



Analisis Operasional Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron 200 MW di UBP Pangkalan Susu

Firmansyah Putra

Universitas Negeri Medan

Ferdana Saleh Siregar

Universitas Negeri Medan

Abram Jonathan Sitorus

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: firman.5223530007@mhs.unimed.ac.id

Abstract. *This study was conducted to comprehensively analyze the operational behavior of the excitation system on a 200 MW Synchronous Generator Unit 2 at PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu, aiming to address the lack of studies based on actual field data in large power generation units. The objective is to examine the relationship between excitation current with active power, reactive power, and terminal voltage, and to evaluate the performance of the Automatic Voltage Regulator (AVR). The research method employs a descriptive approach using actual operational data collected from Unit 2, including field observations and documentation of i_f , P , Q , S and V_t data. The results show that the static excitation system used, with the digital AVR GEC-300 control, operates with high stability. The AVR is proven capable of maintaining the terminal voltage at its nominal value 15.74-15.75 kV with very minimal fluctuations ± 0.01 kV under varying load conditions. A strong and sensitive correlation was found between and Reactive Power, and a positive trend with Active Power, consistent with synchronous generator theory. The conclusion is that the excitation system functions effectively, reliably, and positively contributes to the stability of the power system.*

Keywords: *Automatic Voltage Regulator (AVR), Excitation System, Reactive Power, Synchronous Generator, Static Excitation System.*

Abstrak. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara komprehensif perilaku operasional sistem eksitasi pada Unit 2 Generator Sinkron 200 MW di PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu, yang bertujuan untuk mengatasi kurangnya penelitian berdasarkan data lapangan aktual di unit pembangkit listrik besar. Tujuannya adalah untuk memeriksa hubungan antara arus eksitasi dengan daya aktif, daya reaktif, dan tegangan terminal, dan untuk mengevaluasi kinerja Regulator Tegangan Otomatis (AVR). Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif dengan menggunakan data operasional aktual yang dikumpulkan dari Unit 2, termasuk pengamatan lapangan dan dokumentasi data i_f , P , Q , S dan V_t . Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem eksitasi statis yang digunakan, dengan kontrol AVR GEC-300 digital, beroperasi dengan stabilitas tinggi. AVR terbukti mampu mempertahankan tegangan terminal pada nilai nominalnya 15,74-15,75 kV dengan fluktuasi yang sangat minimal ± 0.01 kV dalam berbagai kondisi beban. Korelasi yang kuat dan sensitif ditemukan antara dan Daya Reaktif, dan tren positif dengan Daya Aktif, konsisten dengan teori generator sinkron. Kesimpulannya adalah sistem eksitasi berfungsi secara efektif, andal, dan memberikan kontribusi positif terhadap stabilitas sistem tenaga listrik.

Kata kunci: *Automatic Voltage Regulator (AVR), Daya Reaktif, Generator Sinkron, Sistem Eksitasi, Sistem Eksitasi Statis.*

LATAR BELAKANG

Sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu penopang utama penyediaan energi listrik di Indonesia, khususnya pada sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara. Keandalan operasi pembangkit menjadi aspek strategis untuk menjaga kontinuitas suplai energi,

terutama pada unit pembangkit berskala besar seperti PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu yang mengoperasikan empat unit generator sinkron berkapasitas masing-masing 200 MW. Dalam sistem pembangkit konvensional, generator sinkron berfungsi sebagai komponen utama yang bertugas mengonversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Kestabilan keluaran generator sangat dipengaruhi oleh sistem eksitasi, yaitu mekanisme pengaturan arus medan rotor untuk menjaga tegangan terminal tetap berada pada nilai nominal meskipun terjadi fluktuasi beban.

Berbagai studi menekankan bahwa sistem eksitasi modern memiliki peran penting dalam meningkatkan stabilitas tegangan, respon dinamis generator, kemampuan pengaturan daya reaktif, serta kinerja sinkronisasi pada jaringan interkoneksi. Sistem eksitasi yang umum digunakan di pembangkit berskala besar saat ini ialah tipe statis berbasis thyristor dengan pengendalian penuh melalui *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

Beberapa penelitian sebelumnya mengkaji performa AVR dalam menjaga profil tegangan terhadap perubahan beban, pengaruh variasi arus eksitasi terhadap daya aktif dan reaktif, serta peranan eksitasi dalam meningkatkan stabilitas transien generator. Lebih lanjut, Ahmad (2020) menunjukkan bahwa sistem eksitasi statis mampu memberikan respon dinamis yang cepat terhadap gangguan dan perubahan beban melalui pengaturan arus medan yang lebih presisi, sehingga stabilitas tegangan dapat dipertahankan secara lebih efektif dibandingkan sistem eksitasi konvensional.

