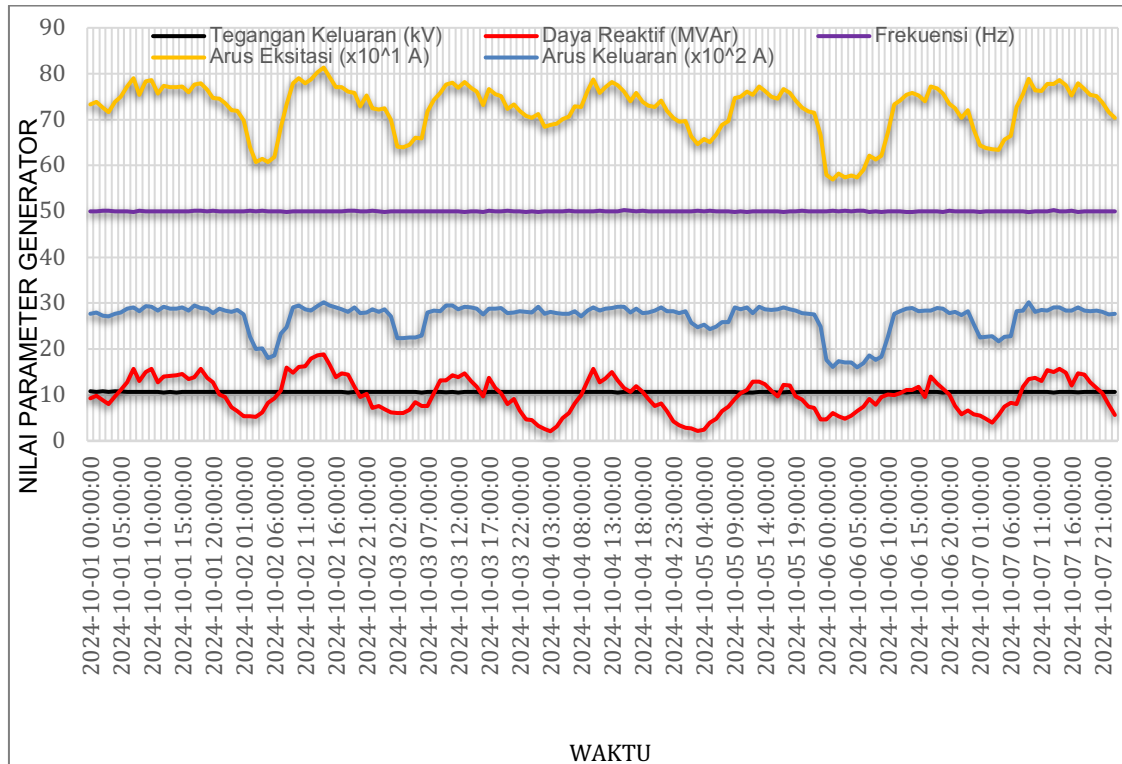
Pada generator sinkron Unit 1 PLTU Pulang Pisau, arus eksitasi dibangkitkan oleh sistem eksitasi statis yang bersumber dari tegangan terminal generator. Tegangan keluaran diturunkan melalui trafo eksitasi dan *disearahkan* menggunakan penyearah *thyristor* untuk menghasilkan arus DC terkontrol yang dialirkan ke kumparan medan rotor. Besarnya arus eksitasi dikendalikan secara otomatis oleh *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan cara memantau tegangan terminal dan menyesuaikan sudut *penyalan thyristor*, sehingga tegangan keluaran generator tetap berada pada nilai referensi.

Arus eksitasi selalu ada selama generator beroperasi dan nilainya bersifat dinamis mengikuti perubahan beban serta kebutuhan daya reaktif sistem. Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 8, perubahan arus eksitasi terutama terjadi saat terjadi peningkatan beban induktif pada siang sampai sore hari dan saat penurunan beban pada malam sampai dini hari. Ketika beban meningkat, arus jangkar bertambah sehingga menimbulkan reaksi jangkar yang menurunkan tegangan terminal. Untuk *mengkompensasi* kondisi tersebut, *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menaikkan arus eksitasi sehingga fluks medan dan gaya gerak listrik induksi meningkat, sehingga tegangan terminal tetap dapat dipertahankan mendekati nilai nominal.

