

Analisis Impak Injeksi Generator Baru Grati pada Stabilitas Transien Sistem Jawa – Madura – Bali (Jamali) 500kV

¹ Hadi Suyono, ² Anargya Widyatma, ³ Mahfudz Shidiq, ⁴ M. Fauzan Edy Purnomo

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

² Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

¹ hadis@ub.ac.id, ² anargyawidyatama@gmail.com, ³ mahfudz@ub.ac.id, ⁴ mfauzanep@ub.ac.id

Abstract — The increasing yearly need for electricity, especially in Java, requires the government through PT. PLN (Persero) to plan new capacity and production of electrical energy. The Java-Bali electricity system has added a new generating system in Grati. There are three generators, consisting of two gas turbine generator units with a capacity of 207 MVA and a steam turbine generator unit with a capacity of 248.75 MVA. The addition of these new generators requires a thorough analysis of the overall system performance. This study analyzes the transient stability under the peak- and bottom-load conditions. The transient stability simulation results using ETAP software show that for peak load and base load conditions, the case of generator disconnection and a three-phase short circuit on the transmission line for 150 milliseconds does not cause the system to disconnect from sync. In the case of a generator disconnection, the power supply loss is only 4.71% of the peak load condition and 6.69% of the base load of the generation power. In the case of three-phase short-circuit faults on the transmission line for 150 milliseconds at peak load and base load conditions, the results of the rotor angle, frequency and voltage responses show the system remains stable. However, at peak load conditions there is a voltage drop of up to 104.632 kV and at base load there is a voltage drop of up to 114.479 kV. The critical clearing time at peak load condition is faster than that under the basic load condition.

Keywords — Transient Stability, generator rotor angle, frequency, voltage, Java-Madura-Bali 500 kV

Abstrak — Peningkatan kebutuhan listrik setiap tahun, khususnya di pulau Jawa, mengharuskan pemerintah melalui PT. PLN (Persero) melakukan pengembangan kapasitas dan produksi energi listrik guna mengatasinya. Pada sistem kelistrikan Jawa-Bali ditambahkan generator baru di Grati. Generator tersebut berjumlah tiga unit, terdiri dari dua unit generator turbin gas berkapasitas 207 MVA dan satu unit generator turbin uap berkapasitas 248,75 MVA. Penambahan pembangkit baru tersebut mengharuskan dilakukannya analisis ulang terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Kajian ini menganalisis stabilitas transien dalam kondisi beban puncak dan beban dasar. Hasil simulasi stabilitas transien menggunakan software ETAP menunjukkan bahwa untuk kondisi beban puncak dan beban dasar, kasus lepasnya generator dan hubung singkat tiga fasa pada saluran transmisi selama 150 milidetik tidak menyebabkan sistem lepas sinkron. Pada kasus generator lepas, daya supply yang hilang hanya sebesar 4,71% dari kondisi beban puncak dan 6,69% dari beban dasar daya pembangkitan. Pada kasus gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran transmisi selama 150 milidetik pada kondisi beban puncak dan

beban dasar, hasil respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan menunjukkan sistem tetap stabil. Namun, pada kondisi beban puncak terjadi drop tegangan sampai 104,632 kV dan pada beban dasar terjadi drop tegangan sampai 114,479 kV. Waktu pemutusan kritis pada kondisi beban puncak lebih cepat jika dibandingkan dengan pada kondisi beban dasar.

Kata Kunci— Stabilitas transien, sudut rotor generator, frekuensi, tegangan, Jawa-Madura-Bali 500 kV

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk, perindustrian dan ekonomi menyebabkan kebutuhan daya listrik bertambah. Menurut PT. PLN (Persero) Pusat Pengaturan Beban pada tahun 2019 kebutuhan daya listrik Pulau Jawa dan Bali dipasok oleh 13 unit pembangkit yang terdiri dari PLTU, PLTGU dan PLTA yang terhubung pada sistem jaringan 500kV [1].