Temuan tersebut menguatkan pentingnya evaluasi eksitasi pada unit pembangkit besar, khususnya ketika beroperasi dalam kondisi beban yang fluktuatif. Namun, sebagian besar kajian yang tersedia masih berfokus pada model matematis atau simulasi sistem eksitasi, sedangkan kajian berbasis data operasional aktual pada generator berkapasitas besar masih relatif terbatas, khususnya pada unit 200 MW di lingkungan pembangkit PLN Indonesia Power.

Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (gap) berupa minimnya studi yang mendokumentasikan dan menganalisis perilaku sistem eksitasi berbasis data lapangan pada generator sinkron besar di PLTU. Selain itu, karakteristik eksitasi pada unit besar memiliki dinamika yang berbeda dibandingkan generator kapasitas menengah, baik dari sisi pembebanan, respon eksitasi, maupun koordinasi antarperalatan seperti rectifier cubicle, field discharge system, dan AVR. Keterbatasan kajian berbasis data operasi nyata ini menjadi urgensi penting, terutama untuk mendukung peningkatan keandalan pembangkit, meminimalkan risiko gangguan tegangan, serta meningkatkan pemahaman teknis operator terhadap pola eksitasi yang terjadi di lapangan.

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengkaji secara komprehensif sistem eksitasi pada generator sinkron 200 MW di PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu berdasarkan data operasional aktual. Analisis difokuskan pada karakteristik hubungan antara arus eksitasi dengan daya aktif, daya reaktif, dan tegangan keluaran; kinerja AVR dalam menjaga kestabilan tegangan; serta identifikasi perilaku dinamis eksitasi dalam kondisi beban yang bervariasi. Melalui analisis tersebut, diharapkan diperoleh gambaran teknis yang lebih mendalam mengenai operasional eksitasi pada unit pembangkit besar, sehingga dapat menjadi referensi bagi peningkatan operasi, pemeliharaan, dan pengambilan keputusan teknis di lingkungan pembangkit.

KAJIAN TEORITIS

1. Generator Sinkron

Generator berfungsi sebagai konverter energi yang mentransformasikan energi mekanik dari poros putar menjadi energi listrik. Berdasarkan jenis arus keluarannya, mesin ini diklasifikasikan menjadi generator AC (*Alternating Current*) dan DC (*Direct Current*). Secara spesifik, generator sinkron didefinisikan sebagai mesin listrik yang memproduksi energi listrik dari sumber mekanikal berbasis induksi elektromagnetik (Sindang, 2022). Karakteristik utama mesin ini adalah kecepatan putaran medan magnet stator yang selaras (sinkron) dengan kecepatan putaran rotor.

Generator sinkron memegang peranan vital dalam infrastruktur pembangkit listrik berkapasitas besar seperti PLTG dan PLTU untuk menjaga stabilitas sistem saat menghadapi fluktuasi beban puncak. Peningkatan kapasitas daya dilakukan melalui mekanisme sinkronisasi,

yakni pengoperasian paralel beberapa generator. Proses ini mensyaratkan kesetaraan parameter tegangan, frekuensi, dan sudut fasa antar unit pembangkit.

a) Prinsip Kerja Generator

Mekanisme pembangkitan listrik diawali dengan injeksi arus DC pada kumparan medan (rotor) melalui sistem eksitasi. Hal ini menghasilkan fluks magnetik yang nilainya konstan terhadap waktu (Deny Satrio, 2022). Rotor yang terkopel dengan penggerak mula akan berputar pada kecepatan nominalnya, sehingga menciptakan medan magnet putar.

Kecepatan putar rotor (n) ditentukan oleh frekuensi (f) dan jumlah kutub (p), sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1):

Dimana:

$$\frac{120 \times f}{n = \frac{p}{\dots\dots\dots}} \quad (1)$$

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub rotor

f = Frekuensi (Hz)

=

Medan putar tersebut menginduksi kumparan jangkar pada stator dan menghasilkan fluks magnetik yang bervariasi terhadap waktu. Sesuai hukum Faraday, perubahan fluks ini membangkitkan Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi. Formulasi matematis GGL induksi ditunjukkan pada Persamaan (2):

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

e : ggl induksi

$-N$: Jumlah lilitan

$d\Phi$: Perubahan fluks magnet

dt : Perubahan waktu

b) Konstruksi Generator

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

1. Stator

Stator berfungsi sebagai tempat pembangkitan tegangan induksi. Komponen ini meliputi:

- Rangka Stator: Struktur penyangga berbahan plat baja.
- Inti Stator: Media aliran fluks magnetik yang tersusun atas laminasi baja. Laminasi ini bertujuan memitigasi rugi-rugi arus pusar (*eddy current*) yang berpotensi memicu panas berlebih pada isolasi.
- Kumparan Jangkar: Konduktor tempat terbentuknya GGL induksi yang umumnya terhubung dalam konfigurasi bintang (Y) atau delta (Δ).

