

PENGARUH KETIDAK-SEIMBANGAN DAYA REAKTIF TERHADAP KINERJA GENERATOR DI STASIUN SUMPAL MEDCO ENERGI

Yasin Ardaisi²⁶

Email Korespondensi: ardaisi.a3@gmail.com

Abstrak: Daya reaktif merupakan komponen dari daya listrik yang berfungsi untuk mengimbangi daya aktif, sehingga menjaga tegangan dan arus listrik tetap stabil. Selain itu, daya reaktif juga dapat mempengaruhi efisiensi dan performa sistem generator secara keseluruhan. Generator sinkron adalah sebuah mesin yang berfungsi mengubah energi mekanis menjadi energi listrik bolak balik pada tegangan dan frekuensi tertentu. Dengan cara memparalelkan generator satu dengan lainnya adalah cara untuk meningkatkan kapasitas selain itu, memparalelkan generator juga dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi *downtime* yang disebabkan oleh pemadaman listrik. Generator sinkron tiga fasa memiliki 2 jenis eksitasi yaitu eksitasi sendiri dan eksitasi terpisah, sistem eksitasi ini akan menentukan besarnya VAR yang akan diserap oleh generator pada saat bekerja secara paralel. Pada penelitian ini penulis mengkaji pengaruh beban reaktif pada unit generator di stasiun sumpal medco energi. Dimana pada saat 3 unit generator bekerja secara paralel dengan mode auto sahare maka salah satu unit generator 403 beban reaktif yang diserap adalah kurang lebih 49,76 % berbeda jauh dengan 2 unit yang lainnya yang hanya menyerap di kisaran 25% masing-masing. Dari perhitungan dan analisa didapat nilai eksitasi unit 403 adalah 12% dengan GGL yang dibangkitkan sebesar 451 volt, sedangkan 2 unit lainnya eksitasi yang diberikan hanya 6% dan GGL yang dibangkitkan sebesar 425 volt pada masing-masing generator. Untuk mendapatkan pembagian beban reaktif/KVAR yang seimbang maka masing-masing eksitasi unit adalah 8% dengan GGL yang dibangkitkan sebesar 434 volt.

Kata kunci: generator sinkron, alternator, eksitasi, VAR

Abstract: Reactive power is a component of electrical power that serves to balance active power, thus maintaining stable voltage and current. Furthermore, reactive power can also affect the efficiency and performance of the overall generator system. A synchronous generator is an electrical machine that functions to convert mechanical energy into alternating current energy at a certain voltage and frequency. Paralleling generators with each other is a way to increase capacity. In addition, paralleling generators can also increase operational efficiency and reduce downtime caused by power outages. Three-phase synchronous generators have two types of excitation, namely self-excitation and separate excitation. This excitation system will determine the amount of VAR that will be absorbed by the generator when working in parallel. In this study, the author examines the effect of reactive loads on generator units at the Medco Energi Sumpal station. When 3 generator units work in parallel with auto-sharing mode, one of the 403 generator units absorbs approximately 49.76% of the reactive load, which is very different from the other 2 units which only absorb around 25% each. From the calculations and analysis, the excitation value of unit 403 is 12% with a generated EMF of 451 volts, while the other 2 units only provide 6% excitation and a generated EMF of 425 volts on each generator. To obtain a balanced distribution of reactive/KVAR loads, each unit excitation is 8% with a generated EMF of 434 volts.

Keywords: synchronous generator, alternator, excitation, VAR

²⁶ Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti.

PENDAHULUAN

Daya reaktif pada sistem generator adalah penting untuk pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana sistem tenaga listrik bekerja. Daya reaktif merupakan komponen dari daya listrik yang berfungsi untuk mengimbangi daya aktif, sehingga menjaga tegangan dan arus listrik tetap stabil [1]. Daya reaktif dapat

mempengaruhi efisiensi dan performa sistem generator secara keseluruhan karena pembebanan kapasitif dapat memengaruhi efisiensi dan kinerja keseluruhan dari sistem pembangkit listrik, terutama dalam pembentukan daya reaktif yang dapat mempengaruhi putaran dan frekuensi generator sinkron secara signifikan [2]. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai peran

daya reaktif ini akan sangat penting dalam memastikan kinerja yang optimal dari sistem pembangkit listrik secara keseluruhan [2].

Pada dasarnya, dengan memahami peran daya reaktif, para Ahli listrik dapat merancang sistem tenaga listrik yang lebih efisien dan dapat diandalkan. Selain itu, pemahaman yang baik tentang daya reaktif juga penting untuk mendiagnosis masalah dan melakukan perbaikan pada generator atau sistem tenaga listrik secara tepat dan efektif. Dengan demikian, pengetahuan tentang daya reaktif tidak hanya meningkatkan kinerja sistem tenaga listrik, tetapi juga membantu dalam menghindari kerusakan dan gangguan yang dapat terjadi akibat ketidakseimbangan daya. Sebagai contoh, ketika sebuah pabrik mengalami gangguan pada generatornya yang terus menerus mati, seorang teknisi listrik yang memahami daya reaktif dapat dengan cepat mendiagnosis bahwa masalahnya terletak pada ketidakseimbangan daya reaktif. Dengan pengetahuan ini, teknisi dapat mengatur ulang pengaturan sistem untuk mengoptimalkan penggunaan daya reaktif.