Untuk menanggulangi permintaan beban listrik yang terus meningkat PT. PLN (Persero) melakukan pengembangan berupa peningkatan kapasitas pembangkit Sistem Jawa-Bali dengan menambahkan kapasitas pembangkit dengan tiga unit generator pada Pembangkit Grati. Unit generator baru yang ditambahkan pada Sistem Jawa Bali tersebut terdiri dari dua buah *gas-turbine generator* dan satu buah *steam-turbine generator*. Generator baru yang ditambahkan pada Sistem Jawa Bali 500kV yaitu Grati *Gas-Turbine Generator* 3.1 dengan kapasitas 207 MVA, serta Grati *Gas-Turbine Generator* 3.2 dengan kapasitas 207 MVA dan Grati *Steam-Turbine Generator* 3.1 dengan kapasitas 248,75 MVA.

Penambahan unit generator baru pada suatu sistem yang ada memerlukan kajian kestabilan transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan [2]-[6]. Pada penelitian ini kajian stabilitas transien penambahan tiga unit generator baru Grati dilakukan dengan menggunakan alat bantu perangkat lunak ETAP [7]. Beberapa skenario kondisi gangguan dibuat dan disimulasikan untuk mengetahui respon sistem [8]-[10].

GRATI ST3.0	248,75	15,75	80
-------------	--------	-------	----

C. Hasil Simulasi Aliran Daya

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi aliran daya pada kondisi beban puncak (*peak*) dan dasar (*base*).

Tabel 3 Hasil Simulasi Aliran Daya

	Peak Load MW	Base Load MW
Total Generated	15927,060	11213,920
Total Load	15778,948	11151,862
Total Demand	15927,060	11213,920
Losses	148,112	62,058

Tabel 3 menunjukkan bahwa terdapat rugi-rugi sebesar 0,93% dari total daya yang dibangkitkan pada kondisi beban puncak, dan sebesar 0,55% pada kondisi beban dasar dari total daya yang dibangkitkan.

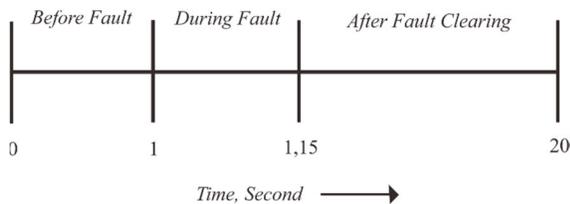
D. Simulasi dan Analisis Stabilitas Transien

Pada simulasi ini diamati respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Pada simulasi stabilitas transien ini akan diplot di beberapa titik, antara lain di generator dan bus yang mewakili tiap daerahnya. Titik yang diplot berbeda tiap studi kasus, tergantung kebutuhan. Studi kasus yang disimulasikan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Studi kasus simulasi stabilitas transien

Kasus	Keterangan	Waktu (detik)	Daya (MW)
Generator Trip	Generator Suralaya8 Trip	1	750
Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Pada Saluran	Saluran Grati-Krian Hubung Singkat Tiga Fasa	1	-
Critical Clearing Time	Pencarian Waktu Pemutusan Kritis	1	-

Untuk kasus hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian, gangguan diberikan selama 150 milidetik, sehingga gangguan dimulai pada detik ke-1 dan dihilangkan pada detik ke-1,15. Gambar 4 ditampilkan untuk mempermudah pemahaman waktu simulasi.