2. Rotor

Rotor merupakan komponen berputar yang memuat kumparan medan. Elemen pendukung rotor mencakup cooling fan untuk manajemen termal, slip ring dan brush sebagai terminal arus eksitasi DC, serta bearing untuk menumpu poros (shaft). Berdasarkan topologi kutubnya, rotor dibedakan menjadi:

- *Salient Pole* (Kutub Menonjol): Memiliki diameter besar dengan poros pendek. Tipe ini diaplikasikan pada putaran rendah hingga sedang (120-400 rpm) seperti pada pembangkit tenaga diesel atau air.
- *Non-Salient Pole* (Kutub Silinder): Memiliki konstruksi silinder rata dengan diameter kecil dan poros panjang. Desain ini memberikan keseimbangan mekanis superior sehingga ideal untuk putaran tinggi (>1500 rpm), serta menghasilkan gelombang sinus dengan distorsi harmonisa yang rendah.

c) Analisis Karakteristik Operasional

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 (E_A):

$$V_T = E_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

2. Kondisi Berbeban

Saat generator melayani beban, arus beban (I_L) yang mengalir pada kumparan jangkar memicu reaksi jangkar. Fenomena ini menyebabkan deviasi nilai E_A terhadap V_T . 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):

$$E_A = V_T + I_L \times Z \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dengan mensubstitusi komponen reaktansi sinkron persamaan tegangan menjadi:

$$E_A = V_T + j X_a I_a + j X_L I_a + R_a I_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

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 keluaran generator dan mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (*Infinite bus*) (Handayani et al., 2023).

Stabilitas tegangan generator sangat bergantung pada respon sistem eksitasi terhadap perubahan parameter operasional. Apabila tegangan terminal turun akibat penambahan beban induktif, sistem eksitasi harus segera meningkatkan arus medan untuk mengkompensasi kerugian tegangan tersebut. Sebaliknya, arus medan harus diturunkan saat terjadi pelepasan beban untuk mencegah lonjakan tegangan berlebih (*over-voltage*). 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

Secara struktural, sistem eksitasi tersusun atas beberapa subsistem utama yang bekerja secara terintegrasi:

- Sumber Daya Eksitasi (*Exciter*): Unit ini bertindak sebagai pemasok daya listrik DC ke kumparan medan rotor generator utama. Sumber daya menggunakan *rectifier* (*thyristor*) karena sumber tegangan yang dibutuhkan untuk sistem eksitasi adalah tegangan DC (Hardiansyah, J).
- Regulator Tegangan Otomatis (*Automatic Voltage Regulator / AVR*): AVR berfungsi sebagai otak pengendalian yang memonitor tegangan terminal generator secara kontinu. Perangkat ini memproses sinyal kesalahan (*error signal*) dari perbandingan tegangan aktual dengan tegangan referensi, kemudian memerintahkan *exciter* untuk menyesuaikan besaran arus medan.
- Penyearah (*Rectifier*): Komponen elektronika daya yang bertugas mengonversi arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) sebelum diinjeksikan ke rotor.

2. Klasifikasi Sistem Eksitasi

Berdasarkan metode penyaluran arus ke rotor, sistem eksitasi diklasifikasikan menjadi dua kategori utama:

- a. Sistem Eksitasi Statis (Menggunakan Sikat) Pada topologi ini, arus eksitasi disuplai dari luar generator melalui mekanisme cincin seret (*slip ring*) dan sikat arang (*carbon brush*). Sumber daya DC umumnya diperoleh dari *transformer* yang disearahkan menggunakan *Thyristor* atau SCR (*Silicon Controlled Rectifier*). Keunggulan sistem ini terletak pada respon transient yang cepat, namun memerlukan pemeliharaan rutin akibat gesekan mekanis pada sikat arang.
- b. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*) Sistem ini mengeliminasi penggunaan sikat arang dan *slip ring* dengan menempatkan penyearah ikut berputar bersama poros rotor (*rotating diode*). Generator eksiter kecil (AC Exciter) dipasang segaris pada poros generator utama. Output AC dari eksiter langsung disearahkan oleh dioda berputar dan diumpankan ke kumparan medan generator utama.

Sistem *brushless* lebih disukai pada generator berkapasitas besar dan putaran tinggi karena reliabilitas yang tinggi serta kebutuhan perawatan yang minimal. Pembangkitan awal pada sistem ini seringkali dibantu oleh *Permanent Magnet Generator* (PMG) untuk menjamin ketersediaan daya eksitasi yang stabil tanpa bergantung pada sumber eksternal.

