Magnetika

STUDI KAPABILITAS PADA PERENCANAAN BLACK START GAS TURBINE GENERATOR 2.1 PT INDONESIA POWER GRATI POMU

[1] Muhammad Hafizh Ridho, [2]Widodo Pudji Muljanto, [3]Ni Putu Agustini
Teknik Elektro S1 Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
[1]mhd.hafizhalfauzi@gmail.com, [2]widodopm@yahoo.com, [3]ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id

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 GTG 2.1 PT Indonesia Power Grati POMU direncanakan untuk dapat melakukan black start. Perencanaan yang akan dilakukan di antaranya melaksanakan line charging pada GITET Grati sampai ke Station Service Transformer (SST) PLTU Paiton 9 melalui saluran transmisi 150 kV sepanjang 104,91 kms dan pembebanan pada auxiliary equipment PLTU Paiton 9. Studi pada kapabilitas GTG 2.1 PLTGU Grati menunjukkan bahwa GTG 2.1 mampu untuk melakukan line charging dan pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9. Dengan kemampuan GTG 2.1 membangkitkan daya aktif sebesar 100 MW dan daya reaktif sebesar 60 Mvar (lagging) dan -60 Mvar (leading), hasil simulasi line charging menunjukkan GTG 2.1 membangkitkan daya 0,01 MW dan -6,72 Mvar. Sedangkan hasil simulasi pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9, GTG 2.1 membangkitkan daya 30,4 MW dan 23 Mvar

Kata Kunci: *black start, line charging, efek Ferranti, auxiliary equipment, kurva kapabilitas*

I. PENDAHULUAN

Studi ini membahas prosedur pelaksanaan line charging dan mencari tahu kemampuan GTG 2.1 dalam 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 bagianyang 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 Indonesia Power Grati POMU memiliki rencana menjadikan salah satu mesin pembangkitnya yaitu GTG 2.1 yang berkapasitas melakukan *line charging* dan pembebanan *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9 menggunakan metode simulasi dengan bantuan perangkat lunak *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP) versi 12.6.0. Hasil simulasi yang akan diperoleh akan dibandingkan dengan kurva kapabilitas GTG 2.1 tersebut.

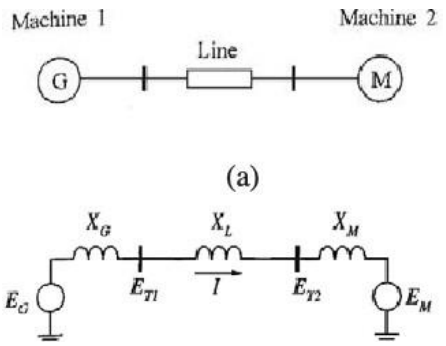
II. KAJIAN PUSTAKA

A. 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 EngineGenerator*).

Pada studi ini, model sederhana dapat diilustrasikan dengan dua buah mesin (generator dan motor) yang terhubung 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:

$$P_e = (E_g.E_m \sin \delta) / X_T \quad (1)$$

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 pada kondisi *steady-state* dipengaruhi oleh panjang saluran (*l*), tegangan akhir penerima (V_r) tanpa beban dan konstanta rambatan (γ) yang diformulasikan sebagaiberikut.

$$V = (V_r/2.\, e^{\gamma l}) + (V_r/2.\, e^{-\gamma l}) \quad (2)$$

B. 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.

Gas Turbine Generator memiliki kelebihan-kelebihan jika dibandingkan dengan pembangkit termal lainnya seperti PLTU di antaranya:

1. Sinkronisasi yang cepat dengan jaringan/ grid
2. *Ramping rate* yang cukup besar
3. Responsif terhadap perubahan beban
4. Efisiensi termal yang tinggi (PLTGU)
5. Relatif bersih dan ramah lingkungan

Kemampuan sinkronisasi yang cepat dengan jaringan/ *grid* dan kapasitasnya yang cukup besar menjadikan *Gas Turbine Generator* sebagai salah satu pilihan sebagai unit *black start* dalam merencanakan skenario *black out*.

C. Kapabilitas Gas Turbine Generator

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.

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 menurutpersamaan sebagai berikut:

$$MP_{max} = T_{lim}.\omega_m \quad (3)$$

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

$$P = k.S_{gNOM} \quad (4)$$

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:

$$P^2 + Q^2 = (V_t.I_{max})^2 \quad (5)$$

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 nominalgenerator.

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^o (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.

D. Daya Reaktif Saluran Transmisi

Pada kondisi jaringan yang padam, saluran transmisi yang kosong akan bersifat kapasitif. Maka saat sebuah generator melakukan pengisian saluran, generator akan menyerap daya reaktif tersebut sehingga nilai daya reaktif generator bernilai negatif, karena dalam hal ini generator bersifat induktif.