Namun, terdapat kasus di mana pengetahuan tentang daya reaktif tidak memadai dalam mencegah kerusakan. Misalnya, ketika terdapat permasalahan ketidakseimbangan daya reaktif dapat menjadi lebih kompleks ketika terjadi interaksi dengan faktor-faktor lain seperti harmonisa dan fluktuasi beban. Faktor daya rendah berhubungan dengan beda fasa antara arus dan tegangan terminal beban serta berkaitan dengan kualitas harmonik atau bentuk gelombang arus yang menyimpang bentuknya. Rendahnya faktor daya pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan kerugian seperti meningkatnya arus yang menyebabkan pemanasan pada kabel [3]. Oleh karena itu, penting bagi teknisi untuk memiliki pemahaman yang mendalam tentang berbagai faktor yang dapat mempengaruhi daya reaktif dalam sistem kelistrikan. Dengan demikian, mereka dapat lebih efektif dalam mencegah kerusakan dan menjaga keandalan sistem secara keseluruhan. Selain itu, pemantauan dan pemeliharaan rutin juga sangat diperlukan untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan beroperasi dengan optimal dan mengurangi risiko terjadinya gangguan yang disebabkan oleh ketidakseimbangan daya reaktif. Ketika daya

reaktif dalam sistem kelistrikan tidak seimbang, dapat menyebabkan tekanan tambahan pada peralatan listrik dan meningkatkan risiko kebakaran atau kerusakan komponen. Oleh karena itu, teknisi harus selalu waspada terhadap perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem kelistrikan dan segera mengambil tindakan preventif atau perbaikan jika diperlukan. Dengan pemahaman yang mendalam dan pemantauan yang cermat, teknisi dapat memastikan bahwa sistem kelistrikan beroperasi dengan efisien dan aman secara optimal.

Stasiun pengumpul gas sumpal adalah bagian dari corridor block PSC (production sharing contract). Yang berlokasi 40 KM arah barat daya dari *Grissik Central Plant*, Sumatera Selatan. Dalam fungsinya stasiun pengumpul sumpal mampu memproduksi 310 MMscfd (juta standar kaki kubik per hari). Guna menjaga kontinuitas dalam produksi gas alam yang dihasilkan sumpal station membutuhkan energi listrik yang dibangkitkan dengan menggunakan 3 buah gas turbin generator (GTG) unit 403, 404 dan 405.

Dalam kondisi operasi normal stasiun sumpal menggunakan 3 unit GTG running secara paralel guna memenuhi kebutuhan asupan daya listrik penunjang operasi dalam menjalankan produksi gas alam. Jumlah kisaran beban normal pada siang hari sekitar 1900 kWatt dan pada malam hari sekitar 2095 kWatt. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut stasiun sumpal menjalankan 3 unit gas turbin generator secara bersamaan dan paralel dengan metode pembagian beban ini mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing, dimana penentuan pilihan untuk melakukan pembagian beban menjadi tanggung jawab petugas operator.

Pembagian beban secara paralel memungkinkan stasiun sumpal untuk tetap beroperasi dengan lancar saat salah satu unit mengalami gangguan atau kegagalan. Namun, kelebihan ini juga dapat menjadi kelemahan jika tidak dilakukan dengan tepat, karena dapat mengakibatkan overload pada unit yang masih beroperasi. Oleh karena itu, pemilihan metode pembagian beban yang tepat sangat penting untuk memastikan kelancaran operasi stasiun sumpal dan menjaga keandalan pasokan listrik bagi produksi gas alam.

Pengaturan pembagian beban dilakukan secara Isoch ataupun droop akan dieksekusi atau dilakukan oleh CGCM (combine generator control module).keluaran ABB Alen Bradley baik pembagian kW ataupun kVAR semua terintegrasi pada modul controllel ini. Kuhsusnya pada pilihan isochronous, kenyataan yang terjadi di lapangan adanya ketidak-seimbangan kVAR pada unit GTG 403, hal ini dapat menyebabkan gangguan pada sistem kelistrikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengecekan secara berkala untuk memastikan bahwa pembagian kW ataupun kVAR semua terintegrasi dengan baik pada modul controller ini. Dari kondisi ini, peneliti akan mengevaluasi efektivitas pengaturan isochronous dan droop dalam mengoptimalkan pembagian kW dan kVAR pada unit GTG 403 serta mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat menyebabkan ketidak-seimbangan kVAR. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kinerja CGCM dalam menangani ketidak-seimbangan kVAR dan mengidentifikasi langkah-langkah yang dapat diambil untuk mencegah gangguan pada sistem kelistrikan.

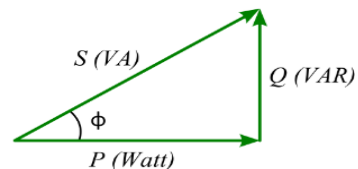
Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan operasi unit GTG 403.

TINJAUAN PUSTAKA

Salah satu komponen terpenting dari sistem tenaga listrik adalah generator, yang bertindak sebagai sumber utama energi listrik, alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [4]. Generator sangat penting untuk kelancaran sebuah event karena dapat menjadi sumber listrik cadangan yang dapat diandalkan jika terjadi pemadaman listrik atau gangguan, pada event-event besar seperti shooting film, acara musik, pesta pernikahan, atau festival. Pengoperasian generator juga harus dalam kondisi stabil agar kinerja generator bisa optimal, kestabilan ini dapat dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu beban, faktor daya, arus eksitasi dan tegangan. Semakin besar nilai faktor daya maka semakin kecil nilai daya reaktif dan semakin efisien penggunaan energi listrik. Sebaliknya, semakin rendah nilai faktor daya maka semakin besar nilai daya

reaktifnya dan semakin buruk kualitas daya listriknya. Selain itu, generator listrik juga menghasilkan data seperti daya aktif, daya reaktif, tegangan keluaran, daya beban, dan arus eksitasi yang penting untuk memantau kinerja generator dan memastikan generator beroperasi secara efisien dan stabil [5].