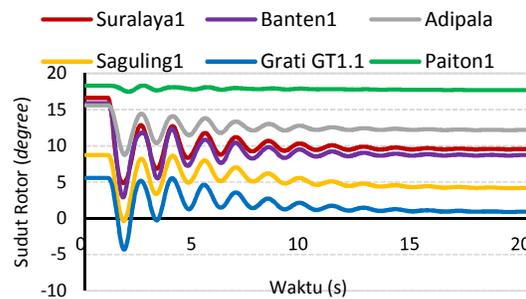


Gambar 3 Estimasi waktu gangguan pada simulasi stabilitas transien

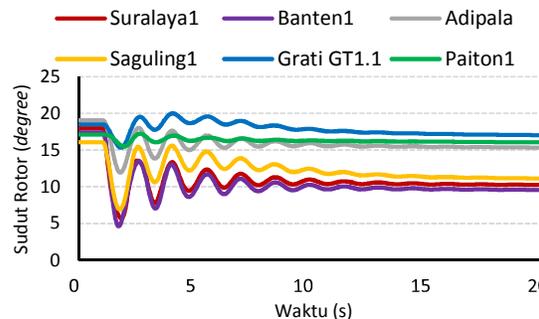
Generator Suralaya8 Trip ($t=1s$)

Pada kasus pertama ini *trip* terjadi pada generator dengan kapasitas terbesar pada Sistem Jawa-Madura-Bali 500 kV, yaitu generator Suralaya8 dengan kapasitas 800 MW sedangkan yang dibangkitkan pada kondisi beban puncak adalah 15927,060 MW sedangkan pada kondisi beban dasar adalah 11213,920 MW. Ketika terjadi kasus generator Suralaya8 lepas maka sistem akan kehilangan daya sebesar 4,71% pada kondisi beban puncak dan 6,69% pada kondisi beban dasar terhadap daya yang dibangkitkan.

Gambar 5 sampai 10 menunjukkan kurva sudut rotor, frekuensi dan tegangan hasil simulasi stabilitas transien pada kondisi beban puncak dan dasar.

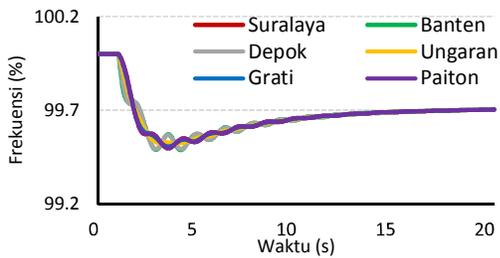


Gambar 5 Respon sudut rotor generator ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban puncak

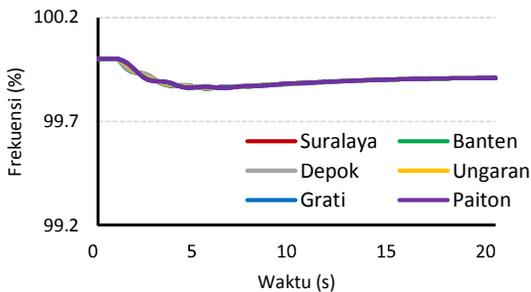


Gambar 6 Respon sudut rotor generator ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban dasar

Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa sudut rotor generator mengalami osilasi dan dapat kembali ke keadaan *steady-state*. Dapat disimpulkan bahwa sudut rotor keenam generator tersebut dapat kembali stabil.

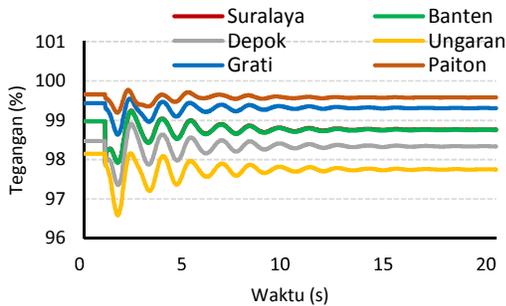


Gambar 7 Respon frekuensi bus ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban puncak

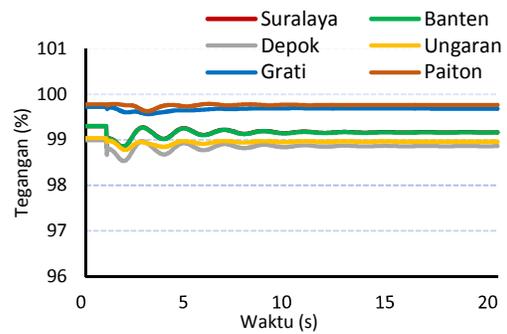


Gambar 8 Respon frekuensi bus ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban dasar