Pada saluran tiga fasa, besar kapasitansi saluran transmisi adalah:

$$C = \frac{0{,}0556}{\ln GMD/r} \text{ (μF/km)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

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

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad .(7)$$

Saluran tranmisi yang kosong tersebut mengandung reaktansi kapasitif akibat kapasitansi:

$$X_c = \frac{6{,}6 \times 10^6}{f} \ln \frac{1}{r} + \frac{6{,}6 \times 10^6}{f} \ln D \ (\Omega/\text{km}) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

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

$$I_{chg} = \frac{v_{an}}{-j/\omega c_n} = j\,\omega . c_n . v_{an} \text{ (Amp)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Daya reaktif total yang disuplai oleh ke tiga fasa adalah:

$$Q_{cap}\,3\varphi = 3\omega\, C_{ph}\, V^2_{ph} = \omega\, C_{ph}\, V^2_{L\text{-}L} \text{ (var)} \quad \ldots \quad (10)$$

E. 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 pengirim . Pada jaringan transmisi saluran udara (*overhead*), hubungan tegangan sisi pengirim (V_s) dan sisi ujung penerima cukup besar dibandingkan dengan tegangan konstan pada ujung penerima (V_r) akibat efek Ferranti digambarkan dengan formula sebagai berikut:

$$V_s - V_r = -\left[(4\pi^2)/18\right) \times 10^{-16}] f^2 l^2 V_r \quad \ldots \quad (11)$$

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.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT Indonesia Power Grati POMU yang beralamat di Jl. Raya Surabaya – Probolinggo Km. 73 PO. Box 11 Grati 67184, Desa Wates, Kecamatan Lekok, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur yang dimulai pada bulan September 2020.

B. Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari *manual book* atau *datasheet* peralatan dan mesin. Data yang diperoleh adalah data yang berbentuk data kuantitatif. Sedangkan sumber data diperoleh dari pustaka institusi tempat di mana penelitian ini dilakukan yaitu di PT Indonesia Power Grati POMU, PLN P3B JB APP Surabaya, PLN UIT JBTB Probolinggo dan PT PJB UBJOM Paiton 9.

C. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

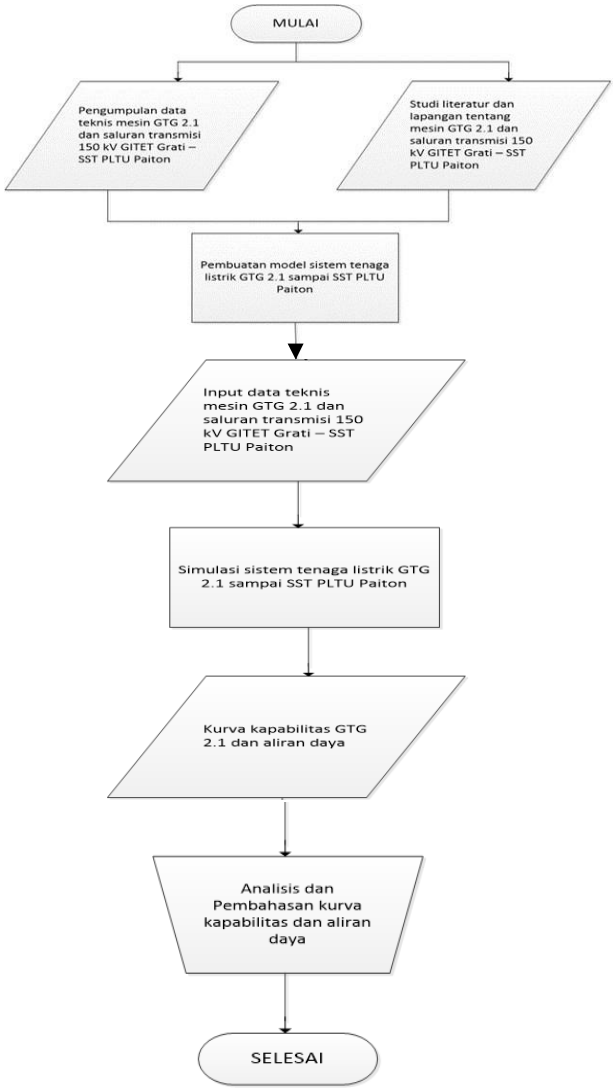
1. Studi literatur, berupa studi kepustakaan dan kajian dari jurnal penelitian, *manual book*, *datasheet* dan artikel terkait;
2. Survei dan pengamatan di lapangan yaitu di PT Indonesia Power Grati POMU.