Dalam sistem tenaga listrik, terdapat tiga daya yang saling berhubungan satu sama lain, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe- tipe daya yang berbeda (Daya aktif, Daya reaktif dan Daya semu) berdasarkan prinsip trigonometri. Dapat dilihat dari gambar di atas Daya aktif (P) digambarkan dengan garis horizontal yang lurus kemudian daya reaktif (Q) tegak membentuk sudut 90° dari daya aktif. Sedangkan daya semu (S) adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dengan daya reaktif. Daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet atau daya yang ditimbulkan oleh beban yang bersifat induktif atau beban non-linear seperti motor induksi, transformator, dan peralatan elektronik.

Karakteristik daya reaktif adalah bahwa arus dan tegangan tidak berada dalam fase yang sama, yang menyebabkan terjadinya perbedaan waktu antara keduanya. Hal ini mengakibatkan terjadinya pemborosan energi dan menimbulkan masalah pada sistem distribusi listrik seperti penurunan tegangan dan peningkatan rugi-rugi daya. Oleh karena itu, pengelolaan daya reaktif menjadi penting untuk menjaga stabilitas dan efisiensi sistem kelistrikan. Satuan daya reaktif adalah **VAR** (Volt Ampere Reaktif). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif. Hal serupa sering dilakukan pada pabrik-pabrik yang menggunakan motor banyak menggunakan beban berupa motor-motor listrik.

Dimana berlaku hubungan persamaan daya reaktif :

$$Q = V \times I \times \sin \phi \dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V =Tegangan (V)

I = Arus listrik (A)

$\sin \phi$ = Faktor reaktif

Persentase daya reaktif adalah rasio yang menggambarkan perbandingan daya reaktif dengan daya semu di dalam sistem arus bolak-balik (AC),digunakan untuk mengukur efisiensi penggunaan daya atau beban induktif/kapasitif dalam sistem tersebut.

Persentase daya reaktif =

$$\frac{\text{rata - rata daya Reaktif}}{\text{rata - rata daya Semu}} \times 100 \dots\dots(2.2)$$

Daya reaktif (Q) dalam suatu sistem kelistrikan sangat mempengaruhi tegangan (V) dan arus listrik (I) yang mengalir. Semakin besar daya reaktif, maka tegangan akan menurun dan arus listrik akan meningkat. Tegangan keluaran generator dapat memengaruhi besarnya daya reaktif yang dihasilkan. Semakin besar nilai daya reaktif, faktor daya ($\cos \phi$) akan semakin kecil [7]. Oleh karena itu, pengelolaan daya reaktif sangat penting untuk menjaga stabilitas dan efisiensi sistem kelistrikan agar tetap berjalan dengan baik. Dengan memahami persamaan daya reaktif dan hubungannya dengan tegangan serta arus listrik, kita dapat melakukan langkah-langkah yang tepat untuk menghemat daya reaktif dan menjaga kinerja sistem kelistrikan secara optimal.

Daya aktif atau daya nyata sebenarnya adalah daya diperlukan oleh beban resistif murni. Daya nyata untuk mengubah suatu energi listrik menjadi bentuk energi lain. Contohnya penggunaannya pada perangkat elektronik misalnya pada lampu pijar, solder setrika dan elemen pemanas. Berikut rumus menghitung daya aktif :

$$1. P = V \times I \cos \phi \dots\dots(2.3)$$

2. Line to line / 3 fasa

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \cos \phi \dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

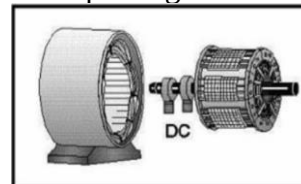
P : Daya Nyata (Watt)

V:Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

Generator sinkron

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator.

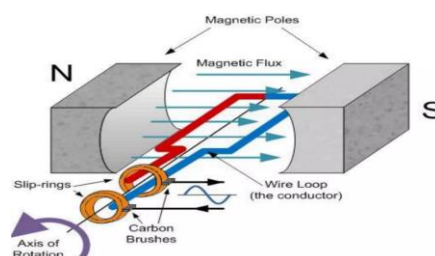


Gambar 2. Konstruksi Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron

Prinsip Kerja Generator Sinkron Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh prime mover, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong kumparan stator sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari flux putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan stator yang bersifat bolak – balik atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor. Tegangan AC 3 fasa yang dibangkitkan pada generator sinkron memiliki besaran yang sama, namun berbeda fasa 120 derajat satu dengan lainnya, hal ini memungkinkan untuk mendapatkan tegangan output yang lebih stabil dan efisien [8]. Besarnya tegangan induksi yang dihasilkan dapat ditentukan sesuai persamaan berikut :

$$E_{eff} = \frac{N \times 4,44 \times n \times \phi \times m}{120} \dots\dots (2.5)$$



Gambar 3. Komponen Generator Sinkron

Generator Tanpa Beban

Dengan memutar alternator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (IF), maka tegangan (E) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator bentuk hubungan persamaannya :

$$E = C \times n \times \phi \dots (2.6)$$

Dimana :

C = konstanta mesin

n = putaran sinkron (rpm)

ϕ = Fluks

Generator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) ini Bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s). Persamaan tegangan pada generator adalah :

$$E_a = V + I.R_a + j I.X_s \dots (2.7)$$

Dimana :

E_a = tegangan induksi pada jangkar (volt)

V = tegangan terminal (volt)

R_a = Resistansi jangkar

X_s = resistansi sinkron (ohm)

Eksitasi

Eksitasi atau penguatan adalah sistem pasokan arus searah ke rotor generator sebagai penguatan medan magnet. Arus eksitasi dialirkan pada kutub magnetik yang besarnya dapat diatur untuk memperoleh nilai tegangan output generator dan daya reaktif yang sesuai. Arus eksitasi diatur oleh pengatur tegangan otomatis (AVR) untuk mengontrol tegangan keluaran generator. Arus eksitasi memengaruhi arus eksitasi utama, yang pada gilirannya memengaruhi tegangan yang dihasilkan oleh generator utama. Hubung singkat atau gangguan tanah pada rotor dapat menyebabkan distorsi medan dan getaran berlebihan pada unit generator [9]. Arus eksitasi disesuaikan untuk menjaga tegangan keluaran generator pada nilai

nominalnya, dan sangat penting untuk mengatur daya reaktif agar tegangan tetap berada dalam batas nominal [10].

Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh, dan ini dinyatakan dengan persamaan :

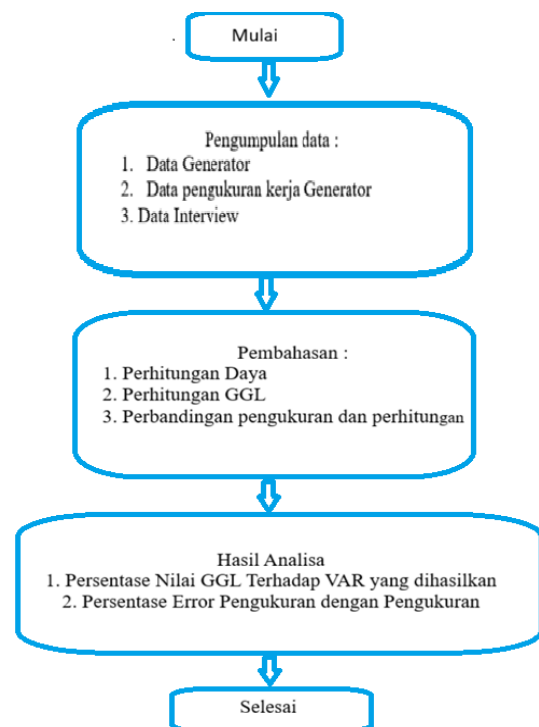
$$\% \text{ Pengaturan Tegangan} = \frac{E_a - V_{out}}{V_{out}} \times 100 \dots (2.8)$$

Terjadinya perbedaan tegangan terminal V dalam keadaan berbeban dengan tegangan E_o pada saat tidak berbeban dipengaruhi oleh faktor daya dan besarnya arus jangkar (I_a) yang mengalir [11]. Untuk menentukan pengaturan tegangan dari generator adalah dengan memanfaatkan karakteristik tanpa beban dan hubung singkat yang diperoleh dari hasil percobaan dan pengukuran tahanan jangkar.

METODE PENELITIAN

Diagram Alur

Dalam analisis ini melakukan langkah-langkah kerja supaya terarah dan teratur dapat dilihat pada flowchart gambar 4.



Gambar 4. Flow Diagram

Data pengujian Generator

Pengujian dilakukan pada generator yang terhubung paralel selama 7 jam dengan pengamatan pembagian daya aktif, daya reaktif dan daya semu.

Tabel 1. Generator 403

date/time	analog.an_gen_avg_pf	analog.an_gen_exc_i	analog.an_gen_exc_v	analog.an_gen_freq	analog.an_gen_total_kVAR	analog.an_gen_total_kw	Avg Current analog.an_gen_avg_i
06/24/24 02:00:01.000	0.76	2.87	26.16	49.97	503.56	586.46	1117.03
06/24/24 03:00:01.000	0.75	1.42	27.83	50	489.77	548.84	1063.01
06/24/24 04:00:01.000	0.76	1.43	28.52	50.03	458.87	529.34	1012.35
06/24/24 05:00:01.000	0.74	1.42	24.59	50.01	480.15	527.61	1030.9
06/24/24 06:00:01.000	0.76	1.45	29.2	49.98	466.79	542.19	1033.88
06/24/24 07:00:01.000	0.75	1.39	28.22	50	449.42	509.5	981.55
06/24/24 08:00:01.000	0.74	1.42	28.79	49.99	512.7	563.07	1100.46

Tabel 2. Generator 404

date/time	analog.an_gen_avg_pf	analog.an_gen_exc_i	analog.an_gen_exc_v	analog.an_gen_freq	analog.an_gen_total_kVAR	analog.an_gen_total_kw	Avg Current analog.an_gen_avg_i
11/24/24 02:00:00.966	0.87	1.28	23.52	50.00	247.06	481.94	726.84
11/24/24 03:00:00.966	0.89	1.27	24.43	49.99	245.44	426.59	762.38
11/24/24 04:00:00.966	0.87	1.28	24.70	50.01	246.98	476.53	722.19
11/24/24 05:00:00.966	0.89	1.29	23.86	50.00	248.41	471.34	774.25
11/24/24 06:00:00.966	0.88	1.29	26.36	50.00	247.72	428.16	754.59
11/24/24 07:00:00.966	0.88	1.29	26.75	50.01	248.66	458.34	753.91
11/24/24 08:00:00.966	0.88	1.27	26.02	49.99	230.97	405.38	714.25

Tabel 3. Generator 405

date/time	analog.an_gen_avg_pf	analog.an_gen_exc_i	analog.an_gen_exc_v	analog.an_gen_freq	analog.an_gen_total_kVAR	analog.an_gen_total_kw	Avg Current analog.an_gen_avg_i
11/24/24 02:00:00.966	0.87	1.29	25.15	50.00	246.78	470.47	721.97
11/24/24 03:00:00.966	0.89	1.29	26.19	49.98	237.39	414.94	740.25
11/24/24 04:00:00.966	0.87	1.29	26.22	50.01	247.27	465.81	724.44
11/24/24 05:00:00.966	0.88	1.27	25.57	49.98	237.44	458.25	706.78
11/24/24 06:00:00.966	0.89	1.26	26.85	49.99	234.78	427.66	747.53
11/24/24 07:00:00.966	0.89	1.27	25.79	50.02	243.13	474.06	750.16
11/24/24 08:00:00.966	0.88	1.26	25.40	49.97	231.83	410.50	708.44