Pada Gambar 8, arus keluaran generator menunjukkan kestabilan relatif pada rentang 2400–3000 A. Beberapa penurunan arus yang cukup signifikan terjadi pada tanggal 2, 3, 6, dan 7 Oktober, umumnya pada rentang waktu pukul 00.00–09.00, yang mengindikasikan penurunan permintaan daya sistem pada jam beban rendah. Di luar rentang waktu tersebut, arus keluaran cenderung stabil di sekitar 2800 A, yang setara dengan daya aktif sekitar ± 52 MW. Daya reaktif generator selama periode pengamatan berfluktuasi pada kisaran 2–18 MVar. Pola fluktuasi ini menunjukkan kecenderungan yang mengikuti perubahan arus eksitasi. Berdasarkan Gambar 8, peningkatan daya reaktif secara konsisten terjadi pada jam operasional siang hari, yaitu sekitar pukul 08.00–17.00 dengan pengecualian pada akhir pekan (5–6 Oktober 2024) yang menunjukkan pola kenaikan lebih landai. Kondisi ini mengindikasikan meningkatnya dominasi beban bersifat induktif, seperti beban industri yang umumnya aktif pada jam kerja. Beban induktif diketahui menyerap daya reaktif dari sistem sehingga berpotensi menurunkan tegangan terminal generator. Fenomena ini terlihat pada Gambar 8, di mana peningkatan daya reaktif diikuti oleh peningkatan arus eksitasi. Arus eksitasi generator sendiri menunjukkan variasi fluktuatif dalam kisaran 600–800 A, yang berubah mengikuti dinamika pembebanan dan kebutuhan daya reaktif sistem. Dengan demikian kecenderungan arus eksitasi yang turut meningkat seiring dengan naiknya daya reaktif, memperkuat indikasi bahwa eksitasi berperan aktif dalam kompensasi penurunan tegangan akibat dominasi beban induktif (Putra dkk., 2022).

Secara operasional, ketika terjadi peningkatan beban induktif pada rentang pukul 08.00–17.00, arus eksitasi cenderung meningkat mendekati nilai atas (± 800 A). Sebaliknya, pada periode penurunan beban pada malam hingga dini hari, khususnya pada pukul 15.00–23.00, arus eksitasi dan daya reaktif menunjukkan tren penurunan, mencerminkan berkurangnya konsumsi daya reaktif dari sistem.

Fenomena ini selaras dengan prinsip kerja generator sinkron, di mana perubahan arus eksitasi memengaruhi besar gaya gerak listrik induksi E_a sesuai Persamaan (1) dan (2). Kenaikan arus eksitasi meningkatkan E_a , sehingga membantu menjaga kestabilan tegangan terminal meskipun terjadi penurunan tegangan akibat efek reaksi jangkar dan peningkatan beban induktif. Selanjutnya, kenaikan arus eksitasi juga meningkatkan kemampuan generator dalam menyuplai daya reaktif ke sistem, sebagaimana tercermin dari hubungan searah antara kurva arus eksitasi dan daya reaktif pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Parameter Operasi Generator Unit 1 PLTU

Dengan demikian, berdasarkan data pengamatan pada periode 1–7 Oktober 2024, dapat dibuktikan bahwa arus eksitasi memiliki pengaruh positif terhadap daya reaktif dan tegangan keluaran generator, serta berperan langsung dalam menjaga kestabilan tegangan terminal generator pada kondisi dinamis pembebanan. Periode pengamatan tanggal 1–7 Oktober 2024 dipilih karena mencakup satu siklus operasi mingguan yang terdiri dari hari kerja dan akhir pekan, serta variasi kondisi beban siang, malam, dan dini hari. Rentang waktu ini mampu merepresentasikan dinamika pembebanan sistem yang umum terjadi pada operasi harian PLTU Pulang Pisau, termasuk kondisi beban rendah pada malam hari dan beban tinggi pada jam operasional siang hari. Dengan total 168 data pengamatan yang diambil secara periodik selama periode tersebut, data yang digunakan cukup representatif untuk menganalisis hubungan antara arus eksitasi, tegangan terminal, dan daya reaktif dalam kondisi operasi aktual generator sinkron.