Gambar 7 dan 8 menunjukkan keadaan saat Suralaya8 lepas dari sistem. Frekuensi mengalami penurunan namun dapat naik kembali dan dapat kembali ke keadaan *steady-state*. Bus yang mengalami penurunan frekuensi terendah adalah Bus Depok. Pada kondisi beban puncak frekuensi Bus Depok turun sampai angka 49,75 Hz sedangkan pada kondisi beban dasar frekuensi Bus Depok turun sampai angka 49,93 Hz. Nilai frekuensi keenam bus masih berada di dalam standar yaitu 49,5 Hz sampai 50,5 Hz berdasar Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007 [11].



Gambar 9 Respon tegangan bus ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban puncak

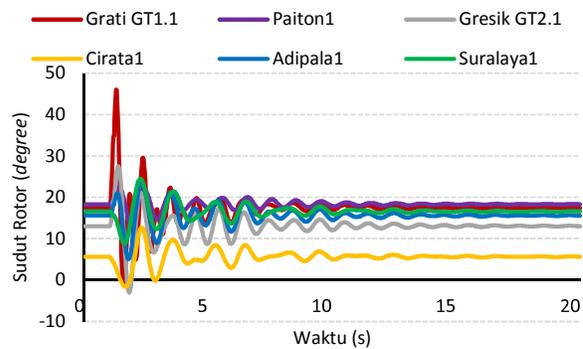


Gambar 10 Respon tegangan bus ketika Suralaya8 trip pada kondisi beban dasar

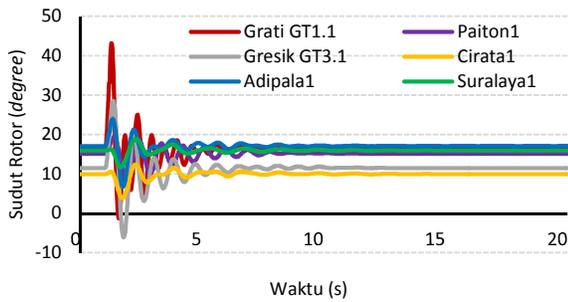
Dari Gambar 9 dan 10 dapat diamati bahwa ketika terjadi Suralaya8 lepas nilai tegangan pada bus mengalami fluktuasi yang tidak besar dan dapat kembali *steady-state*. Nilai masih berada di dalam standar yaitu $\pm 5\%$ berdasar Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007 [11].

Hubung Singkat Tiga Fasa Saluran Double-Circuit Grati-Krian (t=1s)

Pada kasus ini terjadi hubung singkat tiga fasa pada saluran *double-circuit* Grati-Krian. Gangguan pada simulasi diberikan atau dimulai pada detik pertama atau satu detik setelah simulasi dimulai ($t=1s$). Total waktu simulasi yang digunakan adalah selama 20 detik. Pada kasus ini gangguan diberikan selama 150 milidetik, maka gangguan akan dimulai pada detik ke-1 dan dihilangkan pada detik ke-1,15. Gambar 17 sampai 22 menunjukkan kurva sudut rotor, frekuensi dan tegangan hasil simulasi stabilitas transien pada kondisi beban puncak dan dasar. Agar lebih mudah memahami waktu simulasi, penjelasan dapat dilihat pada gambar 4.