Pada penelitian ini terdapat beberapa teknik analisis data yang dilakukan antara lain:

1. Pembuatan model sistem tenaga listrik 150 kV dari PLTGU Grati sampai dengan *Station Service Transformer* (SST) PLTU Paiton 9 dan mensimulasikannya dengan bantuan *software* ETAP versi 12.6.0;
2. Analisis terhadap hasil simulasi dan pembahasan terhadap perumusan masalah dan penjelasan hasil

analisisnya, serta penarikan kesimpulan dari pembahasan yang telah diperoleh.

Berikut adalah flowchart penelitian "Studi Kapabilitas pada Perencanaan Black Start Gas Turbine Generator 2.1 PT Indonesia Power Grati POMU".

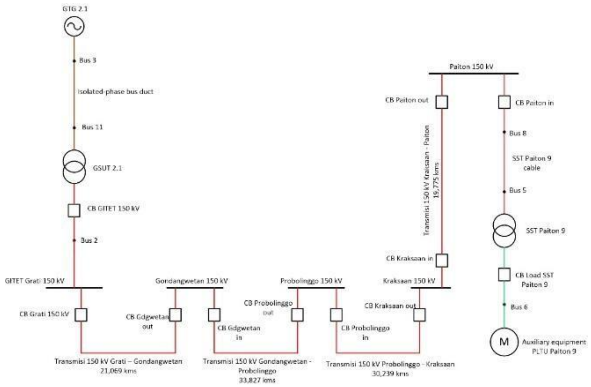


Gambar 2. Flow chart simulasi line charging dan pembebanan

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. *Perencanaan Model Sistem*

Pelaksanaan uji coba *line charging* GTG 2.1 PLTGU Grati direncanakan melalui saluran transmisi 150 kV dari Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) Grati sampai *Station Service Transformer* (SST) PLTU Paiton 9, melewati Gardu Induk (GI) Gondangwetan, GI Probolinggo, GI Kraksaan dan GI Paiton



Gambar 3. Skema line charging GTG 2.1 PLTGUGrati

B. *Peralatan Utama Line Charging*

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

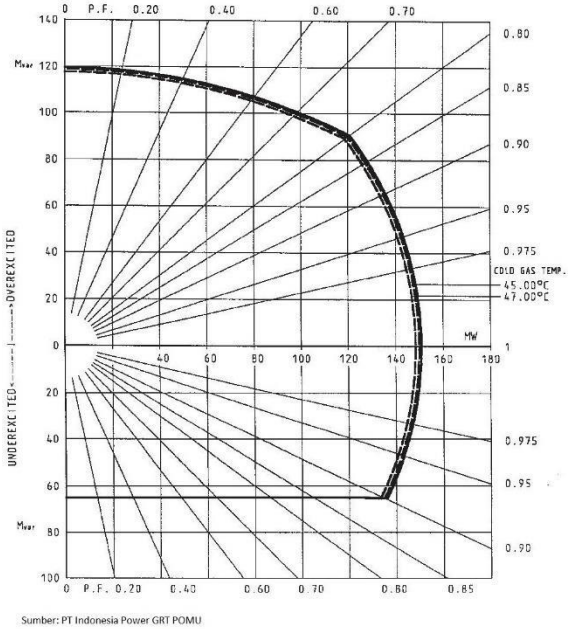
1. *Gas Turbine Generator* (GTG) 2.1;
2. *Generator Step Up Transformer* (GSUT) 2.1;
3. *Generator Circuit Breaker* (GCB) 2.1;
4. Saluran transmisi 150 kV GI Grati, Gondangwetan, Probolinggo, Kraksaan, Paiton beserta PMT nya;
5. *Station Service Transformer* (SST) Paiton

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 4. Spesifikasi GTG 2.1 PLTGU Grati

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*).



Sumber: PT Indonesia Power GRT POMU

Gambar 5. Kurva kapabilitas GTG 2.1 PLTGU Grati

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 6. Spesifikasi Generator Step-Up Transformer 2.1 PLTGU Grati

Dari Gardu Induk	ke Gardu Induk	No. Sirkit	Level Tegangan	Panjang Penghantar (Per Sirkit)	Konfigurasi Penghantar	Jenis Konduktor	AL/CU	Configuration Type	Ampacity (Amp)
Grati	Gondangwetan	1	150 KV	21,069 kms	SUTT (Homogen)	ACSR ZEBRA 2x429 mm2	AL	Vertical	1620
Gondangwetan	Probolinggo	1	150 KV	33,827 kms	SUTT (Homogen)	ACSR DOVE 1X327,94 mm2	AL	Vertical	630
Probolinggo	Kraksaan	1	150 KV	30,239 kms	SUTT (Homogen)	ACCC HCLS 2x220 mm2	AL	Vertical	2016
Kraksaan	Paiton	1	150 KV	19,775 kms	SUTT (Homogen)	TACSR 1x330 mm2	AL	Vertical	1190

