

Analisis Kondisi Tunak Pada Uji Line Charging Gas Turbine Generator 2.1 PLTGU Grati PT PLN Indonesia Power

Muhammad Hafizh Ridho^{1)}; Erwin Setyawan¹*

1. PT PLN Indonesia Power, PLTGU Grati, Jl. Raya Surabaya – Probolinggo No.KM. 73, Pasir Panjang, Wates, Lekok, Pasuruan, Jawa Timur 67186, Indonesia

**)Email: muhammad.hafizh@plnindonesiapower.co.id*

ABSTRACT

Gas Turbine Generator is an energy conversion engine to electric which is utilizing air as its working fluid. One of the advantages that owned by Gas Turbine Generator is to be utilized as a black start unit while happening black out. Grati Combined Cycle Power Plant unit GTG 2.1 owned by PT PLN Indonesia Power is planned to be able to do black start. The plan is to do line charging on Grati Substation until Paiton Substation through the 150 kV transmission line along 104,91 kms. The result of GTG 2.1 line charging performance showd that GTG 2.1 doing line charging until Paiton Substation in 47 minutes by the end condition of Paiton Substation voltage recorded 151 kV, generator voltage 9,76 kV, active power 0,36 MW and reactive power recorded -11,12 Mvar (leading). By the ability of GTG 2.1 to generate 100 MW active power and 60 Mvar (lagging) and -60 Mvar (leading) reactive power, line charging test of Grati Combined Cycle Power Plant unit GTG 2.1 is declared successful.

Keywords: *black start, line charging, Ferranti's effect, reactive power, leading*

ABSTRAK

Gas Turbine Generator merupakan mesin konversi energi listrik yang memanfaatkan udara sebagai fluida kerjanya. Kelebihan yang dimiliki oleh Gas Turbine Generator salah satunya yaitu dapat dimanfaatkan sebagai unit black start manakala terjadi pemadaman total. PLTGU Grati unit GTG 2.1 PT PLN Indonesia Power direncanakan untuk dapat melakukan black start. Perencanaan yang akan dilakukan di antaranya melaksanakan line charging pada GI Grati sampai ke GI Paiton melalui saluran transmisi 150 kV sepanjang 104,91 kms. Hasil uji line charging GTG 2.1 PLTGU Grati menunjukkan bahwa GTG 2.1 melakukan line charging sampai ke Gardu Induk (GI) Paiton selama 47 menit dengan kondisi akhir tegangan pada GI Paiton terbaca 151 kV, tegangan generator 9,76 kV, daya aktif 0,36 MW dan daya reaktif turun menjadi -11,12 Mvar (leading). Dengan kemampuan GTG 2.1 membangkitkan daya aktif sebesar 100 MW dan daya reaktif sebesar 60 Mvar (lagging) dan -60 Mvar (leading), uji line charging GTG 2.1 PLTGU Grati dinyatakan berhasil.

Kata kunci: *black start, line charging, efek Ferranti, daya reaktif, leading*

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik di Pulau Jawa merupakan sistem tenaga listrik yang telah terintegrasi satu dengan yang lainnya, yang menghubungkan sistem pembangkitan, transmisi dan distribusinya menjadi kesatuan yang saling mempengaruhi. Maka setiap gangguan yang terjadi di satu titik akan mempengaruhi kinerja di bagian yang lainnya. Pada tanggal 4 Agustus 2019 terjadi gangguan pada sistem transmisi yang mengakibatkan listrik padam (*black out*) di sejumlah wilayah di Jakarta, Banten, Jawa Barat dan sebagian Jawa Tengah. Disebutkan bahwa gangguan berasal dari transmisi di Ungaran dan Pemalang 500 kV yang berujung kegagalan transfer energi dari wilayah timur ke barat. Pemulihan total yang dilakukan oleh PLN cenderung lama dikarenakan proses *line charging* yang cukup panjang dan besarnya *load demand* dibandingkan *load supply* yang ada.

Dengan adanya peristiwa tersebut, PT PLN (Persero) mencanangkan program *anti-black out* di mana salah satunya mendedikasikan PLTGU Grati untuk membangun *defence scheme* subsistem Grati – Paiton agar pemulihan jaringan dapat lebih cepat dilakukan, dengan menjadikan unit *Gas Turbine Generator* (GTG) nya sebagai unit *black start*. Oleh karena itu PT PLN Indonesia Power PLTGU Grati menjadikan salah satu mesin pembangkitnya yaitu GTG 2.1 yang berkapasitas 100 MW sebagai unit *black start*. Unit GTG 2.1 diuji melakukan *line charging* saluran transmisi 150 kV sepanjang 104,91 kms hingga ke *Station Service Transformer* PLTU Paiton 9, serta pembebanan untuk menyuplai daya ke *auxiliary equipment* PLTU tersebut dalam proses *start-up* nya.

