

Optimasi Eksitasi Generator Untuk Perbaikan Penyerapan MVAR Pada Pembangkit

Muhammad Isnain Wiyasatama^{1*}; Wahyudi Budi Pramono¹

1. Magister Rekayasa Elektro, Universitas Islam Indonesia, Jl. Kaliurang Km.14.5, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584 Indonesia

*Email: 23925003@students.uii.ac.id

Received: 7 Desember 2024 | Accepted: 18 Desember 2025 | Published: 7 Januari 2026

ABSTRACT

The absorption of Mega Volt-Ampere Reactive (MVAR) by the generator plays a crucial role in maintaining high-voltage network stability, particularly at the Cilacap Unit 3 coal-fired power plant (PLTU). Using ETAP simulations, this study evaluates Unit 3's capability limits in supporting MVAR demands and the impact on network voltage based on the generator capability curve. The results indicate that the unit can meet MVAR demands at a transmission voltage of 500 kV within a $\pm 5\%$ tolerance, ensuring operational stability. However, a reduction in the generator's MVAR may lead to a drop in generator output voltage, affecting the internal power supply, especially for FGD transformer equipment. This condition could potentially increase the risk of operational disruptions, including trips. When the generator MVAR approaches a power factor below 0.98, the generator output voltage may decrease from 20 kV to 19 kV. These findings underscore the importance of excitation settings that align with the generator capability curve to maintain electrical system stability and reliability. Further studies are recommended to ensure the reliability of FGD transformer equipment.

Keywords: etap, excitation, generator capability curve, mvar, jawa bali transmission

ABSTRAK

Penyerapan Mega Volt-Ampere Reactive (MVAR) oleh generator berperan penting dalam menjaga stabilitas jaringan tegangan tinggi, khususnya di PLTU Cilacap Unit 3. Melalui simulasi menggunakan ETAP, penelitian ini mengevaluasi batas kemampuan Unit 3 dalam mendukung kebutuhan MVAR serta dampaknya terhadap tegangan jaringan berdasarkan kurva kemampuan generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa unit ini mampu memenuhi permintaan MVAR pada tegangan transmisi 500 kV dengan toleransi $\pm 5\%$, menjaga stabilitas operasional jaringan. Namun, penurunan MVAR pada generator berpotensi menyebabkan penurunan tegangan output generator, yang berdampak pada drop tegangan listrik untuk pemakaian sendiri, terutama pada peralatan transformer FGD. Kondisi ini dapat meningkatkan risiko gangguan operasional, termasuk kemungkinan terjadinya trip. Ketika MVAR mendekati faktor daya (pf) di bawah 0,98, tegangan keluaran generator dapat turun dari 20 kV menjadi 19 kV. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan eksitasi sesuai dengan kurva kemampuan generator untuk mempertahankan kestabilan dan keandalan sistem kelistrikan. Kajian lebih lanjut juga direkomendasikan untuk memastikan keandalan peralatan transformer FGD.

Kata kunci: etap, eksitasi, kurva generator, mvar, transmisi jawa bali

1. PENDAHULUAN

Penyerapan *Mega Voltage Ampere Reactive* (MVAR) sangat penting dalam sistem kelistrikan untuk menjaga stabilitas dan efisiensi jaringan. MVAR membantu membentuk medan magnet yang diperlukan pada peralatan seperti motor, transformator, dan induktor, meskipun tidak menambah daya aktif yang digunakan. Perannya mencakup stabilisasi tegangan, pengaturan beban transformator, peningkatan kapasitas jaringan, kompensasi beban induktif, dan perbaikan faktor daya. Oleh karena itu, keseimbangan penyerapan MVAR sangat penting untuk memastikan stabilitas dan keandalan operasional jaringan listrik secara keseluruhan.

Pada kelistrikan modern, generator yang beroperasi pada sistem jaringan udara extra tinggi (SUTET) harus mampu menyerap daya reaktif dalam jumlah besar untuk menjaga profil tegangan yang stabil [1]. Pada beberapa sistem, generator sering kali menyerap daya reaktif secara tidak merata, terutama saat beban rendah, dan masalah ini bisa semakin buruk dengan peningkatan tegangan pada jaringan saluran udara tegangan extra tinggi. Oleh karena itu, penting untuk memahami dan mengatasi masalah penyerapan daya reaktif pada generator guna menjaga stabilitas sistem kelistrikan [2].

Saat ini, berbagai teknik tersedia untuk menyerap MVAR dalam sistem kelistrikan. Salah satunya adalah penggunaan pengaturan *volt ampere reactive* (VAR) dengan mengendalikan penjadwalan beban generator di jaringan [3]. Metode lain melibatkan penggunaan generator transformer dengan fasilitas *on-load tap changer* (OLTC), yang memungkinkan penyesuaian tap secara otomatis untuk mengoptimalkan tegangan. Selain itu, terdapat juga *static VAR compensator* (SVCs), perangkat impedansi otomatis yang terhubung ke jaringan listrik AC, dirancang khusus untuk mengatur tegangan dan menjaga stabilitas sistem secara efektif.