Sistem Pembagian Beban Antar Generator

Generator memproduksi daya tergantung pada beban yang terpakai yang dihubungkan paralel. Generator akan menghasilkan daya

yang lebih besar jika beban yang terhubung paralel semakin besar. Hal ini karena semakin besar beban, semakin tinggi arus yang mengalir dan semakin tinggi daya yang dihasilkan oleh generator. Pengaturan beban dilakukan dengan sistem otomatis atau manual oleh petugas operator. Berbagai metode yang diterapkan untuk dapat mengatur beban generator agar dapat seimbang. Salah satu metode yang umum digunakan adalah dengan menggunakan sistem kontrol otomatis yang dapat mengatur beban generator secara otomatis berdasarkan kebutuhan. Selain itu, penggunaan sistem monitoring juga penting untuk memastikan generator bekerja optimal dan efisien.

Di stasiun Sumpal, penulis melakukan interview pada setiap petugas operator yang bertugas mengontrol jalannya generator yang menjelaskan bahwa pada unit 403 *sharing* daya reaktif berlangsung dengan cara otomatis, maka pembagian beban kVAR menjadi tidak seimbang antara generator 403, 404 dan 405.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Daya Generator

Dari hasil pengukuran terdapat 3 data dapat dilihat pada tabel 3.1, 3.2 dan 3.3, maka perhitungan di bawah ini untuk memastikan bahwa pengukuran sistemasi sesuai dengan rumus persamaan daya pada generator.

Perhitungan Daya Unit 403

Untuk menghitung daya generator unit 403 dapat menggunakan persamaan 2.4 dengan sampel data pada tabel 3.1 pada jam 03.00 yaitu:

$$P = V \times \sqrt{3} \times I \times \cos \varphi$$

$$P = 400 \times \sqrt{3} \times 1063,01 \times 0,75$$

$$= 552,35 \text{ kW}$$

$$Q = P \times \sin \varphi = P \times \tan (\cos^{-1}(\text{pf}))$$

$$Q = 552,35 \times \tan (\cos^{-1}(0,75))$$

$$Q = 552,35 \times 0,881 = 487,12 \text{ kVAR}$$

$$S = V \times \sqrt{3} \times I$$

$$S = 400 \times 1,73 \times 1063,01 = 735,65 \text{ kVA}$$

Perhitungan Daya Unit 404

Untuk menghitung daya generator unit 404 dapat menggunakan persamaan 2.4 dengan sampel data pada tabel 3.2 pada jam 03.00 yaitu:

$$\begin{aligned}
 P &= V \times \sqrt{3} \times I \times \cos \phi \\
 P &= 400 \times \sqrt{3} \times 762,38 \times 0,89 \\
 &= 469,53 \text{ kW} \\
 Q &= P \times \sin \phi = P \times \tan (\cos^{-1}(\text{pf})) \\
 Q &= 469,53 \times \tan (\cos^{-1}(0,89)) \\
 Q &= 469,53 \times 0,512 = 240,54 \text{ kVAR} \\
 S &= V \times \sqrt{3} \times I \\
 S &= 400 \times 1,73 \times 762,38 = 735,65 \text{ kVA}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Daya Unit 405

Untuk menghitung daya generator unit 405 dapat menggunakan persamaan 2.4 dengan sampel data pada tabel 3.3 pada jam 03.00 yaitu:

$$\begin{aligned}
 P &= V \times \sqrt{3} \times I \times \cos \phi \\
 P &= 400 \times \sqrt{3} \times 740,25 \times 0,89 \\
 &= 455,90 \text{ kW} \\
 Q &= P \times \sin \phi = P \times \tan (\cos^{-1}(\text{pf})) \\
 Q &= 455,90 \times \tan (\cos^{-1}(0,89)) \\
 Q &= 455,90 \times 0,512 = 233,42 \text{ kVAR} \\
 S &= V \times \sqrt{3} \times I \\
 S &= 400 \times 1,73 \times 740,25 = 512,25 \text{ kVA}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas maka dilakukan komparasi terhadap pengukuran dan perhitungan, dengan menggunakan fungsi pada microsoft excel, sehingga didapatkan data seperti pada tabel 4.1.

Tabel 4. Komparasi Pengukuran Dan Perhitungan

UNIT	PENGUKURAN			PERHITUNGAN		
	analog_an_gen_tot al_kvar	analog_an_gen_t otal_kw	gen_total_ kVA	gen_total_ kvar	gen_total_ kw	gen_total_ kVA
403	503.56	586.46	773.90	502.98	588.16	772.98
	489.77	548.84	736.47	487.13	552.36	735.60
	458.87	529.34	701.38	455.34	533.05	700.55
	480.15	527.61	714.23	480.39	528.53	713.38
	466.79	542.19	716.29	465.54	544.38	715.44
	449.42	509.30	680.04	449.80	510.03	679.23
	512.70	563.07	762.42	512.81	564.19	761.52
	247.06	481.94	503.57	245.09	439.90	502.98
	245.44	426.59	528.19	245.36	467.74	527.56
	246.98	476.53	500.35	246.70	433.50	499.75
404	248.41	471.34	536.42	247.93	475.68	535.78
	247.72	428.16	522.80	248.25	460.10	522.18
	248.66	458.34	522.52	247.17	460.14	521.70
	230.97	405.38	494.85	231.65	437.28	494.26
	246.78	470.47	500.19	247.57	434.63	499.60
	237.39	414.94	512.86	238.30	454.14	512.25
405	247.27	465.81	501.91	247.28	436.76	501.31
	237.44	458.25	489.67	237.03	428.48	489.09
	234.78	427.66	517.90	235.14	461.45	517.29
	243.13	474.06	519.72	239.39	461.31	519.11
	231.83	410.50	490.82	232.29	432.37	490.24
	Rata2	965.01	1439.54	963.38	1443.71	1744.54

Analisa perbandingan Arus Eksitasi Dengan daya reaktif

Dengan data dan perhitungan yang telah dikomparasi maka dapat kita ketahui perbandingan Arus Eksitasi dan Daya Reaktif

pada ke tiga unit generator yang telah di uji pada beban rata-rata selama 7 jam secara kontinyu.