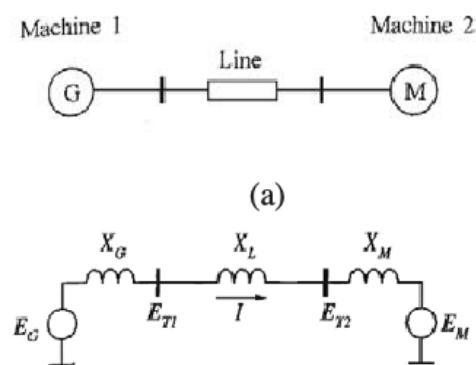
Jurnal ini membahas pelaksanaan *line charging* GTG 2.1 PLTGU Grati dari GITET Grati sampai dengan GI Paiton dan menganalisis kondisi tunak (*steady state*) kapabilitas GTG 2.1 dalam melakukan *line charging*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Black Start

Black start adalah proses pemulihan operasi pembangkit listrik tanpa mengandalkan sumber energi listrik dari eksternal. Saat terjadinya pemadaman listrik total (*blackout*), tidak ada sumber energi listrik di jaringan listrik manapun. Pembangkit-pembangkit listrik konvensional pada umumnya memerlukan suplai listrik dari luar untuk proses *start-up* sebelum menghasilkan energi listrik sendiri. Namun ada jenis pembangkit tenaga listrik yang mampu melakukan *start-up* tanpa memerlukan suplai listrik eksternal yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan PLTMG (*Diesel Engine Generator*).

Model *black start* sederhana dapat diilustrasikan dengan dua buah mesin (generator dan motor) yang thumbing via saluran transmisi atau kabel, yang digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Model black start yang sederhana

Daya aktif yang dikirimkan oleh unit *black start* ke motor sinkron adalah:

$$P_e = (E_g \cdot E_m \sin \delta) / X_T \dots\dots\dots(1)$$

di mana X_T merupakan penjumlahan reaktansi dari reaktansi generator (X_G), reaktansi saluran transmisi (X_L) dan reaktansi motor/ beban (X_M).

Dalam hal melakukan *black start*, ada beberapa hal yang harus menjadi perhatian terkait pemulihan jaringan yang padam total, yaitu fenomena tegangan lebih transien akibat pensaklaran (*switching*), tegangan lebih pada kondisi stabil (*steady-state*) dan *self-excitation* yang mempengaruhi area generator. Pada fenomena tegangan lebih, pada kondisi *steady-state* dipengaruhi oleh panjang saluran, tegangan akhir penerima (V_r) tanpa beban dan konstanta rambatan (γ) yang diformulasikan sebagai berikut.

$$V = (V_r/2 \cdot e^{\gamma l}) + (V_r/2 \cdot e^{-\gamma l}) \dots\dots\dots(2)$$

Dengan pertimbangan bahwa pada regulasi kelistrikan “Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali” kondisi normal untuk tegangan sistem 150 kV yaitu +5% dan -10% dari tegangan nominal, untuk panjang maksimum saluran transmisi dapat dihitung sebagai berikut.

$$l = [\cos^{-1} (V_r/V_s)] / \beta \dots\dots\dots(3)$$

dengan $\beta = \omega \sqrt{L \cdot C}$ yang merupakan konstanta fasa, yaitu komponen imajiner dari konstanta perambatan untuk gelombang bidang, yang mewakili perubahan fase per satuan panjang di sepanjang jalur yang dilalui gelombang pada setiap saat dan sama dengan bagian nyata dari bilangan gelombang sudut gelombang.

2.2. Line Charging

Line charging merupakan pengisian arus oleh sebuah generator ke suatu saluran transmisi AC yang dalam kondisi kosong tegangan. Arus *charging* terdapat pada semua saluran transmisi dan kabel karena reaktansi kapasitif permanen dari konduktor tersebut. Jumlah arus *charging* pada suatu saluran bergantung pada level tegangan, panjang saluran, jarak antar konduktor dan jarak dari saluran ke tanah.