3. Automatic Voltage Regulator (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) adalah perangkat yang berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran generator listrik. AVR mengatur tegangan eksitasi pada rotor generator sinkron, sehingga tegangan terminal tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban atau kondisi operasi lainnya. Dengan demikian, AVR memastikan kualitas daya listrik yang dihasilkan tetap optimal dan sesuai dengan standar yang ditetapkan.

AVR bekerja dengan mengontrol aliran arus eksitasi yang masuk ke rotor generator sinkron. Sistem ini menggunakan sensor untuk memantau tegangan keluaran generator dan membandingkannya dengan nilai referensi. Jika terdapat perbedaan, AVR akan menyesuaikan arus eksitasi sehingga tegangan keluaran dapat dikembalikan ke nilai nominal. Prinsip ini mencakup kontrol otomatis yang dilakukan secara terus-menerus untuk memastikan stabilitas sistem (Hutajulu & Yosia, 2024).

4. Thyristor

Thyristor, atau lebih dikenal sebagai *Silicon Controlled Rectifier* (SCR), adalah komponen semikonduktor yang terdiri dari empat lapisan material semikonduktor yang membentuk struktur PNP. Komponen ini memiliki tiga terminal yaitu: anoda, katoda, dan *gate*. SCR berfungsi sebagai sakelar elektronik yang dapat mengendalikan aliran arus listrik dalam rangkaian daya tinggi. Ketika tegangan positif diterapkan pada anoda terhadap katoda dan sinyal pemicu diberikan ke *gate*, SCR akan beralih ke kondisi konduksi, memungkinkan arus mengalir dari anoda ke katoda. SCR akan tetap dalam kondisi konduksi hingga arus anoda turun di bawah nilai arus penahanan (*holding current*) atau tegangan anoda- katoda menjadi nol (Hasad, 2013).

SCR beroperasi dengan prinsip pengendalian arus melalui terminal *gate*. Dalam kondisi normal, SCR berada dalam keadaan non-konduktif meskipun tegangan maju diterapkan antara

anoda dan katoda. Namun, ketika sinyal pemicu diberikan ke gate, SCR memasuki keadaan konduktif dan memungkinkan arus mengalir bebas antara anoda dan katoda. Setelah konduksi dimulai, sinyal pada *gate* tidak lagi diperlukan untuk mempertahankan kondisi ini. SCR akan kembali ke keadaan non-konduktif hanya jika arus anoda turun di bawah arus penahanan atau tegangan anoda - katoda menjadi nol.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif yang bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai karakteristik operasional sistem eksitasi pada generator sinkron 200 MW berdasarkan kondisi nyata di lapangan. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian adalah mengamati, mendokumentasikan, dan menganalisis pola kerja sistem eksitasi serta respon *Automatic Voltage Regulator* (AVR) terhadap variasi beban tanpa melakukan intervensi atau perlakuan eksperimental pada peralatan pembangkit. Seluruh analisis dilakukan menggunakan data operasional aktual yang bersumber dari Unit 2 PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu.

1. Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan secara langsung pada *Excitation Room* Unit 2 untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai konfigurasi sistem eksitasi yang digunakan pada generator sinkron 200 MW. Kegiatan observasi meliputi pengamatan terhadap kondisi fisik, susunan komponen, dan alur kerja sistem eksitasi.

Observasi difokuskan pada beberapa komponen utama, antara lain Automatic Voltage Regulator (AVR), transformator eksitasi, rectifier cubicle, dan carbon brush. Setiap komponen diamati berdasarkan fungsi, kondisi aktual, pola kerja selama operasi, serta interaksi antar perangkat dalam mengatur arus eksitasi. Selain itu, dilakukan pula pengamatan terhadap perilaku operasional generator selama proses kenaikan beban (*loading*) dan penurunan beban (*deloading*). Pada tahap ini, dicatat pola perubahan arus eksitasi, tegangan terminal, daya aktif, dan daya reaktif yang terjadi seiring dinamika beban pembangkit.

Hasil observasi ini memberikan gambaran awal mengenai bagaimana sistem eksitasi merespon perubahan beban dan bagaimana fungsi AVR bekerja dalam menjaga kestabilan tegangan terminal generator.

2. Pengumpulan Dokumentasi

Pengumpulan dokumentasi dilakukan untuk memperoleh data kuantitatif dan informasi teknis terkait sistem eksitasi generator. Data diperoleh dari operator, sistem kendali, serta dokumen teknis pembangkit.

Data utama yang dikumpulkan meliputi:

1. Data operasi generator yang terdiri atas:
 - arus eksitasi rotor (I_f),
 - daya aktif (P),
 - daya reaktif (Q),
 - tegangan terminal generator (V_t).