Dari Gardu Induk	ke Gardu Induk	Outside diameter (cm)	R-T1 (75deg.C)	Xa (ohm/km)	GMR (m)	Height (m)	Spacing	Tower Ground Resistance	Tower Average Distance (m)
Grati	Gondangwetan	2,862	0,0865	0,222	0,01544	32	4,5 m	< 10 Ohm	334,54
Gondangwetan	Probolinggo	2,3546	0,1246	0,02423	0,00954	32	4,5 m	< 10 Ohm	337,96
Probolinggo	Kraksaan	1,829	0,1557	0,233	0,0324	32	4,5 m	< 10 Ohm	322,94
Kraksaan	Paiton	2,53	0,0904		0,00985	32	4,5 m	<10 Ohm	298,82

Sumber: PLN UIT JBTB Probolinggo

Gambar 7. Spesifikasi konduktor saluran transmisi 150 kV Grati-Paiton

TRANSFORMATOR SST PAITON		
Rating Data		
Item	**Unit**	**Value**
Merk		XI'AN XD TRAFO
Type		SFFZ10-63000/150
Year of manufacture		2008
Serial Number		A2008207
Rated apparent power	MVA	35 MVA
Voltage	kV	150 / 6,3 - 6,3
Vektor group symbol		YN yn0-yn0+d
Rated frequency	Hz	50

Sumber: PT PJB UP Paiton

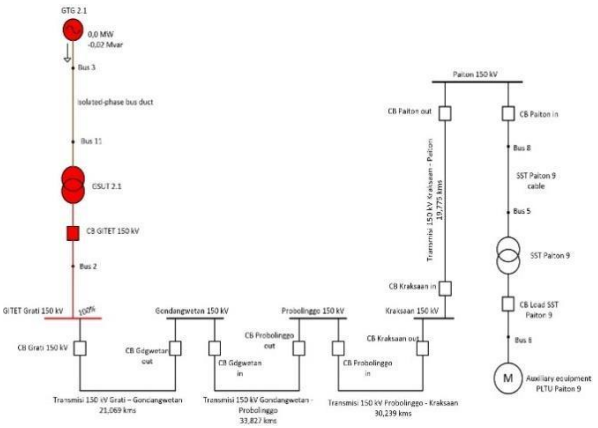
Gambar 8. Spesifikasi Station Service TransformerPaiton 9

C. Simulasi Line Charging GTG 2.1

Simulasi *Line Charging* GTG 2.1 mengggunakan *software* ETAP versi 12.6.0 dengan *tools Load Flow* (LF) untuk melihat aliran dayanya. Tahapan simulasi ini adalah sebagai berikut:

1. Sinkronisasi GTG 2.1 ke GI 150 kV Grati

Pada simulasi ini, GTG 2.1 sinkron ke jaringan 150 kV GI Grati. Hasil simulasi menunjukkan GTG 2.1 membangkitkan daya sebesar 0 MW dan -0,02 Mvar dan tegangan di bus sebesar 100% atau 150 kV

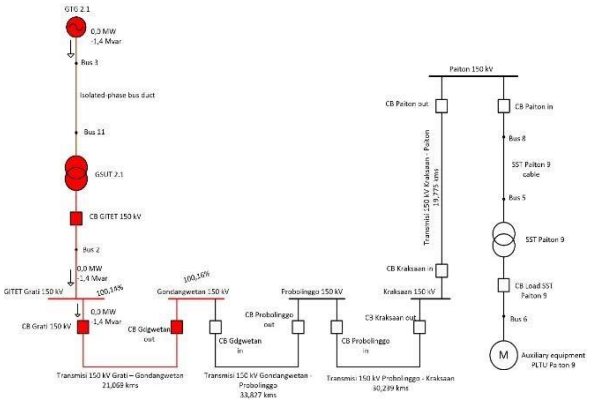


Gambar 9. Simulasi GTG 2.1 saat sinkron ke GI 150kV Grati

2. *Line Charging* ke GI 150 kV Gondangwetan

PMT yang mengarah ke GI Gondangwetan ditutup (***closed***) untuk mengisi (*charging*) tegangan di bus GI

150 kV Gondangwetan melalui saluran transmisi sepanjang 21,069 kms. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa GTG 2.1 membangkitkan daya 0 MW dan -1,4 Mvar (menyerap daya reaktif), dan kondisi tegangan bus mengalami kenaikan pada bus GI Grati sebesar 100,14% atau sekitar 150,21 kV dan GI Gondangwetan sebesar 100,16% atau sekitar 150,24 kV dari tegangan nominal bus.