Pada kondisi jaringan yang padam, saluran transmisi yang kosong akan bersifat kapasitif. Maka saat sebuah generator melakukan pengisian saluran, generator akan menyerap daya reaktif sehingga nilai daya reaktif generator bernilai negatif, karena dalam hal ini generator bersifat induktif. Pada keadaan padam tersebut pula, *Generator Step-Up Transformer* (GSUT) juga memerlukan daya reaktif untuk proses magnetisasi transformator tersebut. Daya reaktif yang dibutuhkan pada transformator yaitu daya reaktif magnetisasi (Q_μ) dan daya reaktif kebocoran fluks (Q_x) atau dalam bentuk persamaan adalah sebagai berikut:

$$Q_{TR} = Q_\mu + Q_x \text{ (Mvar)} \dots\dots\dots(4)$$

Daya reaktif yang dibutuhkan pada proses magnetisasi transformator adalah seperti pada persamaan berikut:

$$Q_\mu = \sqrt{3} \cdot V_r^2 \cdot I_o^2 - P_{Fe}^2 = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot V_r I_r \cdot I_o/I_r)^2 - P_{Fe}^2} \text{ (5)}$$

Sedangkan untuk daya reaktif kebocoran fluks, dengan $x = I/I_r$ diperoleh dengan persamaan:

$$Q_x = x^2 \cdot Q_{x0} = x^2 \cdot \sqrt{[(V_{sc}/100 \cdot S_r)^2 - P^2 c_{ur}]} \dots\dots\dots(6)$$

Daya reaktif pada saluran transmisi juga perlu dipertimbangkan saat melakukan pengisian jaringan. Dengan panjang saluran, diameter saluran, konfigurasi konduktor dan sebagainya akan mempengaruhi daya reaktif yang dikirim atau diserap oleh generator.

Pada saluran tiga fasa, besar kapasitansi saluran transmisi adalah:

$$C = \frac{0,0556}{\ln GMD/r} \text{ (}\mu\text{F/km)} \dots\dots\dots(7)$$

GMD (*Geometric Mean Distance*) diperoleh melalui persamaan:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}} \dots \dots \dots (8)$$

Saluran transmisi yang kosong tersebut mengandung reaktansi kapasitif akibat kapasitansi:

$$X_c = \frac{6,6 \times 10^6}{f} \ln \frac{1}{r} + \frac{6,6 \times 10^6}{f} \ln D \text{ (}\Omega/\text{km)} \dots \dots \dots (9)$$

Arus pengisian (*charging current*) saluran tiga fasa akan dipengaruhi oleh kapasitansi saluran dan tegangan saluran:

$$I_{chg} = \frac{V_{an}}{-j/\omega C_n} = j \omega C_n V_{an} \text{ (Amp)} \dots \dots \dots (10)$$

Daya reaktif total yang disuplai oleh ke tiga fasa adalah:

$$Q_{cap} 3\phi = 3\omega C_{ph} V_{ph}^2 = \omega C_{ph} V_{L-L}^2 \text{ (var)} \dots \dots (11)$$

2.3. Efek Ferranti

Efek Ferranti merupakan efek yang mana tegangan pada ujung penerima suatu saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan pada sisi pengirim. Efek tersebut terutama terjadi karena beban yang rendah atau tidak berbeban di sisi ujung penerima. Efek Ferranti disebabkan oleh arus pengisian (*charging current*) pada saluran transmisi. Saat tegangan diberikan pada ujung pengirim, arus yang ditarik oleh kapasitansi saluran lebih besar dari arus yang terkait dengan beban. Jadi, tanpa beban atau beban rendah, tegangan pada ujung penerima cukup besar dibandingkan dengan tegangan konstan pada ujung pengirim. Pada jaringan transmisi saluran udara (*overhead*), hubungan tegangan sisi pengirim (V_s) dan sisi ujung penerima (V_r) akibat efek Ferranti digambarkan dengan formula sebagai berikut:

$$V_s - V_r = -[(4\pi^2)/18] \times 10^{-16} f^2 l^2 V_r \dots \dots \dots (12)$$

Dengan $\omega = 2\pi f$, terlihat bahwa ($V_s - V_r$) negatif yang berarti bahwa V_r lebih besar dari V_s , di mana hal tersebut menunjukkan bahwa efek Ferranti bergantung pada frekuensi tegangan dan panjang saluran transmisi.

2.4. Kapabilitas Gas Turbine Generator

Gas Turbine Generator merupakan generator yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak mulanya. Adapun turbin gas sendiri merupakan mesin konversi energi yang menggunakan udara sebagai fluida kerjanya. Kapabilitas generator merupakan gambaran kemampuan generator dalam kerjanya memikul beban daya. Tiap generator memiliki karakteristik yang berbeda, yang mana hal tersebut mempengaruhi fungsi dan penggunaannya dalam sistem tenaga listrik.