Data ini diambil pada rentang beban yang berbeda untuk menggambarkan secara akurat hubungan antara eksitasi dan parameter operasi generator.

2. Dokumentasi teknis sistem eksitasi seperti:
 - diagram rangkaian AVR,
 - diagram rectifier cubicle,
 - diagram alur eksitasi generator,
 - kurva kesesuaian operasi (*operating characteristic*).

Dokumentasi ini digunakan untuk memahami struktur sistem, alur pengaturan eksitasi, serta batas kemampuan operasi generator selama pembebanan.

3. Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik operasional sistem eksitasi serta mengevaluasi fungsi AVR dalam menjaga profil tegangan generator. Analisis dilakukan

secara deskriptif dengan menampilkan hubungan antar variabel operasional berdasarkan data aktual yang diperoleh.

Tahapan analisis meliputi:

a. Analisis Hubungan Arus Eksitasi dengan Parameter Operasi Generator

Data arus eksitasi (I_f) dianalisis hubungannya terhadap:

- Daya aktif (P): untuk melihat kecenderungan perubahan eksitasi selama variasi pasokan daya aktif, meskipun secara teori eksitasi lebih dominan mempengaruhi daya reaktif.
- Daya reaktif (Q): untuk menunjukkan peranan utama eksitasi dalam pengaturan daya reaktif dan stabilitas tegangan.
- Tegangan terminal (V_t): untuk mengidentifikasi efektivitas AVR dalam mempertahankan tegangan nominal saat terjadi perubahan beban.

Analisis dilakukan dengan mengamati tren, grafik perubahan, serta stabilitas parameter terhadap perubahan beban. Rumus dasar yang digunakan untuk mendukung analisis meliputi:

1. Daya aktif generator sinkron

$$P = \sqrt{3} V_t I \cos \phi$$

2. Daya reaktif generator sinkron

$$Q = \sqrt{3} V_t I \sin \phi$$

3. Hubungan eksitasi terhadap tegangan terminal

Secara umum dinyatakan sebagai:

$$V_t \propto E_f - X_s I$$

di mana:

- E_f = gaya gerak listrik (GGL) yang dipengaruhi arus eksitasi rotor,
- X_s = reaktansi sinkron generator.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan eksitasi akan meningkatkan E_f , yang pada akhirnya meningkatkan tegangan terminal V_t .

b. Evaluasi Fungsi Sistem Eksitasi dan AVR

Evaluasi dilakukan terhadap:

- kestabilan tegangan terminal selama proses perubahan beban,
- respon eksitasi terhadap kenaikan/penurunan beban,
- kemampuan AVR mengoreksi deviasi tegangan,
- kesesuaian perilaku eksitasi dengan karakterisasi teoretis generator sinkron,
- konsistensi eksitasi dengan kurva kemampuan operasi (capability curve).

Penilaian ini bersifat kualitatif-kuantitatif dengan membandingkan data aktual terhadap teori, diagram kemampuan generator, serta referensi penelitian lain seperti yang diuraikan dalam kajian teoritis.

c. Batasan Analisis

Penelitian ini tidak menggunakan model matematis lanjutan, simulasi numerik, atau perhitungan kontrol modern. Hal ini karena tujuan penelitian adalah menilai karakteristik eksitasi berdasarkan data lapangan nyata, sehingga analisis lebih berfokus pada interpretasi operasional dan hubungan antarparameter dari data dokumentasi pembangkit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Komponen Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi pada Generator Sinkron 200 MW Unit 2 PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu menggunakan konfigurasi *static excitation system* dengan sumber eksitasi berasal dari tegangan keluaran generator (*self-excitation*). Sistem ini dirancang untuk memberikan respons cepat terhadap perubahan beban dan menjaga kestabilan tegangan terminal melalui pengaturan arus medan (I_f).

Komponen-komponen utama yang diamati selama penelitian meliputi:

1.1 Excitation Transformer

Transformator eksitasi menurunkan tegangan AC tiga fasa dari terminal generator ke level yang sesuai untuk masuk ke rangkaian penyearah. Transformator ini memiliki peran kritis karena

kestabilan tegangan sekundernya menentukan kualitas tegangan DC yang dihasilkan oleh sistem penyearah.

Transformator dilengkapi dengan proteksi seperti *over-temperature sensor*, *differential protection*, dan *buchholz relay* yang memastikan sistem bekerja dalam kondisi aman. Pembebanan transformator selama pengujian menunjukkan tidak adanya gejala kelebihan arus atau kenaikan temperatur yang signifikan.