Penyerapan daya reaktif oleh generator sangat penting untuk menjaga stabilitas tegangan dan kinerja sistem kelistrikan. Penelitian menunjukkan bahwa pengaturan eksitasi yang optimal meningkatkan kemampuan penyerapan MVAR. Gregory J. Nolan et al. menekankan bahwa eksitasi yang terlalu rendah atau tinggi mengurangi efektivitas penyerapan MVAR [4], sementara Surendra Kumar Khichar et al. serta Deepika Mitra et al. menyimpulkan bahwa peningkatan eksitasi dapat memperbaiki stabilitas tegangan, terutama pada kondisi beban rendah dan fluktuasi beban [5] [6].

Penelitian ini berfokus pada PLTU Cilacap Unit 3, di mana pemeliharaan optimal penyerapan MVAR untuk stabilitas jaringan menjadi prioritas. Pasca blackout Jawa-Bali pada 23 Agustus 2019 yang berdampak pada sistem 500 kV, Unit 3 mengalami gangguan pada generator transformer (GT) yang menyebabkan kerusakan short winding. Perbaikan dilakukan dengan mengganti GT menggunakan model dengan spesifikasi yang diperbarui, yaitu kapasitas yang meningkat dari 778 MVA menjadi 810 MVA serta perubahan tegangan dari 22 kV menjadi 20 kV. Setelah empat tahun beroperasi, perhatian lebih terhadap penyerapan MVAR menunjukkan perlunya kajian komprehensif untuk memahami faktor-faktor yang memengaruhi. Kajian ini bertujuan untuk mengidentifikasi apakah terdapat perubahan efisiensi generator, perubahan pola operasi yang mungkin tidak sesuai dengan *curva capability* dari *manufacture*, atau pendekatan operasional yang dapat dioptimalkan guna meningkatkan kepercayaan pada kemampuan peralatan. Kajian ini penting untuk memperkuat keandalan sistem dan memastikan stabilitas operasional yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan kondisi generator apakah masih sesuai dengan referensi *curva capability* generator dan studi kasus komputasi guna memudahkan

dalam mensimulasikan kondisi unit dan jaringan yang tidak bisa dilakukan secara langsung. Solusi yang dihasilkan, diharapkan dapat mengetahui batasan dari generator dalam penyerapan MVAR, mengetahui kondisi yang terdampak pada unit baik internal maupun eksternal. Sehingga meningkatkan keandalan operasional PLTU serta stabilitas sistem kelistrikan Jawa Bali.

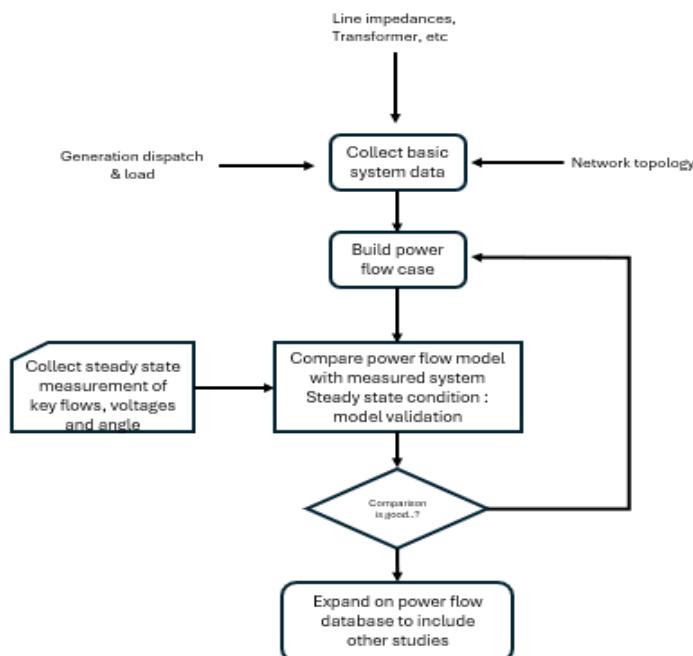
2. METODE PERANCANGAN PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PLTU Cilacap Unit 3, di karena pada saat ini unit menghadapi masalah kritis dalam penyerapan MVAR pada saat kondisi beban rendah. Saat beban pembangkit menurun, tegangan pada jaringan transmisi cenderung naik, terutama pada sistem tegangan tinggi seperti di jaringan transmisi 500 KV Jawa Bali. Namun, PLTU Cilacap Unit 3 tidak mampu menyerap daya reaktif dalam jumlah yang cukup untuk membantu menurunkan tegangan tersebut. Hal ini menyebabkan ketidakstabilan tegangan yang dapat memengaruhi kinerja seluruh sistem jaringan listrik di kawasan Jawa Bali dan menurunkan index prioriti unit terhadap PLN *Dispatch*.

Penelitian ini sangat penting untuk melakukan simulasi terhadap kemampuan generator dalam penyerapan MVAR sesuai dengan referensi *curva capability*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengetahui batasan-batasan dari kemampuan generator unit PLTU Cilacap Unit 3. Untuk mengetahui batasan tersebut digunakan bantuan software *electrical transient and analysis program* (ETAP) sebagai alat simulasi.

Pengumpulan dan persiapan data dalam pemodelan sistem tenaga sangat bergantung pada data yang dapat dipercaya. *Single line diagram* (SLD), manual, dan verifikasi lapangan sangat penting, terutama untuk fasilitas besar yang sering mengalami perubahan. Perangkat lunak ETAP membantu proses dengan basis data multidimensi yang memudahkan pengumpulan dan sinkronisasi data.

