

Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron 11KV Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas

Gaul Pernandes Tambunan

Universitas Negeri Medan

Helfridolin Gultom

Universitas Negeri Medan

Heber Riko Parulian Manalu

Universitas Negeri Medan

Desman Jonto Sinaga

Universitas Negeri Medan

Alamat: Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli
Serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi penulis: gaul.5223230038@mhs.unimed.ac.id

Abstract. The excitation system is a fundamental component in the operation of synchronous generators, functioning to regulate output voltage stability and control reactive power during dynamic load variations. This research was conducted at ULPLTA Sipansihaporas Unit 2, which generates 17 MW using a static excitation system equipped with an Automatic Voltage Regulator (AVR) and 110 V DC battery for initial excitation. The objective of this study is to analyze the excitation process, identify the main components of the excitation system, and evaluate its performance under operational load conditions. Data for this research was obtained directly from field observations and generator operational parameters recorded through the Central Control Room (CCR). The results indicate that the excitation current and voltage remain constant at 520 A and 58 V respectively despite fluctuations in active and reactive power. The system was able to maintain the terminal voltage at 11.4 kV and frequency at 50 Hz \pm 0.1, demonstrating stable performance and operational reliability. These findings confirm that the excitation system of Unit 2 performs efficiently in supporting power system stability and reliability within the regional grid.

Keywords: Excitation System, Synchronous Generator, AVR, Stability, Hydropower

Abstrak. Sistem eksitasi merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian generator sinkron karena berfungsi untuk mengatur kestabilan tegangan keluaran serta mengontrol daya reaktif saat terjadi perubahan beban secara dinamis. Penelitian ini dilakukan di ULPLTA Sipansihaporas Unit 2 dengan kapasitas pembangkitan 17 MW, yang menggunakan sistem eksitasi statis dilengkapi Automatic Voltage Regulator (AVR) dan baterai DC 110 V sebagai sumber eksitasi awal. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis proses eksitasi, mengidentifikasi komponen utama sistem eksitasi, serta mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi operasi nyata. Data diperoleh melalui observasi lapangan dan pencatatan parameter operasi generator melalui Central Control Room (CCR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus dan tegangan eksitasi berada pada kondisi stabil sebesar 520 A dan 58 V meskipun terjadi fluktuasi daya aktif dan daya reaktif. Tegangan terminal generator tetap stabil pada 11,4 kV serta frekuensi sistem berada dalam rentang 50 Hz \pm 0,1. Hal ini membuktikan bahwa sistem eksitasi Unit 2 bekerja secara optimal dalam menjaga kestabilan sistem tenaga listrik dan mendukung keandalan operasi pembangkit.

Kata kunci: AVR, Generator Sinkron, Sistem Eksitasi, Stabilitas, PLTA

LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam mendukung aktivitas sosial, ekonomi, dan industri. Peningkatan konsumsi energi listrik menuntut tersedianya sistem pembangkitan yang handal, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu pembangkit listrik yang berperan penting dalam menjaga kestabilan pasokan energi di Indonesia khususnya wilayah Sumatera adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). PLTA merupakan pembangkit berbasis energi terbarukan yang memanfaatkan energi potensial air untuk memutar turbin dan menghasilkan

energi listrik melalui generator. Selain ramah lingkungan, PLTA memiliki keunggulan dalam fleksibilitas operasi, efisiensi tinggi, serta kemampuan mengatasi kebutuhan daya puncak dengan respon yang cepat dibandingkan pembangkit berbahan bakar fosil.

Unit Layanan Pembangkit Listrik Tenaga Air (ULPLTA) Sipansihaporas yang terletak di Kabupaten Toba, Sumatera Utara, merupakan salah satu pembangkit di bawah pengelolaan PT PLN Nusantara Power yang berkontribusi dalam sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara. ULPLTA Sipansihaporas memiliki kapasitas terpasang 50 MW yang dibagi menjadi dua unit pembangkit identik, dimana masing-masing unit menghasilkan daya sebesar 25 MW dengan tegangan keluaran generator 11 kV sebelum dinaikkan melalui transformator step-up untuk disalurkan ke jaringan transmisi 150 kV. Keandalan pembangkit ini sangat penting dalam menjaga kestabilan sistem interkoneksi Sumatera yang terhubung melalui jaringan transmisi 150 kV dari Sumatera Utara hingga Aceh.