1.2 GEC-300 AVR Cubicle

AVR GEC-300 merupakan sistem kontrol digital yang mengatur sudut penyalan SCR pada Rectifier Cubicle. AVR dibekali dengan:

- *Dual-channel redundant control system*
- *Automatic/Manual mode switching*
- *Voltage matching* dan *soft-start excitation*
- Proteksi *over-excitation*, *under-excitation*, *V/Hz limiter*, dan *loss-of-sensing protection*



Gambar 1. Layout Excitation Room



Gambar 2. AVR GEC-300

Selama pengamatan, AVR menunjukkan kestabilan operasi dengan fluktuasi tegangan terminal berada dalam rentang ± 0.01 kV, yang menunjukkan kemampuan regulasi tegangan yang sangat baik untuk generator dengan kapasitas sebesar 200 MW.

1.3 Rectifier Cubicle (GEKL 1st, 2nd, 3rd)

Rectifier Cubicle terdiri dari tiga panel penyearah SCR yang bekerja secara paralel dengan sistem berbagi arus otomatis (*current sharing*). Ketiga unit ini berfungsi menghasilkan tegangan DC untuk menyuplai rotor generator.

Beberapa parameter penting yang diamati:

- *Firing angle* SCR mengikuti perintah AVR secara presisi
- *Ripple factor* tegangan DC berada pada batas yang diperbolehkan

- Beban arus eksitasi terbagi merata pada ketiga cubicle (tidak ditemukan unbalance arus)

1.4 Field Discharge Cubicle



Gambar 3. Rectifier Cubicle

Cubicle ini berfungsi mengamankan rotor saat *Field Breaker* dibuka. Energi magnet yang tersisa pada rotor didisipasi melalui *field discharge resistor*, mencegah lonjakan tegangan yang dapat merusak slip ring maupun isolasi belitan rotor.

Data pengamatan menunjukkan bahwa proses *discharge* berjalan normal, ditandai dengan tidak adanya lonjakan tegangan abnormal pada panel FDC.

1.5 Carbon Brush dan Slip Ring

Karbon sikat dan slip ring menjadi jalur penghantar utama arus eksitasi menuju rotor. Kondisi brush yang baik akan menghasilkan penurunan tegangan kontak yang rendah dan meminimalkan gangguan pada suplai eksitasi.

Hasil inspeksi menunjukkan:

- Tidak terdapat sparking berlebih
- Permukaan slip ring halus
- Tingkat keausan brush masih dalam batas standar operasi

Keseluruhan komponen eksitasi berada dalam kondisi layak dan mendukung performa eksitasi yang stabil.

2. Data Operasi Generator

Data operasi generator dikumpulkan selama siklus pembebanan untuk melihat karakteristik dinamis sistem eksitasi. Parameter utama yang dianalisis meliputi:

- Arus eksitasi rotor (I_f)
- Daya aktif (MW)
- Daya reaktif (MVAR)
- Tegangan terminal (kV)

Tabel 1. Parameter Operasi Generator Unit 2

| No | Jam | Eksitasi | | Generator | | | |
|----|-------|-----------|-----------|-----------------|---------------------|------------------------|----------------|
| | | V_f (V) | I_f (A) | Daya Aktif (MW) | Daya Reaktif (MVAR) | Tegangan keluaran (kV) | Frekuensi (Hz) |
| 1 | 11.00 | 244.86 | 1169.86 | 116.31 | 57.42 | 15.74 | 50.02 |
| 2 | 12.00 | 238.45 | 1141.71 | 116.59 | 51.73 | 15.74 | 50.10 |
| 3 | 13.00 | 234.73 | 1126.14 | 112.24 | 51.30 | 15.74 | 50.13 |
| 4 | 14.00 | 243.83 | 1164.60 | 111.82 | 58.87 | 15.74 | 50.01 |
| 5 | 15.00 | 244.11 | 1166.66 | 116.24 | 57.10 | 15.74 | 50.15 |
| 6 | 16.00 | 244.57 | 1167.34 | 122.03 | 54.23 | 15.74 | 50.22 |
| 7 | 17.00 | 249.78 | 1190.46 | 129.65 | 53.78 | 15.75 | 50.17 |

Secara umum, tegangan terminal generator berada pada nilai 15.74–15.75 kV, menunjukkan bahwa AVR bekerja dalam kondisi stabil. Variasi beban aktif dan reaktif menjadi faktor yang mempengaruhi perubahan arus eksitasi.