Validasi model pada model sistem tenaga diperlukan untuk memastikan akurasi, dengan membandingkan model offline dengan data waktu nyata. Keselarasan antara prediksi model *load flow* dan kondisi aktual mencerminkan validasi model, sementara perbedaan yang tidak teratasi menunjukkan kemungkinan adanya ketidakakuratan pada model [7], Gambar 1 merupakan diagram alir proses pengumpulan, persiapan dan validasi model.

**Gambar 1. Power system validasi**

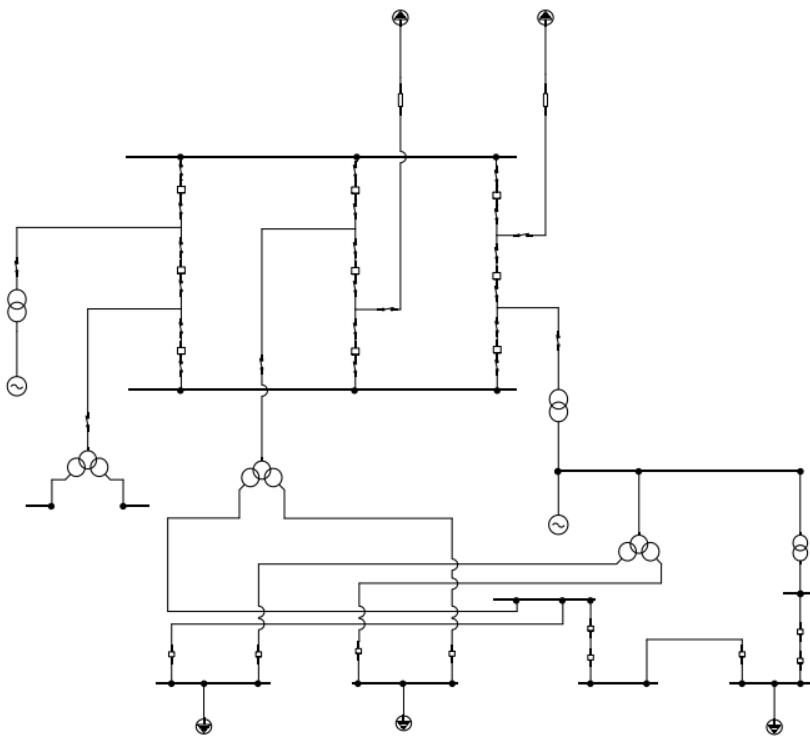
Source: NERC (https://www.nerc.com/docs/pc/mvwg/MV%20White%20Paper_Final.pdf).

2.1. Transmisi dan Distibusi

Menurut B. M. Weedy et al [8] dalam *Electrical Power System*, transmisi listrik adalah proses pengiriman daya dalam jumlah besar menggunakan jaringan tegangan tinggi dari pembangkit listrik ke pusat-pusat beban. Tegangan yang dihasilkan oleh generator (sekitar 11–25 kV) dinaikkan menggunakan transformator menjadi tegangan yang lebih tinggi untuk di transmisi seperti 150 kV atau 500 kV. Dari sini, daya disalurkan ke jaringan sub-transmisi dengan tegangan lebih rendah ke 20 kV sebelum akhirnya diteruskan ke jaringan distribusi.

Distribusi adalah proses penyaluran daya ke konsumen akhir lewat transformator yang menurunkan tegangan menjadi lebih rendah, seperti 20 kV/433V/380V, yang memberikan listrik untuk rumah tangga pada tegangan 230V [8].

Pada kelistrikan PLTU Cilacap Unit 3, keluaran generator sebesar 20kV dinaikkan menjadi 500kV ditransmisikan melalui *gas insulation switch* (GIS) ke gardu induk tegangan tinggi (GITET) PLN Adipala sejauh 5 KM dengan 12 tower yang selanjutnya di transmisikan melalui GITET Kesugihan untuk transmisi ke bagian selatan transmisi 500kV Jawa Bali ke arah GITET Tasik dan GITET Pedan. *Single Line Diagram* PLTU Cilacap dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. single line diagram unit 3

2.2. Generator

Generator merupakan komponen utama dalam pembangkitan energi listrik, berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik [8] [9]. Pada PLTU Cilacap Unit 3, generator menghasilkan daya listrik pada tegangan output sebesar 20 kV, yang kemudian dinaikkan ke tegangan transmisi menggunakan transformator untuk disalurkan ke jaringan [10]. Kinerja generator sangat bergantung pada sistem eksitasinya, yang berfungsi untuk mengatur arus medan dalam rotor. Pengaturan eksitasi yang optimal diperlukan untuk memastikan penyerapan daya reaktif dalam jumlah yang sesuai, menjaga stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan, dan mengurangi risiko gangguan sistemik yang dapat memengaruhi kontinuitas pasokan energi listrik. Spesifikasi generator di PLTU Cilacap Unit 3 sebelum dan sesudah penggantian transformator pada tahun 2019 dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi generator sebelum penggantian