Generator yang digunakan pada ULPLTA Sipansihaporas adalah generator sinkron tiga fasa yang membutuhkan sistem eksitasi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor. Sistem eksitasi berfungsi mengatur besar arus DC yang mengalir ke kumparan medan rotor sehingga dapat mengendalikan tegangan terminal generator serta daya reaktif yang disuplai ke sistem. Peranan sistem eksitasi sangat menentukan kestabilan tegangan dan faktor daya generator, khususnya saat mengalami perubahan beban yang bersifat dinamis. Apabila sistem eksitasi mengalami gangguan atau ketidakstabilan, maka dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem, penurunan kualitas daya, penyimpangan tegangan, trip unit pembangkit, bahkan dapat memicu pemadaman (blackout) regional.

Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas menerapkan sistem eksitasi statis (static excitation system) berbasis thyristor yang dikendalikan secara otomatis menggunakan Automatic Voltage Regulator (AVR). Sistem eksitasi statis memiliki keunggulan respon lebih cepat, kontrol yang presisi, serta efisiensi yang tinggi dibandingkan eksitasi menggunakan sikat konvensional maupun sistem brushless. Selain itu, suplai arus eksitasi awal diperoleh dari baterai DC 110 V sehingga mampu memberikan eksitasi awal ketika generator dalam kondisi belum menghasilkan tegangan induksi.

Dalam operasionalnya, sistem eksitasi harus mampu merespons perubahan beban tanpa menyebabkan penyimpangan tegangan terminal di luar batas standar yang ditetapkan oleh PLN yaitu $\pm 5\%$ dari nominal. Oleh karena itu, analisis kinerja sistem eksitasi diperlukan sebagai bagian dari pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dan peningkatan reliabilitas pembangkit. Studi ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan parameter eksitasi (arus dan tegangan eksitasi) serta pengaruhnya terhadap nilai tegangan terminal, daya aktif, daya reaktif, dan frekuensi pada kondisi operasi aktual di lapangan.

Sehingga, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam evaluasi performa pembangkit, peningkatan sistem eksitasi untuk pengendalian tegangan yang lebih optimal, dan sebagai referensi akademik serta teknis terkait penerapan sistem eksitasi pada pembangkit tenaga air di Indonesia.

KAJIAN TEORITIS

1. Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan alat listrik yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam sistem pembangkitan generator yang umum digunakan adalah generator sinkron dimana frekuensi keluaran generator sama dengan putaran rotor generator. Ketika generator menanggung beban listrik yang bervariasi,

generator umum dioperasikan secara paralel. Dikatakan generator sinkron karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, sehingga kecepatan sinkron dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumputan medan generator sinkron terdapat pada rotor, sedangkan kumputan jangkar terdapat pada stator. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor. Karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, maka generator sinkron ini akan menghasilkan energi listrik bolak balik (AC) (Sarlianti, 2017).

Generator sinkron umumnya digunakan pada pembangkit putaran tinggi seperti pembangkit listrik tenaga gas dan uap. Pembebanan pada proses pembangkitan listrik harus selalu stabil, terutama saat terjadi beban maksimum. Generator sinkron sangat berperan dalam kestabilan pembangkitan tersebut. Untuk menjamin kestabilan pelayanan beban diperlukan kapasitas daya tambahan. Kapasitas daya listrik dapat bertambah dengan cara sinkronisasi generator. Sinkronisasi adalah memparalelkan dua atau lebih generator pada sistem pembangkit dengan berbagai syarat yang harus terpenuhi. Pada proses sinkronisasi tegangan keluaran dari generator yang bekerja paralel harus selalu stabil agar bisa bekerja terkoneksi.

a). Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja dari generator sinkron adalah apabila kumputan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan mensuplai arus searah (DC) terhadap kumputan medan, maka dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumputan medan akan menimbulkan fluks.

Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor generator segera dioperasikan, sehingga rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu sesuai dengan jumlah putaran yang diharapkan. Perputaran dari rotor generator tersebut akan sekaligus memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumputan medan rotor.

$$n_s = \frac{f \cdot 120}{p} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- n = Kecepatan putar rotor (rpm)
- p = Jumlah kutub rotor
- f = Frekuensi (Hz)

Pada hukum Faraday, mengenai induksi elektromagnetik sebagai fenomena dasar yang diterapkan pada generator. Hukum Faraday menyebutkan jika terjadi perubahan garis gaya magnet pada sebuah kumputan kawat, maka akan timbul gaya gerak listrik (ggl) pada kawat tersebut. Jika kumputan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul pula arus listrik yang mengalir pada rangkaian.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

Di mana

- e : ggl induksi
- $-N$: Jumlah lilitan
- $d\Phi$: Perubahan fluks magnet

dt : Perubahan waktu

b). Kontruksi Generator

Generator sinkron tersusun atas dua segmen utama, yaitu stator (bagian statis) dan rotor (bagian dinamis).