Tabel 5. Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif

Unit	Eksitasi	Daya Reaktif kVAR	% kVAR
403	1.63	480.18	49.76%
404	1.28	245.03	25.39%
405	1.28	239.80	24.85%
Total		965.01	100%

Dari tabel 5 terlihat besarnya arus eksitasi berbanding lurus dengan besarnya daya reaktif yang dihasilkan masing-masing unit generator.

Dari tabel 5 persentase daya reaktif yang dihasilkan oleh masing-masing generator adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase daya reaktif} &= \frac{\text{rata} - \text{rata daya Reaktif}}{\text{rata} - \text{rata daya Semu}} \times 100 \\
 &= \frac{480.14}{726.39} \times 100 = 66.09\% \\
 &= \frac{245.03}{514.89} \times 100 = 47.59\% \\
 &= \frac{239.80}{504.13} \times 100 = 47.57\%
 \end{aligned}$$

Total rata-rata beban reaktif adalah = 53.75 %
Jumlah total daya semu yang dihasilkan melalui perhitungan pada tabel 3.1, 3.2 dan 3.3 sebesar 1744,54 kVA.

Berdasarkan tabel 5 maka selisih dengan perhitungan adalah :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{rata2 pengukuran VAR} - \text{rata2 perhitungan VAR}}{\text{rata} - \text{rata pengukuran VAR}} \times 100 \dots 4.1 \\
 &= \frac{965.01 - 963.38}{965.01} \times 100 = 0,2\%
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas maka besarnya error pengukuran daya reaktif / kVAR adalah sebesar 1.9 kVAR.

Perhitungan Tegangan Induksi Generator

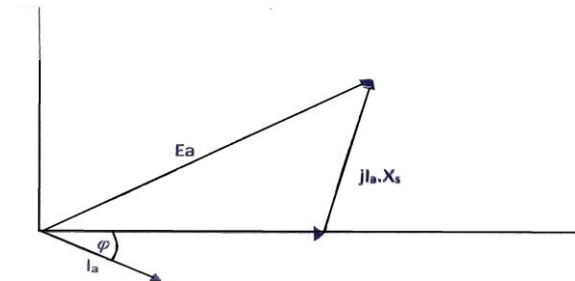
Pada Perhitungan Tegangan induksi dibutuhkan nilai Reaktansi sinkron dari Generator. Dari data yang didapatkan besarnya reaktansi sinkron dari generator adalah sebesar $X_s = 0,202 \text{ Ohm}$. Dengan asumsi $V = \text{output } 400 \text{ volt}$ maka kita dapat mencari GGL induksi pada masing-masing generator .

Perhitungan GGL Generator 403

Untuk menghitung tegangan induksi pada generator 403 dapat menggunakan persamaan 2.7.

$$E_a = V_{out} + jX_s \cdot I_a$$

$E_a = 400 + j0,2 \cdot 1063,01$
 $E_a = 400 + j212$, $X = 400, y=212$
 $r = \sqrt{400^2 + 212^2} = 425,707$
 $\phi = \arctan (212/400) = 0,487 \text{ rad} = 27,9^\circ$
 hasil perhitungan tegangan induksi GTG 403
 $= 452,7 \angle 27,9^\circ$



Gambar 5. Diagram Fasor GGL Unit 403 lagging ϕ 0,75

Perhitungan GGL Generator 404

Untuk menghitung tegangan induksi pada generator 404 dapat menggunakan persamaan 2.7.

$$E_a = V_{out} + jX_s \cdot I_a$$

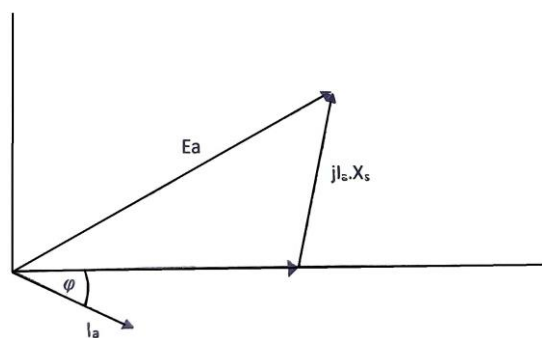
$$E_a = 400 + j0,2 \cdot 762,3$$

$$E_a = 400 + j152,4$$
 , $X = 400, y=152,4$

$$r = \sqrt{400^2 + 152,4^2} = 428,049$$

$$\phi = \arctan (152,4/400) = 0,364 \text{ rad} = 20,857^\circ$$

hasil perhitungan tegangan induksi GTG 404
 $= 428 \angle 20,98^\circ$



Gambar 6. Diagram Fasor GGL 404 lagging ϕ 0,88

Perhitungan GGL Generator 405

Untuk menghitung tegangan induksi pada generator 405 dapat menggunakan persamaan 2.7.