5. KESIMPULAN DAN SARAN-SARAN

Kesimpulan

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa arus eksitasi memiliki pengaruh langsung terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif generator sinkron. Peningkatan arus eksitasi menyebabkan tegangan keluaran tetap dapat dipertahankan meskipun terjadi peningkatan beban yang berpotensi menurunkan tegangan. Selain itu kenaikan arus eksitasi juga meningkatkan kemampuan generator dalam menyuplai daya reaktif, khususnya pada kondisi beban bersifat induktif yang cenderung menyebabkan *drop* tegangan. Dengan demikian, arus eksitasi berpengaruh positif terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif serta berperan penting dalam menjaga kestabilan tegangan akibat perubahan beban dan kebutuhan daya reaktif sistem.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada aspek metode dan data yang digunakan. Pendekatan kuantitatif-deskriptif yang diterapkan hanya menggambarkan hubungan antar variabel tanpa melakukan pengujian kausalitas atau pemodelan dinamis yang lebih mendalam. Selain itu, data yang digunakan terbatas pada periode 1–7 Oktober 2024 sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan variasi kondisi operasi sepanjang siklus tahunan, khususnya pada kondisi beban ekstrem atau gangguan sistem. Meskipun demikian, data yang digunakan tetap relevan untuk menggambarkan karakteristik respons sistem eksitasi generator pada kondisi operasi normal.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya dalam mengembangkan pengujian pengaruh eksitasi terhadap tegangan keluaran, daya reaktif, serta respons sistem terhadap variasi beban. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan pendekatan berbasis pemodelan atau simulasi untuk mendukung analisis yang lebih luas pada sistem pembangkit lainnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Adiwiranto, M.N., & Waluyo, C.B., (2021). Prototipe Sistem Monitoring Konsumsi Energi Listrik serta Estimasi Biaya pada Peralatan Rumah Tangga Berbasis Internet of Things. *Jurnal ELECTRON*, 2 (2), 69–78. <https://doi.org/10.33019/electron.v2i2.2>
2. Azmi, M. I., Hermawan, & Facta, M., (2021). Analisis Stabilitas dan Penentuan Proteksi Tegangan dan Frekuensi Di Generator Transformator PLTP Darajat. *TRANSIENT*, 10(3), 460–467. <https://doi.org/10.14710/transient.v10i3.460-467>
3. Eteruddin, H., Setiawan, D., Putra, P., & Hutagalung, P. P. P., (2020). Evaluasi Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Pada Feeder 7 Peranap PT. PLN Persero Rayon Taluk Kuantan, *Prosiding Seminar Nasional Pakar Ke 3 Tahun 2020*, 141–146. <https://doi.org/10.25105/PAKAR.V0I0.6778>
4. Ferdiansah, B., Margiantono, A., & Ahmad, F., (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya dan Nilai Jatuh Tegangan. *JJEEE: Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234–241. <https://doi.org/10.37905/jjee.v5i2.20893>
5. Hardiansyah, J., Salahuddin, & Taufiq, (2024). Analisis Pengaturan Tegangan Generator Sinkron Berdasarkan Perubahan Beban Daya Menggunakan Static Excitation System Berbasis Matlab Simulink R2015a. *Jurnal Energi Elektrik*, 13(1), 67-74. <https://doi.org/10.29103/jee.v13i1.4933>
6. Liliana, Benedicto, F., & Bandri, S., (2021). Analisis Kinerja Automatic Voltage Regulator (AVR) Sebagai Pengontrol Suplai Tegangan Eksitasi Generator AC 3 Fasa. *IJEERE: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy*, 1(1), 37–44. <https://doi.org/10.57152/ijeere.v1i1.88>