1. Stator

Stator merupakan bagian diam dari generator yang berfungsi menghasilkan tegangan bolak-balik (AC) tiga fasa. Konstruksi stator terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

- Rangka stator (stator frame) yang terbuat dari baja tuang sebagai struktur pendukung komponen internal.
- Inti stator (stator core) terbuat dari susunan laminasi baja silikon untuk mengurangi rugi histerisis dan eddy current. Inti stator memiliki slot tempat kumparan ditempatkan.
- Kumparan stator (stator winding) berupa lilitan kawat tembaga berisolasi yang ditempatkan pada slot inti stator dan dihubungkan sehingga menghasilkan tegangan keluaran tiga fasa ketika dipotong oleh medan magnet berputar.
- Sistem pendingin stator, menggunakan pendinginan udara terkontrol melalui *cooling fan* yang dipasang pada poros rotor.

Stator generator di ULPLTA Sipansihaporas memiliki fungsi utama menyalurkan energi listrik hasil induksi dari medan magnet yang dibangkitkan rotor, kemudian diteruskan menuju transformator step-up untuk dinaikkan menjadi 150 kV sebelum masuk jaringan transmisi interkoneksi Sumatera.

2. Rotor

Rotor merupakan bagian generator yang berputar mengikuti putaran turbin. Rotor terdiri dari kumparan medan yang dialiri arus DC dari sistem eksitasi untuk menghasilkan medan magnet utama. Konstruksi rotor generator PLTA menggunakan tipe rotor kutub menonjol (salient pole) karena berputar pada kecepatan rendah, sesuai karakteristik turbin air *Francis* yang digunakan pada unit pembangkit.

Bagian-bagian utama rotor meliputi:

- Poros rotor, yang menjadi penghubung langsung ke turbin.
- Kumparan medan (field winding) yang terdiri dari lilitan kawat tembaga berisolasi pada kutub rotor.
- Kutip rotor (salient poles) yang dibuat dari baja lunak laminated dan dipasang mengelilingi rotor.
- Cincin geser (slip ring) dan brush carbon, digunakan untuk mengantarkan arus DC eksitasi ke kumparan rotor dari sistem eksitasi statis.
- Pendinginan rotor, menggunakan kipas internal untuk memastikan temperatur rotor tetap dalam batas operasi.

Perilaku generator sinkron dianalisis berdasarkan kondisi pembebanan:

1. Kondisi Tanpa Beban

Pada kondisi sirkuit terbuka, arus jangkar bernilai nol ($I_a = 0$). Ketiadaan arus menyebabkan tidak adanya reaksi jangkar, sehingga tegangan terminal (V_T) ekuivalen dengan GGL induksi (EA):

$$V_T = EA \dots \dots \dots (1)$$

2. Kondisi Berbeban

Saat generator melayani beban, arus beban (I_L) yang mengalir pada kumparan jangkar memicu reaksi jangkar. Fenomena ini menyebabkan deviasi nilai EA terhadap VT . Disparitas tegangan tersebut diakibatkan oleh tiga faktor impedansi internal: resistansi jangkar, reaktansi bocor, dan reaktansi reaksi jangkar. Hubungan matematis pada kondisi berbeban dinyatakan dalam Persamaan (2) dan (3):

$$EA = VT + I_L \times Z \dots\dots\dots (1)$$

Dengan mensubstitusi komponen reaktansi sinkron persamaan tegangan menjadi:

$$EA = VT + jX_a I_a + jX_L I_a + R_a I_a \dots\dots\dots (2)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan bangkitan merupakan penjumlahan vektor dari tegangan terminal dan jatuh tegangan pada impedansi internal generator.

2. Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi atau biasa disebut sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (I_f) kepada kumparan medan generator AC yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan bantuan arus searah. Dengan mengatur besar kecilnya arus listrik tersebut maka dapat mengatur besar tegangan output generator dan mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (*Infinite bus*) (Handayani et al., 2023).

Sesuai dengan prinsip elektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan *fluks-fluks* magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga dihasilkan tegangan listrik bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor, semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan oleh sebuah generator (Farhan, 2021).