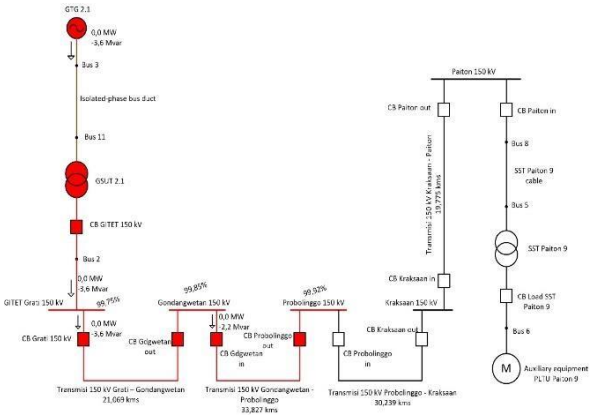


Gambar 10. Simulasi GTG 2.1 saat line charging keGI 150 kV Gondangwetan

3. *Line Charging* ke GI 150 kV Probolinggo

PMT yang mengarah ke GI Probolinggo ditutup (***closed***) untuk mengisi (*charging*) tegangan di bus GI

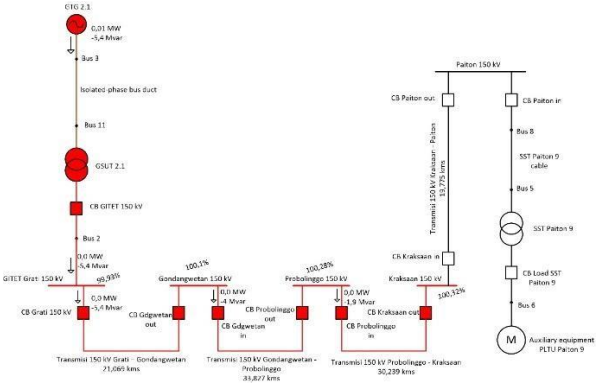
150 kV Probolinggo melalui saluran transmisi sepanjang 33,827 kms. Hasil simulasi menunjukkan GTG 2.1 membangkitkan daya 0 MW dan -3,6 Mvar (menyerap daya reaktif), dan kondisi tegangan bus mengalami penurunan pada bus GI Grati sebesar 99,75% atau sekitar 149,63 kV, GI Gondangwetan sebesar 99,85% atau sekitar 149,78 kV dan GI Probolinggo sebesar 99,92% atau sekitar 149,88 kV dari tegangan nominal bus.



Gambar 11. Simulasi GTG 2.1 saat line charging keGI 150 kV Probolinggo

4. *Line Charging* ke GI 150 kV Kraksaan

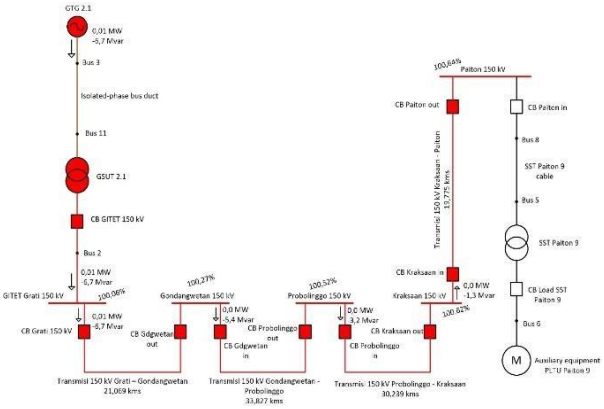
PMT yang mengarah ke GI Kraksaan ditutup (***closed***) untuk mengisi (*charging*) tegangan di bus GI 150 kV Kraksaan melalui saluran transmisi sepanjang 30,239 kms. Dari hasil simulasi menunjukkan GTG 2.1 membangkitkan daya 0,01 MW dan -5,4 Mvar (menyerap daya reaktif), dan kondisi tegangan bus mengalami penurunan pada bus GI Grati sebesar 99,93% atau sekitar 149,9 kV dan kenaikan tegangan pada GI Gondangwetan, Probolinggo dan Kraksaan masing-masing sebesar 100,1% (150,15 kV), 100,28% (150,42 kV) dan 100,32% (150,48 kV) dari tegangan nominal bus.