Penggambaran suatu kapabilitas *Gas Turbine Generator* dapat diperoleh dari beberapa parameter:

1. Daya Mekanik Penggerak Mula

Daya yang dibangkitkan oleh penggerak mula berhubungan dengan kemampuan turbin dalam mengkonversikan daya kinetik dari fluida yang memiliki tekanan dan temperatur tertentu, di mana terbatas pada kapasitas maksimum menurut persamaan sebagai berikut:

$$MP_{max} = T_{lim} \cdot \omega_m \dots \dots \dots (13)$$

Dalam diagram P-Q, kemampuan maksimum daya mekanis turbin ini yang merupakan konstanta k digambarkan dengan garis yang menunjuk pada daya aktif.

$$P = k \cdot S_{gNOM} \dots \dots \dots (14)$$

2. Arus Jangkar

Arus jangkar merupakan arus yang mengalir pada kumparan stator yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) pada terminal generator. Arus jangkar pada generator memiliki nilai

batasan maksimum yang menyesuaikan dengan kekuatan isolasi kumparannya, dengan batasan sebagai berikut:

$$P^2 + Q^2 = (V_t \cdot I_{\max})^2 \dots\dots\dots(15)$$

3. Arus Medan

Arus medan merupakan arus yang mengalir pada kumparan medan generator yang menghasilkan gaya gerak magnet (ggm) pada rotor yang berfungsi membangkitkan fluksi magnetik. Arus medan pada generator sinkron diperoleh dari sumber eksternal yang menggunakan sumber arus searah. Arus medan inilah yang mempengaruhi tegangan keluaran nominal generator.

4. Batasan *Steady-state*

Batasan kestabilan permanen berhubungan langsung dengan sudut (δ) pengiriman daya aktif maksimum. Pada beberapa kasus, untuk kestabilan dinamis diperhitungkan bahwa batasan kestabilan dari suatu mesin terjamin jika sudut tidak melebihi 90° (dalam praktiknya tidak terjadi).

5. Batasan Arus Eksitasi Minimum

Batasan arus eksitasi minimum ini dibangun di atas nol arus eksitasi tersebut untuk menghindari sumber arus searah beroperasi terbalik.

3. PEMBAHASAN

3.1. Peralatan Utama *Line Charging*

Peralatan utama pada proses *line charging* GTG 2.1 PLTGU Grati terdiri dari beberapa komponen yaitu:

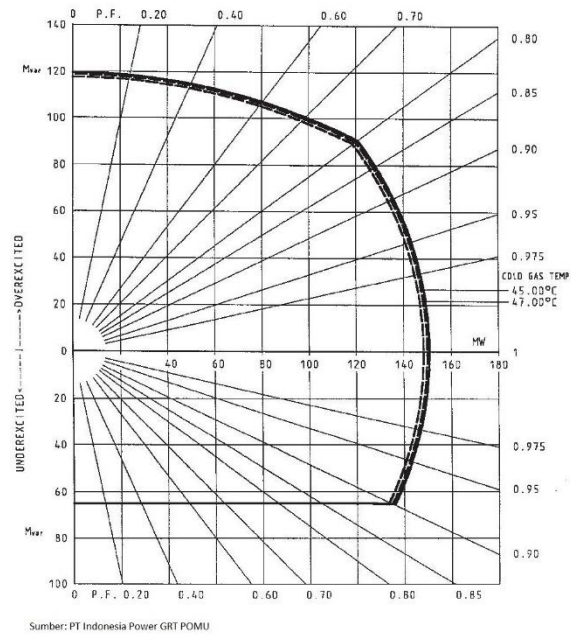
1. *Gas Turbine Generator* (GTG) 2.1;
2. *Generator Step Up Transformer* (GSUT) 2.1;
3. *Generator Circuit Breaker* (GCB) 2.1;
4. Saluran transmisi 150 kV GI Grati, Gondangwetan, Probolinggo, Kraksaan, Paiton beserta PMT nya;
5. *Station Service Transformer* (SST) Paiton.

Generator datasheet		
Description	Unit	Value
Manufacturer		Siemens AG
Type		TLRI 108/36
Prime Mover		Gas Turbine
Apparent Power	MVA	151
Active Power	MW	120,8
Rated Voltage	kV	10,5
Voltage variation range	V	± 525
Rated power factor		0,8
Rated frequency	Hz	50
Rated current	Amp	8303
Rated speed / overspeed	rpm	3000
Phase number / phase connection		YY / 54
generator inertia moment	kgm2	4742

Sumber: PT Indonesia Power GRT POMU

Gambar 2. Spesifikasi GTG 2.1 PLTGU Grati

Sementara itu, untuk kurva kapabilitas generator sangat dibutuhkan pada pengujian *line charging* dikarenakan daya yang dihasilkan oleh generator terutama daya reaktif akan menjadi perhatian khusus yang menyangkut kemampuan generator dalam merespon suatu bus yang kosong (*dead bus*).



Gambar 3. Kurva kapabilitas GTG 2.1 PLTGU Grati

Selain generator, terdapat pula sebuah *Generator Step Up Transformer* (GSUT) yang menjadi penghubung antara generator dengan saluran tegangan tinggi 150 kV Grati – Paiton.