7. Islami, I.A., (2023). Penerapan Preventive Maintenance Pada Turbin Uap Di PLTU Rembang. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 15(1), 42-53. <https://doi.org/10.24843/jem.2022.v15.i01.p06>
8. Jamilah, S., Usrah, I., & Chobir, A., (2021). Analisis Pengaruh Perubahan Faktor Daya Dari Lagging Menjadi Leading Di Favehotel Tasikmalaya. *Journal Of Energy and Electrical Engineering (Jeee)*, 4(1), 6-12. <https://doi.org/10.37058/jeee.v4i1.5403>
9. Kiswanto, A., & Hermanto, Y., (2024). Peningkatan Kinerja PLTB Melalui Kendali Frekuensi Fuzzy Logic. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(1), 137–147. <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i1.3948>
10. Maulana, H.R., & Helmizar, A.S., (2022). Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Pada Generator. *REKAYASA MEKANIKA*, 6(2), 63–70. <https://doi.org/10.33369/rekayasamekanika.v6i2.25458>
11. Pambudi, A., Sukmana, I., & Risano, Y., (2023). Pengaruh Nilai Spesifik Konsumsi Bahan Bakar (SFC) Terhadap Jumlah Pemakaian Batubara Di PT Bukit Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2x8 MW. *Jurnal Profesi Insinyur (JPI)*, 4(2), 133–142. <https://doi.org/10.23960/jpi.v4n2.109>
12. Putra, D.F.U., Firdaus, A.A., Putra, N.U., & Penangsang, O., (2022). Prediksi Voltage Stability Index (VSI) Metode Artificial Neural Network (ANN) untuk Mendeteksi Tegangan Jatuh. *Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi* 4(4), 192–197. <https://doi.org/10.37034/jsisfotek.v4i4.180>
13. Putra, S.A., & Santoso, D.B., (2022). Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator Sinkron Unit 3 PLTA UBRUG. *Jurnal DISPROTEK*, 13(2), 113–122. <https://doi.org/10.34001/jdpt.v12i2>
14. Raharjo, R.W., Asni B, A., & Kasrani, M.W., (2023). Pemodelan Sistem Pengendalian Level Deaerator Berbasis Self-Tuning Fuzzy PID Controller di PLTU Teluk Balikpapan. *JURNAL TEKNOLOGI TERPADU*, 11(2), 191–205. <https://doi.org/10.32487/jtt.v11i2.1672>
15. Sinaga, S., Zondra, E., & Yuvendius, H., (2022). Studi Evaluasi Eksitasi Generator Unit 23 Di PT. Indah Kiat Pulp And Paper. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 7(1), 7–15. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v7i1.9620>
16. Sumarno, E., Irawati, & Gazali, R., (2024). Perencanaan Instalasi Listrik Gedung Warehouse PT. XYZ Semarang Jawa Tengah. *Jurnal Elektro & Informatika Swadharma (JEIS)*, 4(1), 17–32. <https://doi.org/10.56486/jeis.vol4no1.407>
17. Wang, X., Yan, C., Liu, W., & Liu, X., (2022). Research on Carbon Emissions Prediction Model of Thermal Power Plant Based on SSA-LSTM Algorithm with Boiler Feed Water Influencing Factors. *Sustainability (MDPI)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142315988>

18. Wibisono, A., Aaron, T. G., & Riyadi, S., (2024). Analisis Kinerja Generator Sinkron Tiga Fasa pada Pembebanan Resistif. *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 20–26. <https://doi.org/10.30651/cl.v7i01.21268>
19. Wicaksono, C.D., & Prabowo, Y.A., (2022). Analisa dan Pemodelan Generator DC Sinkron Daya Rendah. *POLEKTRO: Jurnal Power Elektronik*, 11(2), 271–275. <https://ejournal.poltekharber.ac.id/index.php/powerелеktro/article/download/3738/1965>
20. Wibisono, A., Widyasmara, D.I., & Riyadi, S., (2024). Dampak Pembebanan Kapasitif Murni dan Resistif Kapasitif Pada Perubahan Vektor Generator Sinkron Tiga Fasa. *Jurnal ElektriKa*, 16(1). <https://doi.org/10.26623/elektriKa.v16i1.8695>
- Chandrahadinata, D., & Timur, F. (2022). Strategi Peningkatan Daya Saing Pemasaran Pabrik Teh Barokah Jaya. *Jurnal Kalibrasi*, 20(1), 17–22. <https://doi.org/10.33364/kalibrasi/v.20-1.1098>