Gambar 12. Simulasi GTG 2.1 saat line charging ke GI 150 kV Kraksaan

5. *Line Charging* ke GI 150 kV Paiton

PMT yang mengarah ke GI Paiton ditutup (***closed***) untuk mengisi (*charging*) tegangan di bus GI 150 kV Paiton melalui saluran transmisi sepanjang 19,775 kms. Hasil simulasi menunjukkan GTG 2.1 membangkitkan daya 0,01 MW dan -6,7 Mvar (menyerap daya reaktif), dan kondisi tegangan bus mengalami kenaikan pada bus GI Grati sebesar 100,06% (150,09 kV), GI Gondangwetan sebesar 100,27% (150,41 kV) GI Probolinggo sebesar 100,52% (150,78 kV), GI Kraksaan sebesar 100,62% (150,93 kV) dan GI Paiton sebesar 100,64% (150,96 kV) dari tegangan nominal bus

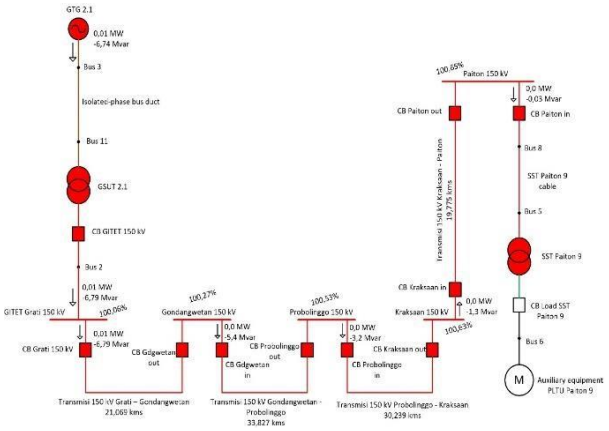


Gambar 13. Simulasi GTG 2.1 saat line charging ke GI 150 kV Paiton

6. *Energize* ke SST Paiton 9

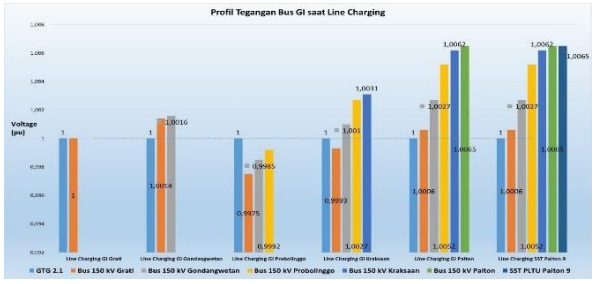
PMT yang mengarah ke SST Paiton 9 ditutup (***closed***) untuk mengisi (*charging*) tegangan di SST Paiton 9. Hasil simulasi menunjukkan tidak ada perubahan pada daya yang dihasilkan oleh GTG 2.1 dengan saat PMT masih kondisi ***open***. Namun ada kenaikan sedikit pada tegangan bus GI

Probolinggo, Kraksaan dan Paiton sebesar 0,01% (0,015 kV).



Gambar 14. Simulasi saat energize SST Paiton 9

Berikut ini adalah grafik tegangan bus GI pada masing-masing tahapan *line charging*.

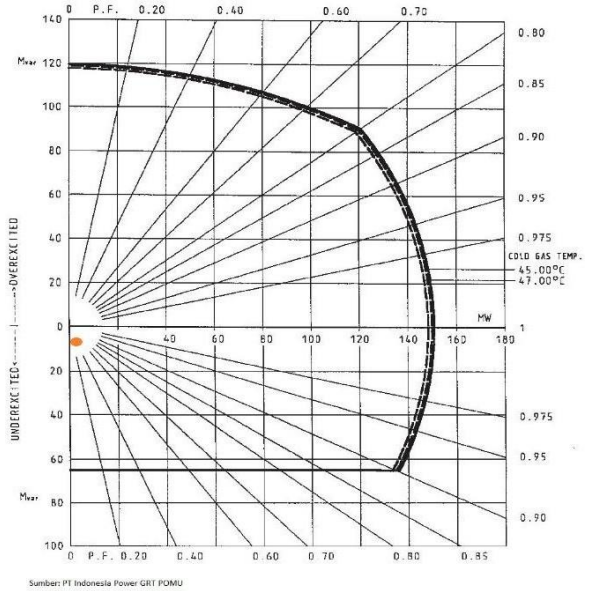


Gambar 15. Profil tegangan bus saat line charging

Kemudian berikut ini adalah grafik daya yang dibangkitkan oleh GTG 2.1 pada masing-masing tahapan *line charging*.