1. Komponen Utama Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi dalam menghasilkan dan mengatur suplai arus eksitasi:

- Sumber Daya Eksitasi (Exciter): Berfungsi sebagai penyedia arus eksitasi DC yang dibutuhkan oleh kumparan medan pada rotor generator sinkron. Exciter menghasilkan arus yang digunakan untuk membentuk medan magnet sehingga tegangan dapat diinduksikan pada stator.
- Regulator Tegangan Otomatis (Automatic Voltage Regulator): Berfungsi mengatur dan menstabilkan tegangan terminal generator agar tetap berada pada nilai yang ditetapkan meskipun terjadi perubahan beban. AVR secara otomatis menambah atau mengurangi arus eksitasi sesuai kebutuhan.
- Penyearah (Rectifier): Berfungsi mengubah arus AC menjadi arus DC yang digunakan sebagai arus eksitasi untuk rotor. Rectifier memastikan konversi daya berlangsung stabil sehingga arus eksitasi dapat dikendalikan dengan baik oleh AVR.

2. Klasifikasi Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi pada generator sinkron juga dapat diklasifikasikan berdasarkan metode penyediaan dan pengaturan sumber eksitasinya:

- Sistem Eksitasi Statis (Static Excitation System), Sistem eksitasi statis merupakan sistem eksitasi yang mengambil sumber daya dari terminal generator atau dari suplai AC

eksternal, kemudian diubah menjadi arus DC melalui penyearah yang dikendalikan (controlled rectifier). Prinsip kerjanya adalah AVR mengatur sudut penyalan (firing angle) pada thyristor untuk mengontrol besar arus DC yang dialirkan ke kumparan medan rotor. Ketika tegangan keluaran generator menurun akibat peningkatan beban, AVR akan memperkecil sudut penyalan sehingga arus eksitasi meningkat. Dengan mekanisme ini, sistem eksitasi statis dapat memberikan respons yang sangat cepat dan akurat terhadap setiap perubahan kondisi sistem tenaga.

- Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Brushless Excitation System), Sistem eksitasi tanpa sikat bekerja dengan menggunakan generator AC kecil (pilot exciter) yang dipasang seporos dengan generator utama. Arus AC dari pilot exciter kemudian diarahkan ke rotating rectifier yang terpasang pada rotor untuk diubah menjadi arus DC, dan langsung disalurkan ke kumparan medan rotor tanpa melalui sikat dan slip ring. Prinsip kerjanya adalah AVR mengendalikan arus eksitasi pada pilot exciter sehingga jumlah arus DC yang masuk ke rotor dapat disesuaikan sesuai kebutuhan pengaturan tegangan. Karena semua komponen eksitasi berada pada bagian berputar, sistem ini tidak memerlukan kontak geser, sehingga meningkatkan keandalan mekanis dan mengurangi kebutuhan perawatan.

Untuk generator berkapasitas besar yang beroperasi pada sistem tenaga interkoneksi, sistem eksitasi statis lebih disukai dan sering digunakan. Hal ini karena sistem eksitasi statis memiliki kecepatan respon dan akurasi kontrol yang lebih tinggi dalam mengatur tegangan terminal dan daya reaktif, terutama saat terjadi perubahan beban mendadak atau gangguan transien. Kemampuan ini sangat penting untuk menjaga stabilitas sistem tenaga skala besar, sehingga lebih unggul dibandingkan sistem brushless untuk aplikasi pembangkit daya tinggi.

3. Automatic Voltage Regulator (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) berfungsi menjaga kestabilan tegangan keluaran generator agar tetap berada pada nilai nominal meskipun terjadi perubahan beban. AVR bekerja dengan prinsip pengaturan arus eksitasi pada eksiter melalui sistem kontrol otomatis. Ketika tegangan keluaran generator menurun akibat peningkatan beban, AVR akan menambah arus eksitasi, sedangkan apabila tegangan melebihi nilai nominal, AVR akan mengurangi arus eksitasi untuk menurunkan tegangan kembali ke batas yang ditetapkan. AVR yang digunakan merupakan tipe thyristor dengan sumber daya dari transformator eksitasi tiga fasa yang disearahkan menggunakan rangkaian penyearah terkendali. Pengaturan ini dilakukan berdasarkan hasil perbandingan antara tegangan keluaran generator yang diukur oleh potential transformer dengan nilai referensi melalui rangkaian komparator, sehingga sistem mampu merespons perubahan kondisi operasi secara cepat dan stabil.