TRANSFORMATOR GSUT		
Rating Data		
Item	Unit	Value
Type		TRUM 8252
Year of manufacture		1995
Rated apparent power	MVA	153,7
Voltage	kV	10,5 / 157,5
Current	A	8454 / 564
Impedance voltage at 153,75 MVA	%	12,8
Rated current (HV)	A	800
Max. voltage	kV	170
Vektor group symbol		YNd1
Rated frequency	Hz	50
No load current	%	0,15
No load losses	kW	72
Load losses at 75 deg.C	kW	510
Total losses	kW	582

Sumber: PT Indonesia Power GRT POMU

Gambar 4. Spesifikasi GSUT 2.1 PLTGU Grati

3.2. Simulasi Perhitungan *Line Charging*

Sebelum dilakukannya uji *line charging*, perlu diketahui gambaran kondisi dari keadaan sebenarnya. Maka diperlukan suatu simulasi untuk menggambarkan dan memprediksi kemungkinan yang akan terjadi terhadap uji *line charging* tersebut. Simulasi perhitungan yang dilakukan untuk membantu apakah uji *line charging* layak dan aman untuk dilaksanakan. Simulasi perhitungan tersebut mencakup tegangan sisi pengirim (*sending voltage*) yang mana sisi HV GSUT menjadi titiknya dan tegangan akhir (*receiving end voltage*) yang mana GI Paiton menjadi titiknya. Berikut adalah hasil simulasi perhitungannya.

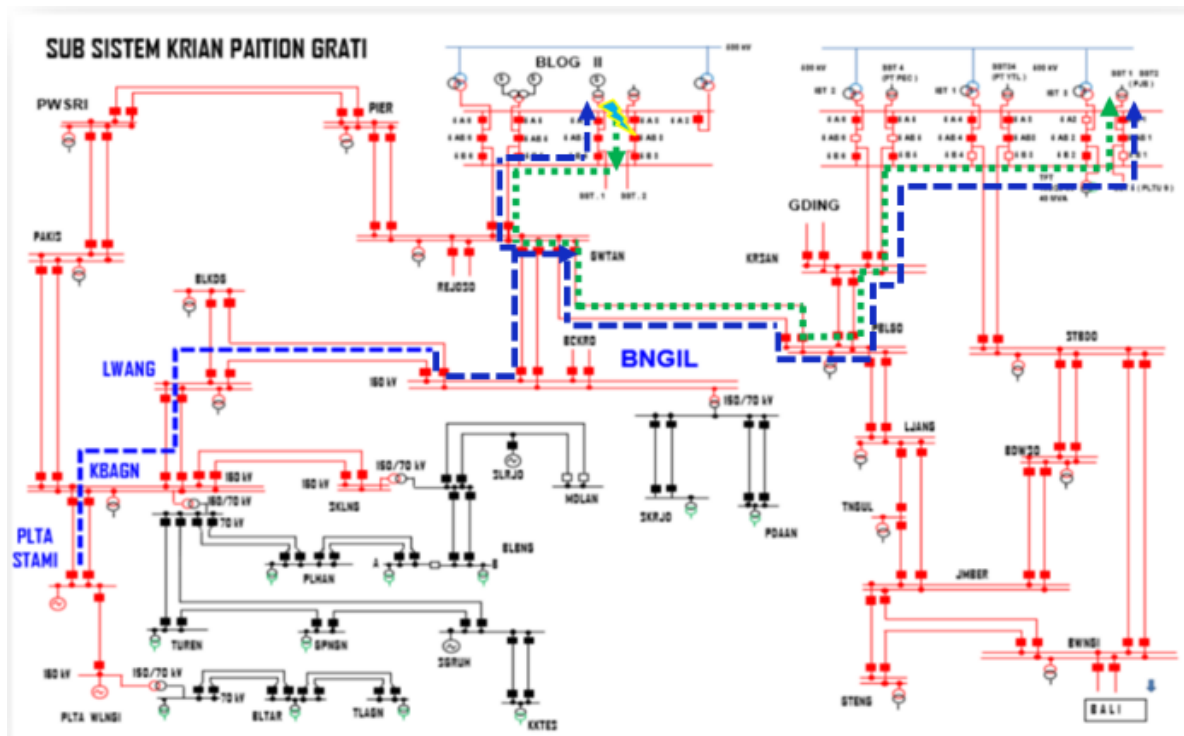
Tabel 1. Simulasi Tegangan Akhir Penerima *Line Charging*

Jarak Line Charging	Panjang Kumulatif (km)	Teg. Sisi HV trafo (kV)	Tegangan Akhir Penerima (kV)
GTG 21 - GI GRATI	0,29	157,50	157,50
GI GRATI - GDGWTN	21,359	157,50	157,54
GI GDGWTN - PRBLGO	55,186	157,50	157,76
GI PRBLGO - KRKSN	85,425	157,50	158,13
GI KRKSN - PAITON	105,2	157,50	158,46

Berdasarkan simulasi perhitungan di atas, terlihat jelas bahwa tegangan di ujung akhir penerima akan melebihi ambang batas yang diizinkan (*over voltage*). Hal ini dikarenakan tegangan sisi HV pada trafo sudah tinggi. Oleh karena itu perlu dilakukan penurunan tegangan generator agar tegangan di saluran 150 kV nantinya tidak *over voltage* dengan cara mengatur injeksi eksitasi pada generator.