Gambar 16. Daya yang dibangkitkan GTG 2.1

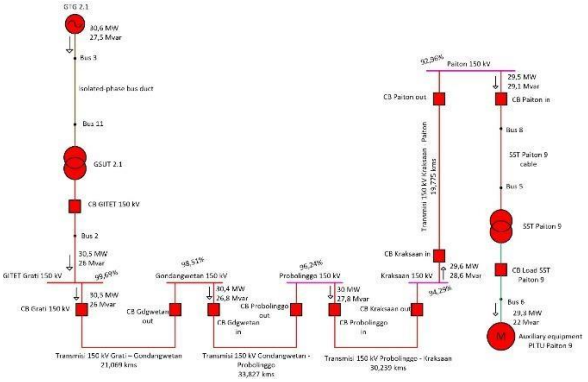
Dengan memperoleh hasil akhir tahapan *line charging* ke SST Paiton 9, maka titik kerja operasi GTG 2.1 berdasarkan kurva kapabilitasnya ditunjukkan oleh titik merah pada gambar berikut:



Gambar 17. Titik kerja GTG 2.1 saat line charging

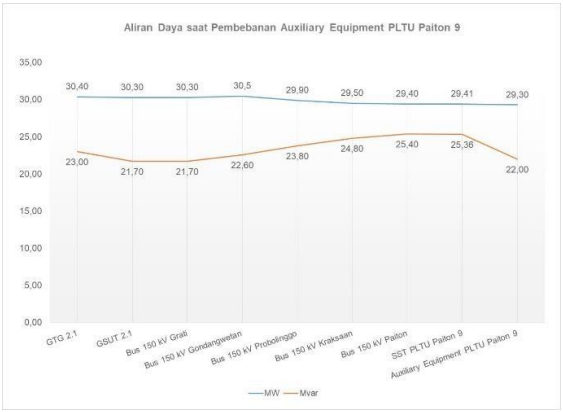
D. Simulasi Pemebebanan Auxiliary Equipment PLTU Paiton 9

Simulasi menggunakan *software* ETAP versi 12.6.0 dengan rangkaian simulasi yang sama pada simulasi *line charging* sebelumnya. Simulasi merupakan lanjutan dari *energize* SST PLTU Paiton 9, yaitu dengan menutup "CB LOAD SST PAITON" di mana arus akan mengalir ke *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9. Beban pada rangkaian simulasi menggunakan motor induksi 3 fasa dengan daya masukan 28 MW dan faktor daya 0,8 *lagging*.



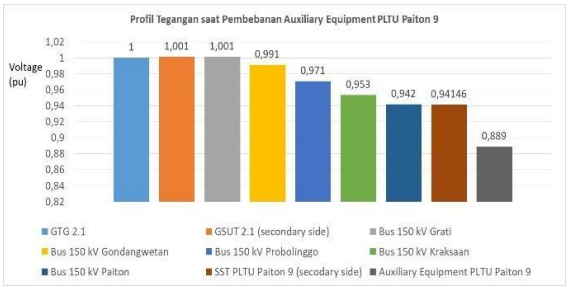
Gambar 18. Simulasi pembebanan auxiliary equipment Paiton 9

Hasil simulasi menunjukkan bahwa GTG 2.1 membangkitkan daya sebesar 30,4 MW dan 23 Mvar dengan tegangan 10,48 kV (bus 11) dan daya yang sampai ke *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9 adalah 29,3 MW dan 22 Mvar dengan tegangan sekitar 5,6 kV atau 88,9% dari tegangan nominal (bus 6).



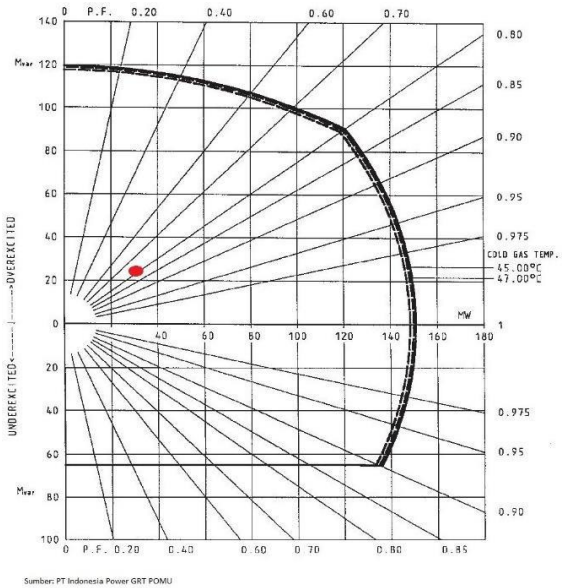
Gambar 19. Aliran daya pada bus saat pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9

Dari hasil simulasi juga diketahui tegangan pada bus mengalami penurunan di bawah tegangan nominal bus.



Gambar 20. Profil tegangan bus saat pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9

Dengan hasil simulasi pembebanan tersebut pula dapat diketahui titik kerja operasi (titik merah) GTG 2.1 saat pembebanan *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9.