<i>Basic Techincal Data</i>	
Type	QFSN-660-2
Rated Capacity	776.5 MVA
Rated active power	660 MW
Rated stator voltage	22 kV
Rated stator current	20377 A
Rated power factor	0.85 (lagging)
Rated speed	3000 rpm
Number of phase	3
Stator winding connection type	YY
Rated frequency	50 Hz
Efficiency	98.80 %

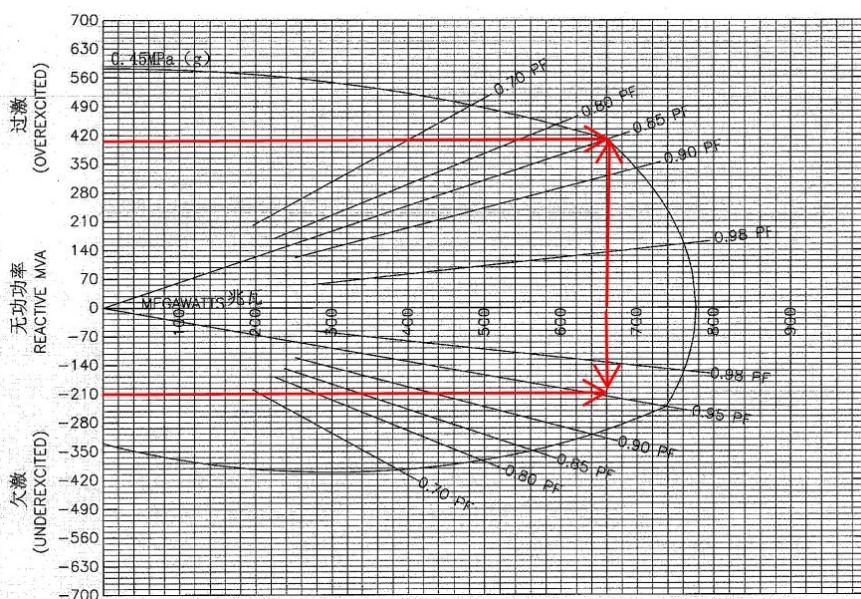
Manufacture	Shanghai electric power
-------------	-------------------------

Tabel 2. Spesifikasi generator sebelum penggantian

Basic Technical Data	
Type	QFSN-660-2
Rated Capacity	776.5 MVA
Rated active power	660 MW
Rated stator voltage	20 kV
Rated stator current	23382.7 A
Rated power factor	0.85 (lagging)
Rated speed	3000 rpm
Number of phase	3
Stator winding connection type	YY
Rated frequency	50 Hz
Efficiency	98.80 %
Manufacture	Shanghai electric power

2.3. Kurva kemampuan generator

Kurva kemampuan generator menunjukkan batas operasional generator, khususnya terkait dengan kemampuan daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR). Kurva ini menggambarkan hubungan antara output daya aktif dan daya reaktif, serta batasan yang ditentukan oleh faktor *thermal* dari generator, eksitasi, dan stabilitas rotor [9]. Di PLTU Cilacap Unit 3, pemahaman terhadap kurva kemampuan ini sangat penting untuk memastikan generator beroperasi dalam batas aman dan efisien seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, serta Tabel 3 dan Tabel 4 mengenai batasan daya reaktif. Dengan mengevaluasi kurva kemampuan generator, operator dapat menentukan apakah penyerapan MVAR berada pada tingkat optimal serta melakukan penyesuaian eksitasi jika diperlukan untuk menghindari kondisi operasional yang tidak stabil atau berisiko tinggi [11].



Gambar 3. Curva capability generator pltu cilacap 3 [11]

Tabel 3. *Limit over reactive power*

Aktif Power (P) MW	Reaktif Power (Q) MVAR
0	490
110	488
220	477
330	466
440	449
550	431
630	390

Tabel 4. *Limit underexcitation*

Aktif Power (P) MW	Reaktif Power (Q) MVAR
0	-278
110	-278
220	-275
330	-260
440	-245
550	-231
630	-210

2.4. *Exciter system*

Sistem eksitasi merupakan komponen penting dalam pengoperasian generator karena berfungsi untuk menyediakan arus eksitasi ke medan magnet rotor. Di PLTU Cilacap Unit 3, sistem eksitasi modern digunakan untuk mengatur besarnya daya reaktif yang dihasilkan oleh generator spesifikasi peralatan *exciter transformer* diperlihatkan pada Tabel 5 dan spesifikasi peralatan *exciter panel* ditunjukkan pada Tabel 6. Penggunaan sistem eksitasi otomatis memungkinkan pengaturan yang lebih akurat terhadap tegangan terminal generator dan penyerapan MVAR. Sistem eksitasi juga berperan dalam menjaga stabilitas tegangan pada saat perubahan beban, fluktuasi tegangan, atau gangguan mendadak pada jaringan transmisi. Pengoptimalan eksitasi ini menjadi kunci dalam meningkatkan penyerapan MVAR dan memperbaiki kinerja keseluruhan sistem kelistrikan.