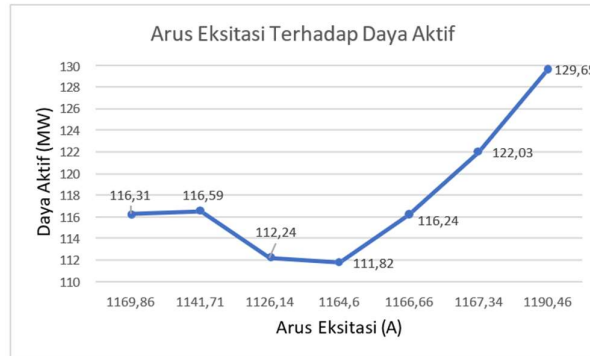
Karakteristik data memperlihatkan:

- If berkisar 1137–1234 A
- Daya aktif berkisar 116–193 MW
- Daya reaktif berada pada 51–59 MVar

Rentang nilai tersebut sesuai dengan operasi normal generator 200 MW pada mode base load.

3. Analisis Grafik Hasil Pengukuran

3.1 Arus Eksitasi vs Daya Aktif (If–P)



Gambar 4. Grafik Arus Eksitasi Terhadap Daya Aktif

Hubungan If–P menunjukkan tren positif, di mana peningkatan daya aktif cenderung meningkatkan arus eksitasi. Hal ini terjadi karena:

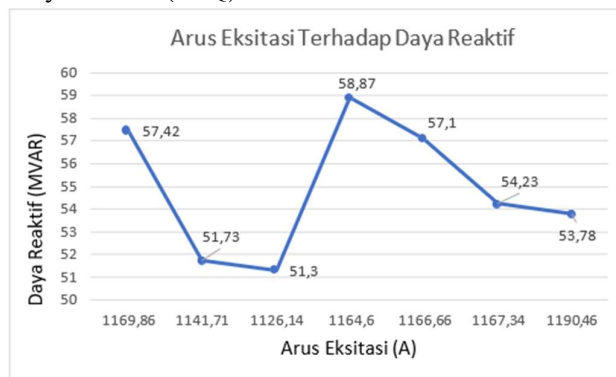
1. Kenaikan daya aktif meningkatkan arus stator
2. Arus stator menimbulkan reaksi jangkar yang melemahkan fluks utama
3. AVR meningkatkan If untuk mempertahankan GGL internal (E_f)

Namun, data juga menunjukkan beberapa titik *anomalous behavior*, seperti:

- Pada P hampir sama (± 116 MW), If bisa berbeda ± 30 A.
- Hal ini menunjukkan adanya kontribusi dari faktor lain seperti nilai $\cos \phi$ dan kondisi daya reaktif saat itu.

Fenomena ini konsisten dengan teori bahwa eksitasi tidak hanya dipengaruhi daya aktif, tetapi juga interaksi antara beban reaktif, profil tegangan, dan reaksi jangkar.

3.2 Arus Eksitasi vs Daya Reaktif (If–Q)



Gambar 5. Grafik Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif

Grafik menunjukkan korelasi kuat antara Q dan If, di mana peningkatan daya reaktif lagging menyebabkan kenaikan If dengan slope yang lebih jelas dibanding hubungan If–P.

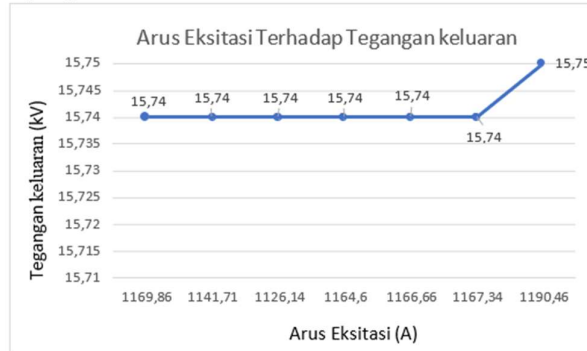
Interpretasi teknis:

- Q memiliki hubungan langsung dengan fluks magnet
- Eksitasi menjadi faktor dominan dalam pengaturan daya reaktif

- AVR mengatur I_f untuk mengompensasi perubahan tegangan akibat perubahan beban induktif/kapasitif

Pola grafik yang lebih teratur pada hubungan I_f - Q dibanding I_f - P menunjukkan bahwa eksitasi lebih sensitif terhadap daya reaktif, sebagaimana dijelaskan dalam model perhitungan kemampuan generator (*capability curve*).

3.3 Arus Eksitasi vs Tegangan Terminal (I_f - V_t)



Gambar 6. Grafik Arus Eksitasi Terhadap Tegangan keluaran

Tegangan terminal relatif konstan meskipun I_f berubah. Hal ini mencerminkan kinerja AVR yang efektif.

Temuan penting:

- AVR menjaga V_t pada interval ± 0.01 kV
- Perubahan I_f lebih disebabkan perubahan P dan Q , bukan karena koreksi tegangan
- Efektivitas *closed-loop control* AVR terbukti dari stabilitas tegangan terminal

Stabilitas tegangan ini merupakan indikator penting keandalan sistem eksitasi, karena generator 200 MW sangat sensitif terhadap variasi tegangan terminal dalam jaringan interkoneksi besar.