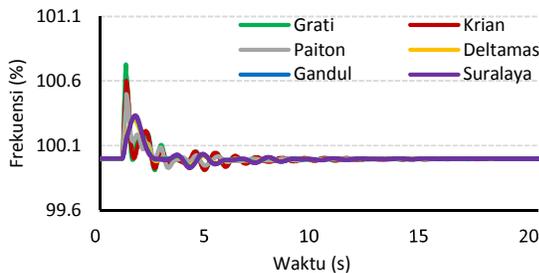


Gambar 11 Respon sudut rotor hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban puncak

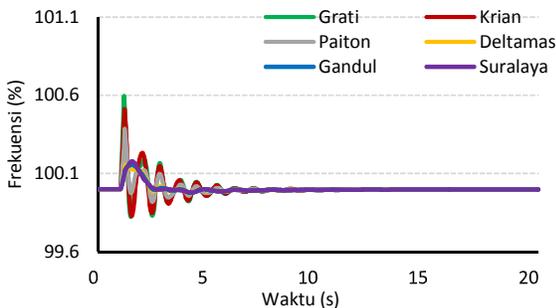


Gambar 12 Respon sudut rotor hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban dasar

Dapat dilihat pada gambar 11 dan 12, ketika terjadi hubung-singkat tiga-fasa pada saluran Grati-Krian disimulasikan terjadi pada detik pertama dan kemudian gangguan dihilangkan 150 milidetik berikutnya. Kurva sudut rotor hasil simulasi menunjukkan bahwa generator mengalami osilasi dan dapat kembali *steady-state*. Generator yang mengalami osilasi dengan *range* terbesar adalah generator Grati GT1.1. Pada kondisi beban puncak generator Grati GT1.1 beresilasi dari -1,12 sampai 47,7 *degree* sedangkan pada kondisi beban dasar -2,32 sampai 43,4 *degree*, sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut rotor keenam generator tersebut dapat kembali stabil.



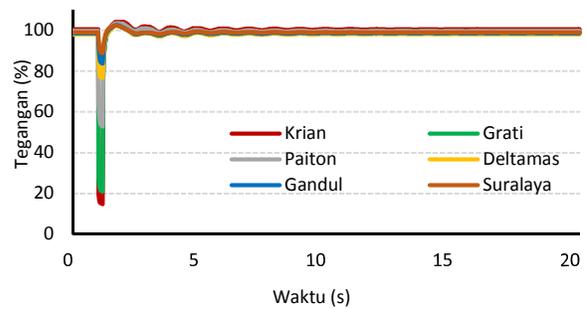
Gambar 13 Respon frekuensi hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban puncak



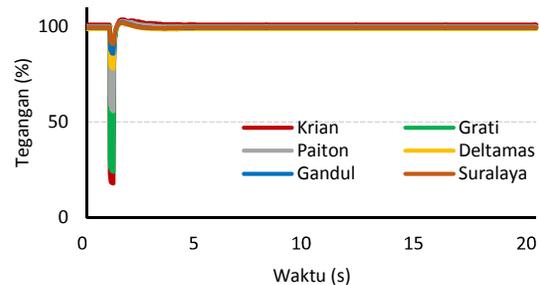
Gambar 14 Respon frekuensi hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban dasar

Gambar 13 dan 14 menunjukkan bahwa pada saat terjadi hubung-singkat tiga-fasa pada saluran *double-circuit* Grati-Krian, frekuensi mengalami kenaikan namun dapat turun dan kembali *steady-state*. Bus yang mengalami kenaikan frekuensi tertinggi adalah bus Grati. Pada kondisi beban puncak frekuensi Bus Grati naik sampai 50,37 Hz sedangkan pada kondisi beban dasar frekuensi Bus Grati naik sampai 50,29 Hz. Nilai frekuensi keenam bus masih berada di dalam standar yaitu 49,5 Hz sampai 50,5 Hz berdasar Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007 [11].