Tabel 5. Spesifikasi *exciter transformer*

<i>Exciter transformer</i>	
Type	ZLSCB-7200/22
Rated Capacity	7200 KVA
Rated voltage HV side	20 kV
Rated voltage LV side	0.95 kV
Rated current HV side	189 A
Rated current LV side	4375.7A
Wiring group	Yd11
Cooling	AN
Manufacture	Hain jinon electric co. LTD

Tabel 5. Spesifikasi *exciter panel*

<i>Exciter panel</i>	
Type	Static excitation system
Brand	ABB Unitro 6800

Model	T6S-0/U261-S6000
No load field current	1497 A
No load field voltage (75°C)	150 V
Rated field current	4669 A
Rated field voltage (90°C)	491 V

2.5. Daya Listrik

Daya listrik yang dihasilkan oleh PLTU Cilacap Unit 3 terdiri dari daya aktif, yang digunakan untuk menggerakkan beban nyata, dan daya reaktif, yang diperlukan untuk membentuk medan magnet dalam komponen-komponen sistem kelistrikan. Daya aktif disuplai kepada konsumen untuk berbagai keperluan sehari-hari, sedangkan daya reaktif berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan dalam jaringan listrik. Hubungan antara daya aktif dan reaktif perlu dikelola dengan baik untuk memastikan bahwa sistem listrik dapat beroperasi dengan stabil tanpa fluktuasi tegangan yang ekstrem. Penyerapan MVAR yang optimal oleh generator sangat penting untuk menjaga keseimbangan ini, terutama dalam sistem transmisi tegangan tinggi.

2.6. Electrical Transient and Analysis Program (ETAP)

ETAP adalah perangkat lunak simulasi dan analisis sistem kelistrikan yang digunakan untuk memodelkan, mensimulasikan, dan mengevaluasi kinerja jaringan listrik [12]. Dalam konteks PLTU Cilacap Unit 3, ETAP digunakan untuk menganalisis perilaku generator dalam penyerapan MVAR serta memodelkan interaksi antara generator, transformator, dan jaringan transmisi. Dengan menggunakan ETAP, tim teknis dapat memprediksi respons sistem terhadap berbagai kondisi operasional dan skenario beban, serta mengoptimalkan pengaturan eksitasi guna memperbaiki penyerapan MVAR. Simulasi ETAP juga memungkinkan identifikasi potensi masalah pada sistem kelistrikan dan membantu dalam pengambilan keputusan terkait perbaikan dan optimasi sistem.

2.7. Sistem pemodelan dalam ETAP

Pada pemodelan ini dalam transmisi 500kV di PLTU Cilacap terdiri dari 2 unit seperti diperlihatkan pada Gambar 2, dengan kapasitas 1000MW selanjutnya disebut dengan generator unit 4. Pada generator unit 4 ini akan beroperasi pada mode “Swing”, dan unit 3 disebut dengan generator 3 yang akan beroperasi pada mode “Mvar Control”. Pengujian akan berfokus pada generator unit 3, pengaturan MVAR akan dilakukan secara langsung pada *synchronous generator editor*. Pengaturan Mvar unit disesuaikan dengan *curva capability generator*, naik dan turunnya tegangan transmisi akan di pengaruhi oleh pemodelan dari *lumped load 1* dan *lumped load 2* yang merepresentasikan kondisi beban transmisi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimalisasi penyerapan MVAR pada PLTU Cilacap unit 3 menggunakan software ETAP untuk melakukan pemodelan dari kemampuan generator PLTU Cilacap unit 3 dalam memproduksi atau menyerap MVAR. Tujuannya adalah menjaga kestabilan sistem transmisi 500 KV jalur selatan Jawa-Bali, serta mengetahui batasan operasi yang aman bagi tegangan internal terutama pada internal unit. Analisa ini akan memodelkan kondisi transmisi pada beberapa skenario beban sebagai berikut, yaitu pada saat:

1. Beban jaringan pada 100% dengan daya unit 630 MW gross dan 815 MW per transmisi, serta daya reaktif pada 121 Mvar tiap line transmisi
2. Beban jaringan pada 75% dengan daya unit 550 MW gross dan 700 MW per transmisi, serta daya reaktif 90 Mvar tiap line transmisi
3. Beban jaringan pada 50% dengan daya unit 450 MW gross dan 600 MW per transmisi, serta daya reaktif pada 75 Mvar tiap line transmisi
4. Beban jaringan pada 25% dengan daya unit 300 MW gross dan 400 MW per transmisi, dan daya reaktif pada 50 Mvar tiap line transmisi

Simulasi menggunakan ETAP dilakukan untuk memodelkan aliran daya (*load flow*) dan melihat kemampuan generator unit 3 dalam menyerap MVAR pada Gambar 3. Simulasi juga dilakukan dengan mengubah beban transmisi (*lumped load*) melalui penyesuaian parameter daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), dan tegangan transmisi diamati di sisi *gas insulation switch* (GIS).

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 20 Tahun 2020 tentang “Aturan Penyambungan” (CC 3.2) batas variasi tegangan pada sistem 500 kV dalam kondisi normal adalah $\pm 5\%$ [13]. Jika dalam simulasi tegangan transmisi naik melebih batas tersebut, maka dispatch center akan meminta unit pembangkit untuk mengurangi daya reaktif guna memperbaiki profil tegangan transmisi, sambil tetap memperhatikan batasan aman untuk unit pembangkit.

Selanjutnya, hasil dari berbagai skenario simulasi akan dibahas lebih rinci di bagian berikut, termasuk analisa kemampuan generator dalam penyerapan dan mengatur MVAR untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi 500kV.