4. Evaluasi Operasional Sistem Eksitasi

Evaluasi dilakukan berdasarkan pengamatan fisik, analisis data operasi, dan kecocokan antara teori dengan perilaku aktual Unit 2. Temuan utama adalah sebagai berikut:

4.1 Kinerja AVR Sangat Stabil

AVR menunjukkan:

- Regulasi tegangan presisi tinggi
- Tidak ada indikasi *hunting* atau ketidakstabilan feedback
- Sistem *redundant channel* bekerja normal

Hal ini menjadi indikator bahwa instrumen kontrol masih dalam kondisi optimal.

4.2 Arus Eksitasi Meningkat Sesuai Beban

Kenaikan I_f sejalan dengan kebutuhan magnetisasi rotor saat:

- Daya aktif meningkat
- Daya reaktif lagging naik
- Generator mendekati batas *capability curve*

Respons eksitasi ini konsisten dengan teori mesin sinkron.

4.3 Respons Eksitasi Cepat dan Linear

Kenaikan I_f terjadi dalam hitungan detik setelah perubahan beban terdeteksi oleh AVR. Hal ini menunjukkan:

- SCR bekerja dengan *firing angle* yang presisi
- Waktu respons sistem eksitasi masih sesuai standar IEEE untuk generator besar

4.4 Komponen Fisik dalam Kondisi Sangat Baik

Beberapa indikator pendukung:

- Tidak ada panas berlebih pada Rectifier Cubicle
- Carbon Brush tidak menunjukkan gejala *over-wear*
- Panel eksitasi bebas dari tegangan abnormal atau indikasi kegagalan
- Field Discharge bekerja normal saat *breaker open*

4.5 Sistem Eksitasi Andal untuk Operasi 200 MW

Seluruh hasil analisis menunjukkan bahwa:

- Sistem eksitasi Unit 2 bekerja efektif dan handal
- AVR mampu menjaga tegangan terminal dan kestabilan generator
- Eksitasi memberikan kontribusi positif pada kestabilan sistem tenaga di jaringan Sumatera Bagian Utara

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem eksitasi pada Generator Sinkron 200 MW Unit 2 PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu beroperasi secara efektif dan stabil. Generator ini menggunakan konfigurasi *static excitation system* dengan komponen fisik, termasuk AVR GEC-300, *Rectifier Cubicle*, serta *Carbon Brush* dan *Slip Ring*, yang berada dalam kondisi sangat baik. Kinerja *Automatic Voltage Regulator* (AVR) terbukti sangat stabil dan presisi, mampu mempertahankan tegangan terminal generator pada nilai nominal sekitar 15.74 - 15.75 kV dengan fluktuasi minimal meskipun terjadi dinamika beban. Analisis data operasional menunjukkan bahwa arus eksitasi memiliki korelasi yang kuat dan sensitif terhadap Daya Reaktif, serta menunjukkan tren peningkatan sejalan dengan kenaikan Daya Aktif, yang konsisten dengan karakteristik teoretis mesin sinkron dan menunjukkan bahwa sistem eksitasi statis memberikan respons yang cepat terhadap perubahan beban. Secara keseluruhan, sistem eksitasi unit ini sangat andal dan mendukung kestabilan operasi generator berkapasitas besar tersebut.

DAFTAR REFERENSI

- Deny Satrio, M. (2022). Analisis Pengaruh Arus Eksitasi terhadap Tegangan Keluaran dan Daya Reaktif Generator PLTU Tanjung Jati B Unit 3 Jepara. Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- Farhan, M. (2021). Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Generator Unit 2 PLTMH Curug. *Jurnal Simetrik*, 11(1), 398-403.
- Handayani, Y. S., Juliana, A., & Priyadi, I. (2023). Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Pembebanan Pada Generator Sinkron Unit 7 di ULPLTA TES LEBONG PT PLN (PERSERO). *JURNAL AMPLIFIER: JURNAL ILMIAH BIDANG TEKNIK ELEKTRO DAN KOMPUTER*, 13(1), 40-47.
- 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), 67-75.
- Hasad, A. (2013). Struktur, karakteristik, dan aplikasi *thyristor*. Universitas Islam "45".
- Hutajulu, A. G., & Yosia, R. (2024). Pengaturan Automatic Voltage Regulator untuk Kestabilan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Menggunakan Matlab. *Jurnal Teknologi*, 12(1), 1-7.
- Sindang, K. C., Mukhlis, B., Arifin, Y., & Masarrang, M. (2022). Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Eksitasi Generator Sinkron Sf 33.065 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Poso 1 Energy. In *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI)* (Vol. 8, No. 1, pp. 393-397).