Dapat dilihat pada gambar 15 dan 16 bahwa ketika terjadi hubung singkat tiga fasa pada saluran *double-circuit* Grati-Krian, maka nilai tegangan pada bus mengalami *drop* tegangan. *Drop* tegangan terendah terjadi pada bus Grati dan bus Krian, pada kondisi beban puncak nilai *drop* tegangan bus Krian yaitu 74,42 kV dan bus Grati 104,63 kV sedangkan nilai *drop* tegangan pada kondisi beban dasar bus Krian yaitu 89,26 kV dan bus Grati 119,48 kV. Pada saat kembali *steady-state* tegangan bus Krian dan Grati tidak melebihi batas yaitu $\pm 5\%$ berdasar Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007. Pada saat kembali *steady-state* nilai tegangan kelima bus lainnya masih berada di dalam standar yaitu $\pm 5\%$ berdasar Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007 [11].



Gambar 15 Respon tegangan hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban puncak



Gambar 16 Respon tegangan hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik pada kondisi beban dasar

Pencarian Waktu Pemutusan Kritis

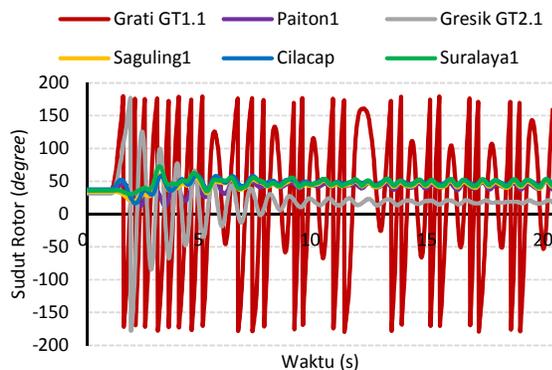
Pada kasus ini dihitung waktu pemutusan kritis ketika terjadi gangguan hubung-singkat tiga-fasa pada saluran *double-circuit* Grati-Krian. Pencarian waktu pemutusan kritis dilakukan dengan metode *trial and error* dengan mencari waktu pemutusan yang tepat pada saluran sebelum sistem menjadi tidak stabil. Melalui pencarian waktu pemutusan kritis didapat waktu stabil dan waktu tidak stabil.

Pada kasus ini parameter yang dilihat adalah sudut rotor generator yang terdekat, menengah dan terjauh dari lokasi saluran yang terkena gangguan hubung singkat tiga fasa. Pencarian waktu pemutusan kritis dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi beban puncak dan beban dasar. Tabel 5 menunjukkan hasil pencarian waktu pemutusan kritis yang mencantumkan waktu stabil dan waktu tidak stabil.

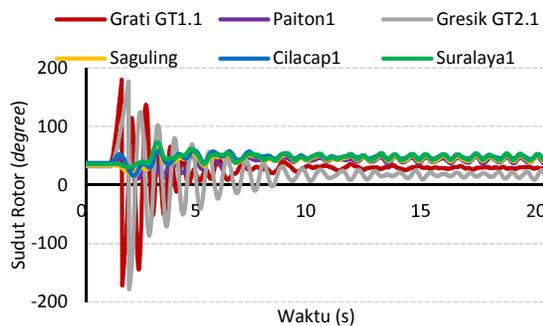
Tabel 5 Hasil Pencarian Waktu Pemutusan Kritis

Kondisi	Waktu Stabil (detik)	Waktu Tidak Stabil (detik)
Beban Puncak	0,692	0,693
Beban Dasar	0,838	0,839

Gambar 17 dan 18 merupakan kurva hasil pencarian waktu pemutusan kritis pada kondisi beban puncak.



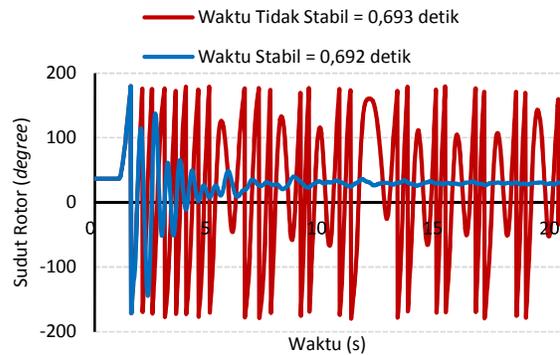
Gambar 17 Respon sudut rotor generator waktu pemutusan 0,693 detik pada kondisi beban puncak