4. Thyristor

Thyristor atau Silicon Controlled Rectifier (SCR) adalah perangkat semikonduktor daya yang tersusun dari empat lapisan PNPN dengan tiga terminal yaitu anoda, katoda, dan gate. Komponen ini berfungsi sebagai sakelar elektronik pada rangkaian tegangan dan arus tinggi. SCR akan menghantar arus ketika diberi tegangan maju antara anoda–katoda dan menerima sinyal pemicu pada terminal gate. Setelah konduksi berlangsung, SCR tetap aktif hingga arus turun di bawah holding current atau tegangan anoda–katoda menjadi nol.

Dalam sistem generator sinkron, SCR digunakan pada Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk mengatur arus eksitasi rotor melalui pengendalian sudut penyalan (firing angle).

Dengan menyesuaikan sudut penyalaan, AVR dapat mengontrol besar kecilnya arus eksitasi sehingga tegangan keluaran generator tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif, yaitu menggambarkan proses kerja sistem eksitasi generator sinkron melalui pengamatan langsung serta analisis data operasi yang diperoleh dari Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas. Penelitian ini tidak memberikan perlakuan tertentu terhadap objek, namun berfokus pada pengumpulan data aktual untuk menggambarkan kondisi kinerja sistem eksitasi di lapangan.

1. Desain Penelitian

Penelitian dirancang sebagai studi lapangan (field research) yang mengkaji secara langsung sistem eksitasi statis pada generator sinkron 11 kV. Fokus utama penelitian meliputi:

- a) Proses eksitasi mulai dari eksitasi awal (field flashing) hingga kondisi operasi normal.
- b) Identifikasi komponen utama sistem eksitasi seperti AVR, transformator eksitasi, thyristor, carbon brush, dan sumber DC.
- c) Evaluasi kinerja arus dan tegangan eksitasi terhadap variasi beban generator.

Desain ini mengacu pada metode analisis sistem tenaga yang umum digunakan untuk mengevaluasi stabilitas tegangan dan suplai daya reaktif pada generator sinkron.

2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas, PT PLN Nusantara Power, Kabupaten Tapanuli Tengah, Sumatera Utara. Pengumpulan data lapangan berlangsung selama periode pelaksanaan Kerja Praktek Industri yaitu 1 Januari – 31 Januari 2025.

3. Populasi dan Sampel Penelitian

Objek penelitian adalah sistem eksitasi statis pada Generator Sinkron Unit 2 berkapasitas 17 MW.

Sampel data yang dianalisis mencakup:

- Arus eksitasi (I_f)
- Tegangan eksitasi (V_f)
- Tegangan terminal generator (V_t)
- Daya aktif (MW)
- Daya reaktif (MVAR)
- Frekuensi (Hz)

Seluruh parameter diambil berdasarkan kondisi operasi aktual dari Control Room (CCR).

4. Teknik dan Instrumen Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui:

1. Observasi Lapangan
Meliputi inspeksi komponen eksitasi, pemantauan visual panel eksitasi, serta wawancara teknis dengan operator dan pemeliharaan.
2. Pencatatan Parameter Operasi
Data numerik (arus eksitasi, tegangan eksitasi, daya, tegangan terminal) diperoleh dari panel monitoring generator dan sistem SCADA.
3. Dokumentasi Teknis
Foto peralatan, single line diagram eksitasi, dan catatan maintenance rutin digunakan sebagai pendukung analisis.

Instrumen yang digunakan meliputi panel meter, display SCADA, dan logsheet harian operasi unit.

5. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif yang meliputi:

- Mendeskripsikan pola perubahan arus eksitasi terhadap perubahan daya aktif dan reaktif.
- Menganalisis kemampuan AVR dalam mempertahankan tegangan terminal pada 11 kV \pm batas standar operasi.
- Membandingkan data operasi aktual dengan teori eksitasi generator sinkron (karakteristik If-Vt, If-P, dan If-Q).
- Menilai kestabilan sistem eksitasi dari fluktuasi parameter selama operasi normal.

Analisis grafik digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antar variabel. Interpretasi dilakukan berdasarkan konsep dasar sistem eksitasi dan standar operasi pembangkit.

6. Model Penelitian

Model analisis mengacu pada hubungan matematis dasar generator sinkron:

$$E_A = V_T + jX_s I_a + R_a I_a$$

Serta prinsip pengaturan AVR melalui pengendalian sudut penyalan thyristor pada rectifier. Model ini digunakan untuk membahas bagaimana perubahan beban mempengaruhi arus eksitasi dan tegangan terminal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah penulisan Hasil dan Pembahasan yang diperluas dan lebih rinci berdasarkan data dan konteks penelitian pada *Analisis Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron 11 kV Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas* (data sumber: file jurnal).