3.1. Simulasi beban 100 % di beban 630 MW

Pada simulasi pembebahan 100% dibeban 630 MW gross, dengan beban jaringan tiap transmisi line 1 dan line 2 sebesar 810 MW serta beban reaktif sebesar 121 MVAR. Hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Simulasi beban 100% beban 630 MW gross

Line (KV)	OEL / UEL (MVAR)	PF	V Gen (KV)	I Gen (A)	Cap (MVA)	3B Sec (KV)	3A Sec (KV)	FGD A/B (KV)	Gen Conditio n	Remark
523	406	0.85	21,25	20133	740,9	6,61	6,6	6,51	Over Excited	Normal operasi
520	322	0.90	20,89	19551	707,5	6,49	6,48	6,4	Over load	Normal operasi
510,2	126	0.98	19,80	18737	642,5	6,14	6,13	6,05	Over load	Normal operasi
502,8	0	1	19,02	19123	630	5,9	5,88	5,8	Over load	Under Voltage
493,7	-140	0.98	18,07	20621	645,4	5,59	5,58	5,49	Over load	Under Voltage
488,7	-210	0.95	17,55	21849	664,1	5,42	5,41	5,32	Over load	Under Voltage
483,3	-280	0.90	16,99	23433	689,4	5,24	5,23	5,14	Under Excited	Under Voltage

Pada tabel diatas, data menunjukkan hasil simulasi operasi generator pada Unit 3 dengan beban 630MW gross serta beban transmisi di saluran L1 dan L2. Variabel seperti daya keluaran (V Gen), arus keluaran (I Gen), kapasitas (Cap), dan kondisi operasional generator diukur pada berbagai faktor daya (PF). Data ini penting untuk memahami performa dan batasan operasional generator, terutama terkait potensi risiko yang muncul saat kondisi over excited, under voltage, atau overload.

Analisis Dampak Risiko:

1. Over Excited pada PF 0,85: Pada kondisi ini, generator menunjukkan tegangan dan arus keluaran yang tinggi (Vout Gen: 21,25 kV, Iout Gen: 20133 A), yang mengindikasikan potensi peningkatan temperatur dan tekanan pada sistem. Ini berisiko merusak isolasi dan mempercepat keausan komponen.
2. Overload pada PF 0,90 - 1: Kondisi ini terjadi ketika generator beroperasi di atas kapasitasnya yang aman, mengakibatkan arus dan daya yang tinggi, khususnya di beban maksimum (Cap: 707,5 MVA dan 630 MVA). Hal ini menambah tekanan mekanis pada generator, meningkatkan risiko overheating, kerusakan komponen, dan gangguan operasional.
3. Under Voltage pada PF 0,98 - 1: Ketika tegangan keluaran generator menurun, ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pasokan daya. Under voltage juga dapat menyebabkan arus lebih tinggi untuk mempertahankan daya yang dibutuhkan, meningkatkan beban pada sistem transmisi dan menambah risiko kegagalan peralatan.
4. Under Excited pada PF 0,90 (Vout Gen 483,3 kV): Ini menunjukkan bahwa generator tidak menerima eksitasi yang cukup, mengakibatkan tegangan dan arus yang lebih rendah dari normal. Risiko dalam kondisi ini adalah generator mungkin tidak mampu mempertahankan beban sesuai kebutuhan, yang dapat menyebabkan gangguan layanan dan potensi kerusakan pada sistem jika tidak ditangani dengan tepat.

3.2. Simulasi beban 75 % di beban 550 MW

Pada simulasi pembebanan 75% dibeban 550 MW gross, dengan beban jaringan tiap transmisi line 1 dan line 2 sebesar 700 MW serta beban reaktif sebesar 90 MVAR. Hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Simulasi beban 100% beban 630 MW gross

Line (KV)	OEL / UEL (MVAR)	PF	V Gen (KV)	I Gen (A)	Cap (MVA)	3B Sec (KV)	3A Sec (KV)	FGD A/B (KV)	Gen Condition	Remark
530,3	420	0.80	21,6	18498	692	6,72	6,71	6,63	Over Excited	Normal operasi
526,3	336	0.85	21,17	17575	644,5	6,58	6,57	6,49	Normal	Normal
523,4	276	0.90	20,86	17035	615,4	6,48	6,47	6,39	Normal	Normal
514,7	112	0.95	19,94	16250	561,3	6,19	6,18	6,1	Normal	Normal
508,3	0	1	19,27	16482	550	5,97	5,96	5,88	Normal	Under Voltage
501,4	-112	0.98	18,54	17483	561,3	5,74	5,73	5,64	Normal	Under Voltage

496,8	-182	0.95	18,04	18536	579,3	5,58	5,57	5,48	Normal	Under Voltage
491,8	-252	0.90	17,52	19935	605	5,42	5,4	5,32	Under Excited	Under Voltage
485,3	-336	0.85	16,84	22097	644,5	5,2	5,18	5,09	Under Excited	Under Voltage

Analisis dampak resiko:

1. Over Excited pada PF 0,80 (530,3 kV): Generator menunjukkan tegangan tinggi dengan Iout sebesar 18.498 A dan daya kapasitif 692 MVA. Kondisi *over excited* ini dapat meningkatkan risiko overheating pada rotor, memperpendek usia isolasi, dan mengurangi efisiensi operasi jangka panjang. Jika tidak diatasi, kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan internal yang serius.
2. Normal Operation (PF 0,85-0,95): Pada faktor daya antara 0,85 hingga 0,95, generator beroperasi dengan arus dan tegangan yang lebih stabil, dengan kapasitas antara 550 hingga 615,4 MVA. Ini merupakan kondisi optimal, yang menandakan stabilitas sistem dan performa yang baik tanpa adanya tekanan berlebihan pada komponen generator.
3. Under Voltage pada PF 0,98 dan di bawahnya: Pada tegangan keluaran yang lebih rendah, terutama pada 501,4 kV ke bawah, generator beroperasi pada kondisi *under voltage*. Ini meningkatkan arus untuk mempertahankan daya yang dibutuhkan, menyebabkan beban lebih tinggi pada peralatan dan berisiko mempercepat keausan pada generator serta sistem distribusi.
4. Under Excited pada PF 0,85 (485,3 kV): Pada kondisi *under excited*, arus keluaran mencapai 22.097 A dengan kapasitas 644,5 MVA. Kondisi ini menunjukkan kurangnya eksitasi, yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan tegangan dan mengurangi kemampuan generator untuk mempertahankan beban, terutama dalam kondisi operasional yang kritis.

3.3. Simulasi beban 50 % di beban 450 MW

Pada simulasi pembebanan 50% dibeban 450 MW gross, dengan beban jaringan tiap transmisi line 1 dan line 2 sebesar 600 MW serta beban reaktif sebesar 75 MVAR. Hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Simulasi beban 50% beban 450 MW gross

Line (KV)	OEL / UEL (MVAR)	PF	V Gen (KV)	I Gen (A)	Cap (MVA)	3B Sec (KV)	3A Sec (KV)	FGD A/B (KV)	Gen Conditio n	Remark
536	476	0.70	22	17189	655	6,85	6,84	6,76	Over Excited	Normal operasi
530	350	0.80	21,38	15396	570,1	6,65	6,64	6,56	Normal	Normal
526	280	0.85	21,02	14560	530	6,53	6,52	6,44	Normal	Normal
523,9	224	0.90	20,72	14008	502,7	6,44	6,43	6,34	Normal	Normal
516,6	84	0.98	19,93	13259	457,8	6,19	6,18	6,09	Normal	Normal
511,8	0	1	19,43	13371	450	6,03	6,02	5,93	Normal	Under Voltage
502,5	-154	0.98	18,43	14898	475,6	5,71	5,7	5,61	Normal	Under Voltage
497,8	-224	0.95	17,94	16180	502,7	5,55	5,54	5,45	Normal	Under Voltage
492,8	-294	0.90	17,41	17828	537,5	5,38	5,37	5,28	Under excited	Under Voltage
491,6	-310	0.85	17,28	18257	546,4	5,34	5,33	5,24	Under excited	Under Voltage
488,5	-350	0.80	16,95	19413	570,1	5,23	5,22	5,13	Under excited	Under Voltage

Analisis Dampak Risiko:

1. Over Excited pada PF 0,85: Pada kondisi ini, generator menunjukkan tegangan dan arus keluaran yang tinggi (Vout Gen: 21,25 kV, Iout Gen: 20133 A), yang mengindikasikan potensi peningkatan temperatur dan tekanan pada sistem. Ini berisiko merusak isolasi dan mempercepat keausan komponen.
2. Overload pada PF 0,90 - 1: Kondisi ini terjadi ketika generator beroperasi di atas kapasitasnya yang aman, mengakibatkan arus dan daya yang tinggi, khususnya di beban maksimum (Cap: 707,5 MVA dan 630 MVA). Hal ini menambah tekanan mekanis pada generator, meningkatkan risiko overheating, kerusakan komponen, dan gangguan operasional.
3. Under Voltage pada PF 0,98 - 1: Ketika tegangan keluaran generator menurun, ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pasokan daya. Under voltage juga dapat menyebabkan arus lebih tinggi untuk mempertahankan daya yang dibutuhkan, meningkatkan beban pada sistem transmisi dan menambah risiko kegagalan peralatan.
4. Under Excited pada PF 0,90 (Vout Gen 483,3 kV): Ini menunjukkan bahwa generator tidak menerima eksitasi yang cukup, mengakibatkan tegangan dan arus yang lebih rendah dari normal. Risiko dalam kondisi ini adalah generator mungkin tidak mampu mempertahankan beban sesuai kebutuhan, yang dapat menyebabkan gangguan layanan dan potensi kerusakan pada sistem jika tidak ditangani dengan tepat.