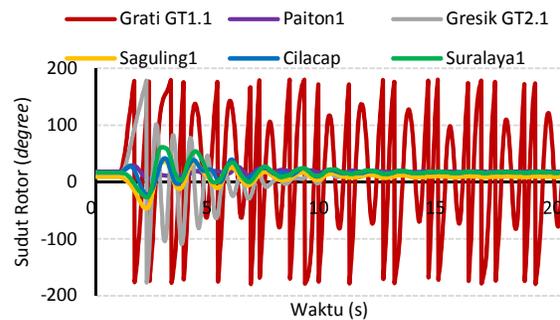
Gambar 18 Respon sudut rotor generator waktu pemutusan 0,692 detik pada kondisi beban puncak

Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 17 dan 18, sudut rotor generator yang kritis adalah pada generator Grati GT1.1, yang berlokasi di dekat saluran yang terkena gangguan. Pada kondisi beban puncak apabila gangguan diputuskan pada detik ke 0,692 setelah gangguan dimulai sistem masih dalam kondisi stabil, tetapi apabila diputuskan pada detik ke 0,693 setelah gangguan dimulai maka sistem menjadi tidak stabil. Perbandingan respon sudut rotor generator Grati GT1.1 pada waktu stabil dan waktu tidak stabil ditunjukkan pada Gambar 19.

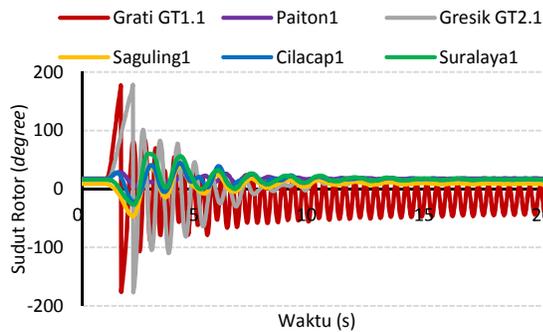
Gambar 20 sampai 21 menunjukkan kurva hasil pencarian waktu pemutusan kritis pada kondisi beban dasar. Sebagaimana dapat dilihat, diketahui bahwa sudut rotor generator yang kritis adalah pada generator Grati GT1.1, yang berlokasi di dekat saluran yang terkena gangguan. Pada kondisi beban puncak apabila gangguan diputuskan pada detik ke 0,838 setelah gangguan dimulai sistem masih dalam kondisi stabil, tetapi apabila diputuskan pada detik ke 0,839 setelah gangguan dimulai maka sistem menjadi tidak stabil. Perbandingan respon sudut rotor generator Grati GT1.1 pada waktu stabil dan waktu tidak stabil ditunjukkan pada gambar 22.



Gambar 19 Respon sudut rotor generator Grati GT1.1 waktu stabil dan waktu tidak stabil pada kondisi beban puncak

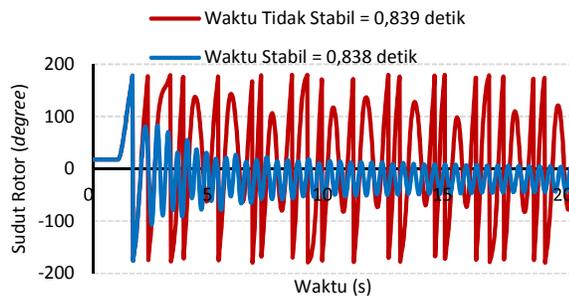


Gambar 20 Respon sudut rotor generator waktu pemutusan 0,839 detik pada kondisi beban dasar



Gambar 21 Respon sudut rotor generator waktu pemutusan 0,838 detik pada kondisi beban dasar