3.3. Pelaksanaan *Line Charging*

Pelaksanaan *line charging* dilakukan di PT PLN Indonesia Power, PLTGU Grati unit GTG 2.1 bersama dengan PT PLN (Persero) UIT JBTB Probolinggo, UIP2B Jamali dan UP2B Jawa Timur pada tanggal 17 April 2022.



Gambar 5. Jalur line charging Grati – Paiton (garis hijau putus-putus)

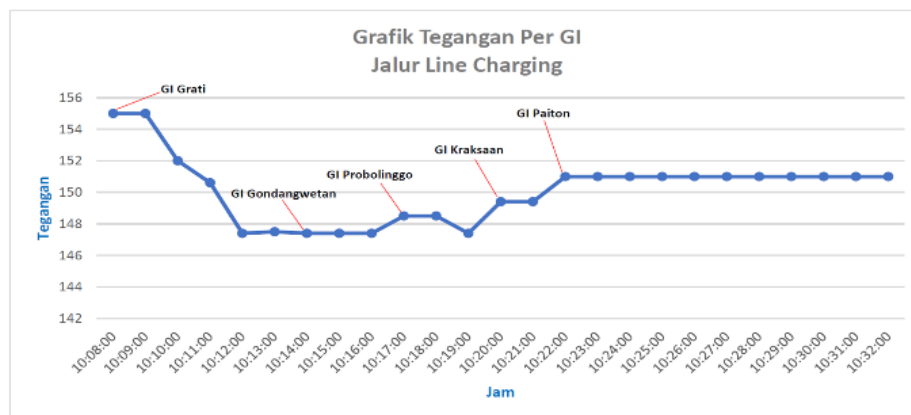
Pelaksanaan *line charging* GTG 2.1 PLTGU Grati melalui saluran transmisi 150 kV sepanjang 104,91 km dari Gardu Induk (GI) Grati, lalu melewati GI Gondangwetan, GI Probolinggo, GI Kraksaan dan berakhir di GI Paiton.

Secara singkat pelaksanaan *line charging* tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mengoperasikan GTG 2.1 sampai mencapai kondisi *Full Speed No Load* (FSNL) dari pukul 09:38 – 10:03 WIB (25 menit *start-up* GTG 2.1).
2. GTG 2.1 melakukan *dead bus closing* manual melalui PMT 5A4 pukul 10:08 WIB.
3. Setelah PMT 5A4 masuk, melanjutkan *line charging* ke line 150 kV Gondangwetan-2 melalui PMT 5A2 pukul 10:14 WIB.
4. Setelah *charging* ke line 150 kV Gondangwetan-2, *line charging* dilanjutkan ke line 150 kV Probolinggo-1 dan seterusnya ke line 150 kV Kraksaan-1 hingga ke line 150 kV Paiton-2 pukul 10:17 – 10:22 WIB.
5. *Line charging* ditahan selama 10 menit hingga pukul 10:32 WIB.
6. *Line charging* dinyatakan selesai dan GTG 2.1 diminta *shutdown* pukul 10:36 WIB.

4. HASIL PENGUJIAN

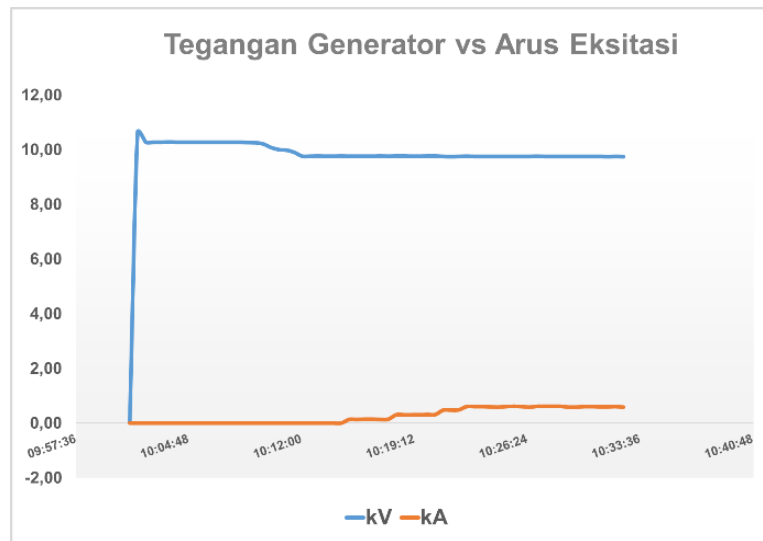
Hasil *line charging* menampilkan profil tegangan saluran transmisi 150 kV Grati – Paiton sebagai berikut.