$$E_a = V_{out} + jX_s \cdot I_a$$

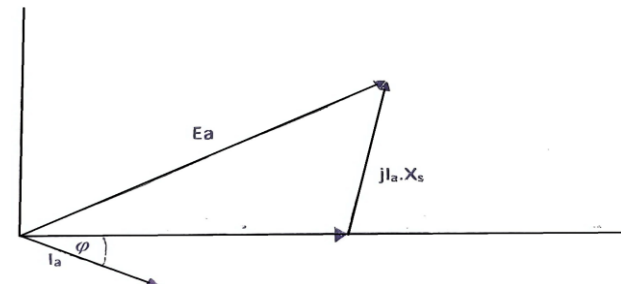
$$E_a = 400 + j0,2 \cdot 740,25$$

$$E_a = 400 + j148$$
 , $X = 400, y=148$

$$r = \sqrt{400^2 + 148^2} = 426,502$$

$$\phi = \arctan (148/400) = 0,354 \text{ rad} = 20,304^\circ$$

hasil perhitungan tegangan induksi GTG 405 =
 $426 \angle 20,5^\circ$



Gambar 7. Diagram Fasor GGL Unit 405 lagging ϕ 0,88

Dari kalkulasi di atas didapat tabel nilai GGL dari generator.

Tabel 6. GGL Generator 403

Unit	date/time	GGL	Sudut	Cos phi	Arus Exitasi	kvar
403	2:00:01 PM	458.16	32.00	0.76	2.87	503.56
	3:00:01 PM	452.99	30.45	0.75	1.42	489.77
	4:00:01 PM	448.32	29.00	0.76	1.43	458.87
	5:00:01 PM	450.01	29.53	0.74	1.42	480.15
	6:00:01 PM	450.28	29.62	0.76	1.45	466.79
	7:00:01 PM	445.58	28.12	0.75	1.39	449.42
	8:00:01 PM	456.55	31.53	0.74	1.42	512.70
	Nilai Rata2	451.70	30.04	0.75	1.63	480.18

Tabel 7. GGL Generator 404

Unit	date/time	GGL	Sudut	Cos phi	Arus Exitasi	Kvar
404	2:00:01 PM	425.60	20.82	0.87	1.28	247.06
	3:00:01 PM	428.08	21.84	0.89	1.27	245.44
	4:00:01 PM	425.28	20.69	0.87	1.28	246.98
	5:00:01 PM	428.93	22.18	0.89	1.29	248.41
	6:00:01 PM	427.52	21.62	0.88	1.29	247.72
	7:00:01 PM	427.48	21.60	0.88	1.29	243.66
	8:00:01 PM	424.74	20.46	0.88	1.27	230.97
	Nilai Rata2	426.80	21.32	0.88	1.28	245.03

Tabel 8. GGL Generator 405

Unit	date/time	GGL	Sudut	Cos phi	Arus Eksitasi	kvar
405	2:00:01 PM	425.26	20.68	0.87	1.29	246.78
	3:00:01 PM	426.52	21.21	0.89	1.29	237.39
	4:00:01 PM	425.43	20.75	0.87	1.29	247.27
	5:00:01 PM	424.24	20.25	0.88	1.27	237.44
	6:00:01 PM	427.03	21.42	0.89	1.26	234.78
	7:00:01 PM	427.21	21.49	0.89	1.27	243.13
	8:00:01 PM	424.35	20.30	0.88	1.26	231.83
	Nilai Rata2	425.72	20.87	0.88	1.28	239.80

Dari rata- rata GGL yang dibangkitkan oleh generator 403 adalah sebesar 451 volt. Besarnya GGL yang dibangkitkan dari eksitasi menyebabkan semakin besar daya reaktif yang diserap atau yang dihasilkan oleh generator 403 dibandingkan GGL yang dibangkitkan oleh dua unit lainnya adalah sebesar 425-426 volt.

Cos Phi Ideal Rata-Rata Per Unit

Dengan asumsi pembagian beban reaktif sama rata maka, cos phi setiap mesin adalah seperti di bawah ini.

Cos ϕ tiap Unit adalah:

$$\cos \phi = \cos \phi \left(\tan^{-1} \frac{\text{Total rata2 daya reaktif}}{\text{Total rata2 daya aktif}} \right) \dots 4.2$$

$$\cos \phi = \cos \phi \left(\tan^{-1} \frac{965,01}{1439,54} \right)$$

$$\cos \phi = \cos \phi \left(\tan^{-1}(0,67) \right)$$

$$\cos \phi = 0,82$$

Pengaturan Tegangan

Berdasarkan perhitungan dan analisa di atas untuk menentukan pengaturan tegangan maka dapat dilihat seperti di bawah ini:

$$\text{Unit 403} = 480,14 \text{ kVAR}$$

$$\text{Unit 404} = 245,03 \text{ kVAR}$$

$$\text{Unit 405} = 239,80 \text{ kVAR}$$

$$\text{Total rata2} = 965,01 \text{ kVAR}$$

Ideal pembangkit kVAR, $965,01/3$ Genrator adalah 321,6 kVAR. Untuk menghitung % pengaturan tegangan pada unit GTG 403, 404 dan 405 dapat menggunakan persamaan 2.8.

Unit GTG 403:

$$\% \text{Peng.Tegangan} = 451-400 / 400 \times 100 = 12\%$$

Unit GTG 404:

$$\% \text{Peng.Tegangan} = 426-400 / 400 \times 100 = 6\%$$

Unit GTG 405:

$$\% \text{Peng.Tegangan} = 425-400 / 400 \times 100 = 6\%$$

Untuk mendapatkan nilai pengaturan agar VAR yang diserap oleh generator ideal atau berimbang adalah dengan menumukan nilai rata-rata persentase eksitasi menjadi :

$$\text{Rata2 pengaturan tegangan} = \frac{12,7+6+6}{3} = 8\%$$

Hasil Pembuktian :

-Unit 403

$$\text{Besar Eksitasi} = 12\%$$

GGL 451 volt

Untuk mendapatkan nilai ideal kVAR yang balance maka unit 403 harus menurunkan eksitasi dari 12% ke 8% maka penguatan menjadi = $451 - 4\% = 433$ volt.