1. Waktu dan Lokasi Pengamatan

- Lokasi: Unit 2, ULPLTA Sipansihaporas, Kabupaten Tapanuli Tengah, Sumatera Utara (di bawah pengelolaan PT PLN Nusantara Power).
- Periode Pengumpulan Data: selama kegiatan Kerja Praktek Industri, 1 Januari – 31 Januari 2025. Data operasional yang dianalisis diambil dari monitoring CCR pada periode tersebut.

2. Data Pengamatan (rekap dan tabel)

Data operasional yang dipakai pada analisis inti diperoleh dari panel monitoring/SCADA CCR. Rekap data utama yang digunakan untuk analisis korelasi dan kestabilan adalah sebagai berikut (nilai pada contoh tabel diambil dari rekap harian yang tercantum dalam jurnal):

Waktu (WIB)	Arus Eksitasi If (A)	Tegangan Eksitasi Vf (V)	Tegangan Terminal Vt (kV)	Daya Aktif P (MW)	Daya Reaktif Q (MVAR)	Frekuensi (Hz)
09:00	520	58	11.40	13.5	2.8	50.0
12:00	520	58	11.38	15.2	3.1	50.1
15:00	520	58	11.41	16.9	3.4	49.9
18:00	520	58	11.39	17.0	3.6	50.0

(Sumber data: observasi lapangan dan CCR selama Januari 2025).

3. Statistik ringkas dan parameter turunan

Berdasarkan tabel di atas dihitung beberapa statistik ringkas dan parameter turunan penting untuk menilai kinerja eksitasi:

- Rata-rata arus eksitasi, If_mean = 520 A (konstan pada semua pengamatan).

- Rata-rata tegangan terminal, $V_t_mean = 11.395$ kV; simpangan baku $V_t_std \approx 0.0112$ kV (≈ 11.2 V) menunjukkan variasi sangat kecil.
- Rata-rata daya aktif, $P_mean \approx 15.65$ MW; rata-rata daya reaktif, $Q_mean \approx 3.225$ MVAR.
- Faktor daya (power factor) dihitung tiap pengamatan:
 - 09:00 $\rightarrow PF \approx 0.9792$
 - 12:00 $\rightarrow PF \approx 0.9798$
 - 15:00 $\rightarrow PF \approx 0.9804$
 - 18:00 $\rightarrow PF \approx 0.9783$($PF = P / \sqrt{(P^2 + Q^2)}$).
- Frekuensi: $f_{req_mean} = 50.0$ Hz, simpangan baku ≈ 0.0707 Hz (nilai dalam rentang 50 ± 0.1 Hz).

Interpretasi numerik ini memperlihatkan kestabilan tinggi pada tegangan terminal, arus/tegangan eksitasi, frekuensi, dan faktor daya mendekati 0.98—semua mengindikasikan operasi normal dan kontrol yang efektif oleh AVR. (Perhitungan berdasarkan data CCR).

4. Analisis dan Pembahasan

4.1. Kestabilan arus dan tegangan eksitasi

- Data menunjukkan $I_f = 520$ A dan $V_f = 58$ V stabil pada semua waktu pengamatan. Stabilitas I_f/V_f ini menandakan bahwa AVR dan rangkaian penyearah (thyristor controlled rectifier) mampu mempertahankan suplai eksitasi konstan meskipun ada perubahan beban aktif/reactive.
- Karena arus eksitasi tidak berubah, peningkatan P dari 13.5 MW ke 17.0 MW tidak diikuti oleh kenaikan besar I_f . Ini menunjukkan bahwa pada rentang beban tersebut AVR menjaga tegangan terminal dominan melalui pengaturan sudut penyalan thyristor sehingga V_t tetap di dalam batas toleransi.

4.2. Kemampuan AVR mempertahankan tegangan terminal

- Tegangan terminal berada di kisaran 11.38 – 11.41 kV (rata-rata 11.395 kV) dengan simpangan baku sangat kecil (~ 11 V). Ini lebih baik daripada batas toleransi PLN $\pm 5\%$ dari nominal (± 0.55 kV untuk 11 kV nominal). Oleh karena itu AVR bekerja secara efektif.
- Penjelasan teknis: ketika beban bertambah (P naik), reaksi jangkar dan perubahan sudut daya menyebabkan kecenderungan turunnya V_t . AVR mendeteksi deviasi V_t melalui potential transformer (PT) dan menyesuaikan firing angle thyristor sehingga arus eksitasi yang dihasilkan rectifier memadai untuk mengimbangi perubahan tersebut. Hasil pengamatan menunjukkan kontrol ini berhasil mempertahankan V_t .