Gambar 6. Profil tegangan sistem saat line charging

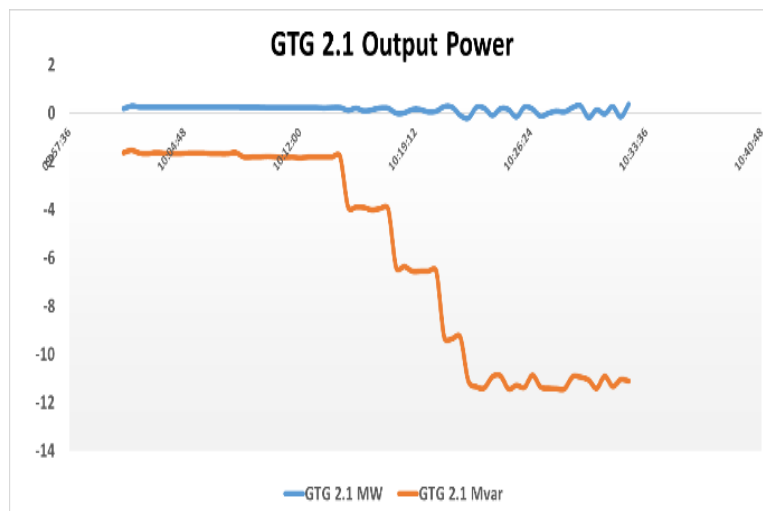
Seperti gambar di atas, terlihat bahwa tegangan sistem saat awal mula GTG 2.1 *line charging* ke GI Grati adalah 155 kV. Nilai tegangan ini hampir mendekati batas normal +5% yaitu 157,5 kV. Maka upaya yang dilakukan untuk menurunkan tegangan sistem yaitu dengan menurunkan tegangan di generator dengan cara menurunkan arus eksitasi. Hal ini mengakibatkan daya reaktif generator menjadi lebih rendah, di mana yang semula -1,82 Mvar menjadi -3,9 Mvar dan tegangan di GI Grati kemudian terbaca 147,7 kV. Kemudian tegangan sistem berangsur-angsur naik seiring bertambah panjangnya *line charging* hingga sampai di GI Paiton tegangan terbaca 151 kV.

Dari sisi generator, tegangan generator saat pertama kali *dead bus closing* terbaca 10,28 kV pada pukul 10:08:00 yang kemudian diturunkan hingga 9,77 kV terkait tegangan di GI Grati terbaca 155 kV. Tegangan generator relatif stabil saat *line charging* hingga ke GI Paiton dengan pembacaan terakhir 9,76 kV pukul 10:32:00.



Gambar 7. Profil tegangan dan arus eksitasi generator

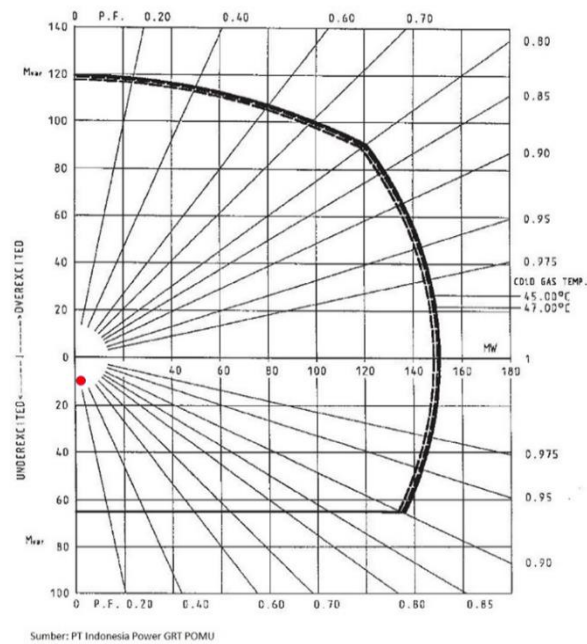
Line charging GTG 2.1 juga turut mempengaruhi profil daya keluaran generator. Dengan kondisi jaringan yang bersifat kapasitif, keluaran daya generator akan dominan pada daya reaktif.