-Unit 404

$$\text{Besar Eksitasi} = 6\%$$

GGL 426 volt

Untuk mendapatkan nilai ideal kVAR yang balance maka unit 403 harus menaikkan eksitasi dari 6% ke 8% maka penguatan menjadi = $426 + 2\% = 434$ volt

-Unit 405

$$\text{Besar Eksitasi} = 6\%$$

GGL 425 volt

Untuk mendapatkan nilai ideal kVAR yang balance maka unit 403 harus menaikkan eksitasi dari % 6 ke 8% maka penguatan menjadi = $425 + 2\% = 433,5$ volt

Dari pengaturan tersebut maka diperoleh nilai eksitasi pada ketiga generator tersebut adalah 8% dengan besar GGL 434 ditiap unit dengan cos phi yang balance yaitu 0,8.

Analisis hasil Pengukuran dan Perhitungan

1. Perbandingan pengukuran dengan perhitungan terhadap tiap generator terdapat error sebesar 0,2 % atau sebesar 1,9 kVAR

2. Rata-rata GGL yang dibangkitkan oleh generator 403 adalah sebesar 451 besar daya reaktif yang dihasilkan oleh generator 403 dibanding GGL yang dibangkitkan oleh dua unit yang lain adalah 425 -426 volt
3. Besarnya perbandingan antara kVAR yang diserap oleh generator 403 adalah sebesar 49,76 dari total VAR yang dihasilkan, sedangkan untuk unit 404 adalah sebesar 25,39% dan unit 405 adalah sebesar 24,85%
4. Besarnya pengaturan tegangan dari VAR secara otomatis pada unit 403 adalah sebesar 12%, untuk menyeimbangkan VAR dan Cos phi maka unit 403 tegangan/eksitasi diturunkan mmenjadi 4% secara manual ntuk mendapatkan pembagian beban yang seimbang, sedangkan 2 unit lain eksitasi dari 6% akan bertambah 2% menjadi 8 %.

SIMPULAN

Dari perhitungan dan analisa dapat disimpulkan bahwa :

Besarnya GGL yang dibangkitkan unit generator 403 lebih besar dibanding dua unit yang lain, sehingga menyebabkan beban reaktif yang diserap generator 403 lebih besar. Total persentase beban reaktif unit generator 403 adalah 49,76% lebih besar dari dua unit lainnya hanya menyerap sekitar kurang lebih 25% dari total beban reaktif. Pemilihan mode pembagian beban secara otomatis pada unit generator 403 mengakibatkan beban reaktif yang diserap lenih besar dibanding dengan dua unit lain yang nilainya seimbang.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexandra, V Meier, "Electric Power System:A Conceptual Introductionm Hoboken, NJ: John Wiley, New Jersey, 2006. ISBN: 97804711178590
- D. I. Widasmara, A. Wibisono, and S. Riyadi, "Dampak Pembebanan Kapasitif Murni dan Resistif Kapasitif pada Perubahan Vektor Generator Sinkron Tiga Fasa", *elektrika*, vol. 16, no. 1, pp. 1–9, Apr. 2024, doi: 10.26623/elektrika.v16i1.8695.
- F.Ibnu, A. Jayanti, & Erlinasari "Pengaruh Variasi Kapasitor Terhadap Faktor Daya dan Stabilitas Tegangan Pada Sistem Elektronika", *Akiratech*, vol. 2, no. 2, p. 71-77, 2025. <https://doi.org/10.63935/akiratech.v2i2.169>
- M. Farhan, R.Hidayat, Y. Saragih. "Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Generator Unit 2 PLTMH CURUG". *Jurnal SIMETRIK*. Vol. 11 No.1. 2021. p- ISSN: 2302-9579/e-ISSN: 2581-2866. P. 398-403. Doi: <https://doi.org/10.31959/js.v11i1.653>
- M. Harahap, Y.T. Nugraha, M. Adam, dkk, "Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator", *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi)*, vol.3 no.2, pp.71-76, ISSN 2622 – 7002, DOI: <https://doi.org/10.30596/rele.v3i2.6485>
- M. Mokhtari, S. Zouggar, N.K.M'Sirdi et al , "Voltage regulation of an asynchronous wind turbine using STATCOM and a control strategy based on a combination of single input fuzzy logic regulator and sliding mode controllers", *international journal of power electronics and drive systems (ijpeds)*, vol. 11, no. 3, p. 1557-1569, 2020, <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1557-1569>
- M.R. Syahrial. "Analisis Efisiensi Daya Listrik pada Generator Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning", Skripsi, Universitas Muhammadiyah, Medan, Maret. 2018.
- Marsudi,Djiteng "Operasi System Tenaga Listrik" Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.
- P. Agus, Supriadi dan R. Firmansyah, "Pemakaian Generator 2 x 2000 KVA pada Automatic Transfer Switch Terhadap Perubahan Laju Beban di Pusat Perbelanjaan Pasar Atum Surabaya",

- Thesis, Universitas Muhammadiyah, Surabaya, 2015.
- Putra, Bagoes Dewangga, *Analisa Sistem Eksitasi Generator Sinkron Gas Turbin di PT. PLN (PERSERO) Sektor Keramasan*". Thesis, Politeknik Negeri Sriwijaya, 2020.
- Yu. Bezverkhia, "A voltage loss preliminary estimation in ac busbars", *naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/13>