Dari data Tabel 5 dan gambar 17 sampai 22 dapat disimpulkan bahwa pada saat terjadi gangguan hubung-singkat tiga-fasa pada saluran *double-circuit* Grati-Krian didapat waktu pemutusan kritis. Pada kondisi beban puncak apabila gangguan diputuskan pada detik ke 0,692 setelah gangguan dimulai sistem masih dalam kondisi stabil, tetapi apabila diputuskan pada detik ke 0,693 setelah gangguan dimulai maka sistem menjadi tidak stabil. Pada kondisi beban dasar apabila gangguan diputuskan pada detik ke 0,838 setelah gangguan dimulai sistem masih dalam kondisi stabil, tetapi apabila diputuskan pada detik ke 0,839 setelah gangguan dimulai maka sistem menjadi tidak stabil.



Gambar 22 Respon sudut rotor generator Grati GT1.1 waktu stabil dan waktu tidak stabil pada kondisi beban dasar

IV. KESIMPULAN

Kajian stabilitas transien penambahan pembangkit baru Grati pada Sistem Jawa – Madura – Bali 500 kV melalui simulasi menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Simulasi kasus generator Suralaya8 lepas menunjukkan bahwa pada saat kondisi beban puncak sistem mengalami penurunan frekuensi, namun pada kondisi beban dasar penurunan frekuensi menjadi berkurang. Bus yang mengalami penurunan frekuensi terendah adalah Bus Depok, dengan penurunan frekuensi mencapai 49,75 Hz pada saat kondisi beban puncak, dan penurunan frekuensi mencapai 49,93 Hz pada kondisi beban dasar.

2. Simulasi kasus hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati-Krian selama 150 milidetik menunjukkan bahwa pada kondisi beban puncak terjadi *voltage drop* namun pada kondisi beban dasar *voltage drop* menjadi berkurang. Pada Bus Krian *voltage drop* mencapai 74,42 kV saat kondisi beban puncak terjadi namun pada kondisi beban dasar *voltage drop* menjadi berkurang sampai pada 89,26 kV. Pada Bus Grati saat kondisi beban puncak terjadi *voltage drop* sampai pada 104,63 kV namun pada kondisi beban dasar *voltage drop* menjadi berkurang sampai pada 119,48 kV.
3. Simulasi pencarian waktu pemutusan kritis saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran Grati – Krian menghasilkan nilai 0,692 detik setelah gangguan bermula pada kondisi beban puncak adalah, 0,838 detik setelah gangguan bermula pada kondisi beban dasar.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rencana Operasi Tahun 2019 PT. PLN (Persero) Pusat Pengatur Beban.
- [2] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [3] A. Soeprijanto, *Analisa Kestabilan Multi Generator Dengan Konsep Mesin Tunggal*, Sleman: Deepublish, 2017.
- [4] H. Suyono, *Load Flow Analysis in: Advanced Power System Analysis*, Malang: Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Tanpa Tahun.
- [5] M. Shidiq, *Operasi Sistem Daya Elektrik*. Malang: Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, 2009.
- [6] A.R. Priawan, M. Shidiq, and H. Suyono, *Analisis Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Pada PT. Kebon Agung Malang*, Malang: Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, 2010.
- [7] Institut Teknologi Sepuluh November. (2018). *ETAP Electrical Transient Analysis Program*. Surabaya: Teknik Elektro ITS Surabaya, Powers System and Simulation Laboratory.
- [8] P.K. Iyambo and R. Tzoneva, "Transient Stability Analysis of The IEEE 14-Bus Electric Power System", in *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 494-500, 2007.
- [9] D.T. Kumara, O. Penangsang, dan N.K. Aryani, *Analisa Stabilitas Transien Pada Sistem Transmisi Sumatra Utara 150 kV – 275 kV Dengan Penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW*, Surabaya: Teknik Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [10] M.I. Yagami, Y. Ichinohe, K. Misawa, "Trasient Stability Analysis of Synchronous Generator in Power System with Renewable Power Sourced Installed," *Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, 4th International Conference, 2014.

[11] Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral No.
03 Tahun 2007.