Gambar 8. Profil daya keluaran generator

Pada saat *dead bus close*, daya aktif dan reaktif generator terbaca 0,24 MW dan -1,82 Mvar. Seiring bertambah panjangnya *line charging*, daya aktif dan reaktif juga meningkat. Daya aktif dan reaktif yang terbaca saat *line charging* berakhir di GI Paiton adalah 0,36 MW dan -11,12 Mvar. Peningkatan daya aktif terlihat sangat kecil dikarenakan tidak adanya beban di sisi jaringan. Daya aktif yang timbul merupakan konsumsi internal dari adanya resistansi pada konduktor saluran.

Sedangkan daya reaktif generator yang semakin minus merupakan serapan dari jaringan akibat dari tingginya kapasitansi saluran yang berdampak pada tingginya tegangan di sistem. Sehingga untuk menurunkan tegangan jaringan, generator berubah fungsi menjadi induktif dengan menyerap daya reaktif jaringan. Hal ini dilakukan dengan menurunkan injeksi arus eksitasi generator.



Gambar 9. Titik kerja GTG 2.1 saat line charging

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian *line charging* GTG 2.1 pada saluran 150 kV Grati – Paiton, diperoleh kesimpulan bahwa GTG 2.1 mampu untuk melakukan *line charging* saluran 150 kV Grati – Paiton dengan aman dan layak.

5.2. Saran

Supaya *line charging* dapat dilaksanakan lebih cepat, aman dan andal, perlu dilakukan *manual setting* tegangan generator di bawah nilai nominal operasi normal sebelum *dead bus closing* untuk mengantisipasi lonjakan tegangan di jaringan akibat efek kapasitansi saluran dan kondisi tanpa beban, sehingga tegangan di sistem tidak melebihi tegangan yang diizinkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashiebi, A., Shuaib, S. 2019. "A Case Study on Black Start Capability Assessment". DOI: 10.1109/ICEERP49088.2019.8956978.
- [2] Amreiz, H., Janbey, A., Darwish, M. 2019. "Simulation of HVAC Transmission Line". DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893642.
- [3] Bell, J., Hargrave, A., Smelich, G., Smiyth, B. 2019. "Considering When Using Charging Current Compensation in Line Current Differential Applications". Proceeding of the 72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 2019.
- [4] Choi, J., Illindala, M. 2019. "Effect of Prime Mover's Characteristics on the Survivability of a Synchronous Generator-based Distributed Energy Resource during Transient Overload Conditions". DOI: 10.1109/TIA.2019.2947229.
- [5] Xue, Y., Finney, D., Le, B. 2012. "Charging Current in Long Lines and High-Voltage Cables-Protection Application Considerations". Proceedings of the 39th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Oktober 2012.

- [6] Fernandes, I., Paucar, V., Saavedra, O. 2019. "Impacts of Synchronous Generator Capability Curve in Power System Analyses through a Convex Optimal Power Flow". DOI: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895455.
- [7] Chavan, G., Acharya, S., Bhattacharya, S., Das, D., Inam, H. 2016. "Application of Static Synchronous Series Compensators in mitigating Ferranti Effect". DOI: 10.1109/PESGM.2016.7741380.
- [8] Zheng, K., Wen, J., Ma, L., Cheng, S., Lu, E., Wang, N. 2014. "Fast Cut Back Thermal Power Plant Load Rejection and Black Start Field Test Analysis". DOI: 10.3390/en7052740.7.
- [9] Shen, C., Kaufmann, P., Braun, M. 2017. "Fast Network Restoration by Partitioning of Parallel Black Start Zones". DOI: 10.1049/JOE.2017.0032.
- [10] Joksimovic, G. 2015. "Transformer Reactive Power Compensation –Fixed Capacitor Bank Calculation". DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2373039.
- [11] Yi, S., Bochuan, GU., Zhaoxia, J. 2018. "Fast Amplitude Determination of Switching Overvoltage in Black-Start Plans Based on Gas Turbine Distributed Energy Supply System". DOI: 10.1109/POWERCON.2018.8601799.
- [12] Rychlý, O., Linhart, T., Pistora, M. 2018. "Black Start Test of Pump Storage Dlouhè Stráně". DOI: 10.1109/EPE.2018.83955955.
- [13] Saadat, H. (1999). "Power System Analysis". New York: McGraw-Hill.
- [14] Black Start Restoration Study Analysis Solutions. "Manual of Black Start". Siemens. 2017.

BIODATA PENULIS

Anggota Tim 1

Nama : Muhammad Hafizh Ridho

NIP : 941731431I

Jabatan : Junior Technician Operasi Turbin Uap PLTGU Blok 3 Grati PGU

Unit : PT PLN Indonesia Power Grati PGU



Anggota Tim 2

Nama : Erwin Setyawan

NIP : 820441017I

Jabatan : Officer Generator dan Trafo Grati PGU

Unit : PT PLN Indonesia Power Grati PGU