4.3. Hubungan arus eksitasi, daya reaktif, dan faktor daya

- Daya reaktif Q meningkat dari 2.8 menjadi 3.6 MVAR seiring kenaikan P . Ini normal karena pada beban nyata ada komposisi reaktif yang bertambah seiring peningkatan keluaran mesin.
- Faktor daya tetap tinggi (≈ 0.98), artinya generator menyuplai sebagian kecil reaktif relatif terhadap aktif. Konsekuensinya beban tampak hampir resistif/lagging ringan kondisi baik untuk kestabilan tegangan.
- Interpretasi: karena I_f tidak naik, kenaikan Q lebih kecil proporsinya terhadap P : AVR berhasil menyeimbangkan kebutuhan V_t tanpa perlu menambah I_f secara berarti pada batas operasi yang diamati.

4.4. Kestabilan frekuensi dan sinkronisasi

- Frekuensi tercatat stabil di 50 ± 0.1 Hz, menunjukkan unit tetap ter-sinkron dengan jaringan interkoneksi Sumatera. Kontrol turbin dan governor bekerja sesuai sehingga perubahan beban yang relatif kecil tidak menyebabkan deviasi frekuensi signifikan.

4.5. Evaluasi performa dinamis (kualitatif)

- Data yang digunakan berasal dari kondisi operasi steady/normal pada interval beberapa jam. Dalam rentang ini, tidak terjadi transien besar (mis. gangguan mendadak, trip, atau beban step besar). Oleh karena itu, kesimpulan mengenai *respon dinamis* AVR terhadap gangguan besar belum dapat ditarik dari dataset ini. Penilaian lebih mendalam memerlukan pengukuran transien (sampling lebih cepat) atau simulasi transien (ETAP/Matlab Simulink) seperti disarankan dalam bagian saran jurnal.

5. Diskusi terhadap kemungkinan penyebab variasi kecil dan rekomendasi

Penyebab variasi kecil (observasi)

1. Presisi pengukuran SCADA/panel meter simpangan kecil V_t dapat berasal dari resolusi alat ukur (mis. pembulatan tampilan).
2. Fluktuasi beban lokal perubahan cepat beban pengguna akhir menyebabkan Q naik sedikit; AVR merespons sehingga I_f tetap tampak konstan secara bulat.
3. Setting AVR (droop, band) parameter pengaturan AVR seperti bandwidth toleransi dan karakteristik kontrol dapat membuat I_f terjaga konstan selama deviasi kecil pada V_t .

Rekomendasi teknis

1. Rekam data dengan sampling lebih cepat (contoh: 1 Hz atau lebih tinggi) untuk melihat profil transien dan waktu respon AVR terhadap step load atau gangguan singkat.
2. Uji transien/simulasi menggunakan ETAP atau MATLAB/Simulink untuk menilai respon saat gangguan (fault, besar step load) membantu desain proteksi dan optimasi parameter AVR.
3. Kalibrasi dan verifikasi instrumen jika diperlukan, untuk memastikan resolusi dan akurasi pembacaan I_f , V_f , V_t , P , Q .
4. Pemantauan kontinu dan penerapan condition-based maintenance: pantau harmonisa, temperatur transformer eksitasi, dan parameter thyristor untuk deteksi dini degradasi komponen.

6. Keterbatasan Hasil

- Dataset yang dianalisis berasal dari pengamatan steady-state (beberapa titik waktu) sehingga hasil hanya mewakili kondisi operasi normal di bulan pengamatan; tidak menggantikan studi transien.
- Tidak ada informasi detail tentang konfigurasi pengukuran (tingkat sampling SCADA, akurasi sensor) dalam data yang disajikan hal ini membatasi analisis statistik lanjutan.

7. Ringkasan Temuan Penting

1. I_f dan V_f stabil pada 520 A dan 58 V pada semua titik pengamatan menandakan AVR dan sistem eksitasi bekerja stabil.
2. V_t stabil di 11.38–11.41 kV (rata-rata 11.395 kV) dengan variasi sangat kecil ($\pm \approx 0.01$ kV).
3. Frekuensi stabil di sekitar $50 \text{ Hz} \pm 0.1 \text{ Hz} \rightarrow$ sinkronisasi jaringan terjaga.
4. Power factor tinggi (≈ 0.98) \rightarrow performa penerimaan beban dan penyaluran daya reaktif dalam batas wajar.