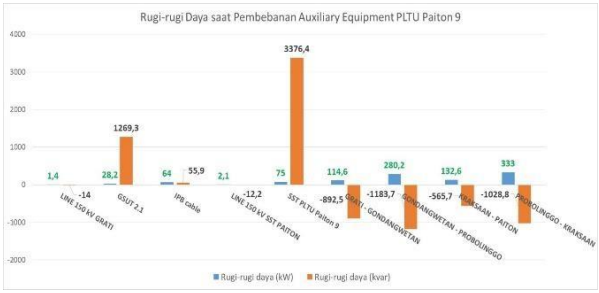


Gambar 21. Titik kerja GTG 2.1 saat pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9

Berkenaan dengan hasil simulasi line charging, terjadi kenaikan tegangan bus di atas tegangan nominal pada tiap tahapan line charging, kecuali pada saat line charging GI Probolinggo yang mengalami penurunan. Hal tersebut harus dapat diantisipasi oleh operator pembangkit atau pun operator jaringan agar tegangan tidak melebihi batas maksimum atau minimum tegangan yang diizinkan. Berdasarkan "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali" kondisi normal untuk tegangan sistem 150 kV yaitu +5% dan -10% dari tegangan nominal atau sekitar 157,5 kV untuk tegangan maksimum dan 135 kV untuk tegangan minimum.

Dalam hal ini bilamana operator pembangkit atau operator jaringan berkeinginan menormalkan tegangan bus ke nilai nominal, maka GTG 2.1 akan menyerap lebih banyak daya reaktif dari hasil simulasi. Namun hal tersebut tidak akan keluar dari batas aman operasi berdasarkan kurva kapabilitas karena kemampuan yang tersedia masih cukup jauh mengakomodasi penyerapan daya reaktif tersebut.

Lain halnya dengan saat simulasi pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9, di mana tegangan pada tiap bus mengalami penurunan yang cukup signifikan. Hal ini dikarenakan terdapat rugi-rugi daya pada bus dan peralatan seperti GSUT 2.1 dan SST PLTU Paiton 9. Hal tersebut perlu diantisipasi manakala akan dilakukan uji lapangan yang sesungguhnya.



Gambar 22. Rugi-rugi daya saat pembebanan auxiliary equipment PLTU Paiton 9

Grafik di atas memperlihatkan rugi daya reaktif pada GSUT 2.1 dan SST Paiton 9 yang cukup besar dengan masing-masing 1269,3 kvar dan 3376,4 kvar, yang menyebabkan tegangan di sistem jatuh. Hal tersebut dapat diantisipasi dengan menambah suplai daya reaktif dari GTG 2.1 sehingga tegangan di sistem kembali normal.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian *"Studi Kapabilitas Pada Perencanaan Black Start Gas Turbine Generator 2.1 PT Indonesia Power Grati POMU"* diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Line Charging* GTG 2.1 ke saluran transmisi 150kV Grati – SST Paiton 9 menghasilkan daya keluaran GTG 2.1 sebesar 0,01 MW dan -6,72 Mvar.
2. Pembebanan *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9 menghasilkan daya keluaran GTG 2.1 sebesar 30,4 MW dan 23 Mvar dengan daya yang diserap oleh beban sebesar 29,3 MW dan 22 Mvar.
3. Rugi-rugi daya pada pembebanan *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9 sebesar 1031,1 kW dan 1004,7 kvar dengan rugi daya aktif terbesar adalah 333 kW pada saluran transmisi 150 kV Probolinggo – Kraksaan. Sedangkan rugi daya reaktif terbesar adalah 3376,4 kvar pada SSTPLTU Paiton 9.
4. Tegangan pada bus 150 kV GI Paiton lebih tinggi dari pada bus 150 kV GITET Grati saat *line charging* dikarenakan efek kapasitansi pada saluran transmisi yang tidak berbeban.
5. Tegangan yang anjlok pada sisi sekunder trafo SST Paiton 9 dikarenakan efek induktansi yang mana daya reaktif yang diserap cukup besar olehSST Paiton 9.
6. Berdasarkan kurva kapabilitas, GTG 2.1 mampu untuk melakukan *Line Charging* saluran 150 kV Grati – Paiton dan pembebanan *auxiliary equipment* PLTU Paiton 9.
7. Hasil simulasi ini dapat berbeda pada uji lapangan jika dilakukan penormalan dan perbaikan pada tegangan sistem. Namun hal tersebut masih dalam batas aman operasi GTG 2.1 pada kurva kapabilitasnya.

VI. 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] Yi, S.,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.

[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] 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.

[6] 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.

[7] Fernandes, I.,Paucar, V.,Saavedra, O.2019."Impacts of Synchronous Generator Capability Curve in Power System Analyses trough a Convex Optimal Power Flow".DOI: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895455.

[8] 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.

[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] 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.

[12] Rychlỹ, O.,Linhart, T.,Pistora, M.2018."Black Start Test of Pump Storage Dlouhè Strânè".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.