3.4. Simulasi beban 25 % di beban 300 MW

Pada simulasi pembebanan 25% dibeban 300 MW gross, dengan beban jaringan tiap transmisi line 1 dan line 2 sebesar 400 MW serta beban reaktif sebesar 50 MVAR. Hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Simulasi beban 25% beban 300 MW gross

Line (KV)	OEL / UEL (MVAR)	PF	V Gen (KV)	I Gen (A)	Cap (MVA))	3B Sec (KV)	3A Sec (KV)	FGD A/B sectio n (KV)	Gen Conditi on	Remark
533,5	304	0.70	21,37	11541	427,1	6,64	6,63	6,55	Normal	Normal operasi
529,7	224	0.80	20,95	10317	374,4	6,51	6,5	6,42	Normal	Normal
528,3	196	0.85	20,8	9946	358,4	6,46	6,45	6,37	Normal	Normal
525,5	140	0.90	20,5	9325	331,1	6,37	6,36	6,27	Normal	Normal
521	56	0.98	20,02	8800	305,2	6,22	6,21	6,12	Normal	Normal
518	0	1	19,69	8795	300	6,11	6,1	6,02	Normal	Normal
514,8	-56	0.98	19,35	9105	305,2	6	5,99	5,91	Normal	Under Voltage
512,4	-96	0.95	19,1	9521	315	5,92	5,91	5,82	Normal	Under Voltage
509,8	-140	0.90	18,82	10158	331,1	5,83	5,82	5,73	Normal	Under Voltage
506,3	-196	0.85	18,44	11220	358,4	5,71	5,7	5,61	Normal	Under Voltage
504,5	-224	0.80	18,24	11848	374,4	5,65	5,64	5,55	Normal	Under Voltage
499	-304	0.70	17,66	13962	427,1	5,46	5,45	5,36	Under Excited	Under Voltage

Analisis Risiko Terhadap Generator:

- Operasi Normal pada Transmisi Tinggi (529,7 - 533,5 kV): Pada tegangan ini, generator beroperasi dengan faktor daya rendah hingga menengah (0,7 - 0,85) dan menghasilkan kapasitas di bawah 430 MVA. Kondisi ini tergolong stabil, tanpa beban berlebih yang signifikan pada generator, yang mendukung operasi yang aman.
- Under Voltage pada Transmisi Menurun (di bawah 512,4 kV): Saat tegangan turun di bawah 512,4 kV, generator mulai menunjukkan risiko under voltage, yang menyebabkan arus meningkat untuk mempertahankan daya keluaran. Ini dapat mempengaruhi keandalan generator dan mempercepat keausan pada komponen, meningkatkan risiko kegagalan operasional.
- Under Excited pada Transmisi Terendah (499 kV): Kondisi under excited pada faktor daya 0,7 dan transmisi rendah menyebabkan generator bekerja pada arus yang tinggi (13.962 A), meningkatkan kemungkinan overheating dan degradasi isolasi jika dibiarkan dalam waktu lama.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah dilakukan simulasi analisis, hasil menunjukkan bahwa generator pada PLTU Cilacap Unit 3 masih mampu melayani permintaan MVAR dalam berbagai kondisi beban. Namun, pada kondisi MVAR yang rendah, terjadi kecenderungan penurunan tegangan di sisi Unit Auxiliary Transformer (UAT), khususnya pada trafo FGD UAT. Penurunan tegangan ini berpotensi menyebabkan gangguan stabilitas, yang dalam kondisi ekstrem

dapat mengakibatkan trip unit atau gangguan operasional lainnya. Oleh karena itu, pemantauan tegangan dan eksitasi generator secara berkala sangat diperlukan untuk mencegah risiko tersebut

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Sullivan, "Controlling Generator MVAR Loadings Using a Static Optimization Technique," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-91, no. 3, pp. 906–910, May 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293438.
- [2] C. J. Parker, I. F. Morrison, and D. Sutanto, "Application of an optimisation method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1473–1481, Aug. 1996, doi: 10.1109/59.535688.
- [3] R. El-Sehiemy, A. Elsayed, A. Shaheen, E. Elattar, and A. Ginidi, "Scheduling of Generation Stations, OLTC Substation Transformers and VAR Sources for Sustainable Power System Operation Using SNS Optimizer," *Sustainability*, vol. 13, no. 21, p. 11947, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132111947.
- [4] G. J. Nolan, D. E. Winge, and B. S. Swartley, "Estimation of Reactive Power Export and Import Capability for Non-Utility Generators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 6, 1997.
- [5] M. Awais, W. Irfan, N. Zareen, and I. Ahmed, "Transient Stability Analysis of an HPR-1000 Power Plant using ETAP Software," *Pak. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 23–27, Jun. 2022, doi: 10.51846/vol5iss2pp23-27.
- [6] D. Mitra, M. P. Sharma, T. Suman, and B. Vyas, "Identification & Reduction Of Circulating Mvar Loops At High Voltage Substations," in *2020 21st National Power Systems Conference (NPSC)*, Gandhinagar, India: IEEE, Dec. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/NPSC49263.2020.9331763.
- [7] "Hase et al. - 2020 - Power system dynamics with computer-based modeling.pdf."
- [8] B. M. Weedy, C. B.J, J. N, E. J.B, and S. G, *Electrical Power System*, Fifth Edition. United Kingdom: Wiley [u.a.], 2012.
- [9] Y. Hase, "Handbook of Power System Engineering".
- [10] "F02092Z-D0101-01 SLD OF ELECTRICAL MAIN CONNECTION.pdf."
- [11] "38. 448_Curva Generator PLTU Cilacap 3.pdf."
- [12] "etap-16-1-overview.pdf."
- [13] "PM ESDM No 20 Tahun 2020 (Grid Code).pdf."