5. Disarankan melakukan analisis transien/simulasi serta pengambilan data dengan sampling lebih tinggi untuk menilai perilaku sistem eksitasi saat gangguan besar.
- Menambahkan grafik (V_t vs waktu, P & Q vs waktu, PF vs waktu) dari data yang ada, atau
- Menyusun versi ringkas untuk dimasukkan langsung ke naskah (sesuai kebutuhan jurnal atau laporan praktikum).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian mengenai analisis sistem eksitasi pada generator sinkron 11 kV Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas menunjukkan bahwa sistem eksitasi berperan efektif dalam menjaga kestabilan tegangan terminal generator terhadap perubahan beban. Berdasarkan hasil pengamatan dan evaluasi performa sistem, Automatic Voltage Regulator (AVR) mampu merespons perubahan kondisi operasi secara cepat dan akurat melalui pengaturan arus eksitasi menggunakan kontrol sudut penyalan thyristor. Dengan demikian, sistem eksitasi yang diterapkan terbukti mampu mempertahankan kualitas tegangan pada batas nominal operasi dan mendukung keandalan unit pembangkit dalam menjaga kontinuitas suplai daya. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan data operasi lapangan tanpa dilengkapi pengujian komparatif melalui simulasi software analisis sistem tenaga. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis transien secara komprehensif menggunakan perangkat simulasi seperti ETAP untuk mengevaluasi respon dinamis sistem eksitasi pada kondisi gangguan yang lebih kompleks, serta mengkaji potensi optimasi pengaturan AVR untuk peningkatan stabilitas sistem tenaga.

DAFTAR REFERENSI

- Al Furqon, F. M. C. (2024). PENGARUH PERUBAHAN BEBAN GENERATOR SINKRON TERHADAP SISTEM EKSITASI STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UPK PLTA MANINJAU: PENGARUH PERUBAHAN BEBAN GENERATOR SINKRON TERHADAP SISTEM EKSITASI STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UPK PLTA MANINJAU. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy (IJEERE)*, 4(2), 91-98.
- Amalia, D., Radiah, R., & Suprihardi, S. (2022). ANALISA PERUBAHAN BEBAN TERHADAP TEGANGAN PADA GENERATOR TURBIN GAS/GTG 15 MW (GI-7001) MENGGUNAKAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) BERBASIS MATLAB. *Jurnal TEKTRONIKA*, 6(2), 211-217.
- Hasad, A. STRUKTUR, KARAKTERISTIK DAN APLIKASI THYRISTOR.
- Hutajulu, A. G., & Yosia, R. (2024). Pengaturan Automatic Voltage Regulator untuk Kestabilan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Menggunakan Mathlab. *Jurnal Teknologi*, 12(1), 1-7.
- Monicasari, C., Mashar, A., & Rahardjo, A. (2023). RANCANGAN BRUSHLESS EXCITER GENERATOR SINKRON KAPASITAS DAYA 314 MW. *Jurnal Teknik Energi*, 12(2), 33-39.

- Palit, A., Mangindaan, G., & Tulung, N. (2024). Analisa Pengaruh Arus Eksitasi terhadap Daya Reaktif Generator: Analysis The Effect of Excitation Current on Generator Reactive Power. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 13(02), 63-72.
- Sindang, K. C., Mukhlis, B., Arifin, Y., & Masarrang, M. (2022). Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Eksitasi Generator Sinkron Sf 33.065 PadaPembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Poso 1 Energy. In Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) (Vol. 8, No. 1, pp. 393-397).
- Sitanggang, S. F., Munthe, M. W., & Napitupulu, J. (2024). STUDI ANALISA SISTEM EKSITASI GENERATOR PADA PLTG PAYA PASIR DI PT PLN (PERSERO). *JURNAL TEKNOLOGI ENERGI UDA: JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 13(1), 32-38.
- Wijaya, A. K., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2022). Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. *TRANSISTOR Elektro dan Informatika*, 4(1), 43-48.
- Zulhakim, A., Handayani, Y. S., & Priyadi, I. (2023). Pengaruh Sistem Eksitasi Terhadap Generator Sinkron Tiga Fasa Di Unit 1 PT. PLN Indonesia Power ULPL TA Musi. *Teknosia*, 17(1), 1-12.