

Analisis Transient Stability Gangguan Short Circuit 3 Phase Dan Generator Trip Pada Sub Sistem Paiton Dan Grati

Guntur Yanuar Astono¹, Abraham Lomi², Hadi Suyono³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
Email: guntur.astono@gmail.com

Abstract -- Electric Power System Operation concerns various broad aspects, one of which is the stability of the electricity supply from power plants to consumers. In maintaining the stability of the Electric Power System, appropriate action is needed from disturbances that can occur at any time. This study discusses the transient stability of Paiton and Grati Sub Systems from Short Circuit 3 Phase and Generator Trip disruptions. In the case of Short Circuit determined CCT (Critical Clearing Time) value obtained by 0.97 ms, and for the case of Generator Trip carried out Load Shedding action. Results obtained in the event of a Short Circuit, While for the case of Generator Trip, the transmission voltage of 70 kV increase from 78.75% to 95.77%, the transmission voltage of 150 kV increase from 81.24% to 98.53%, and the transmission voltage of 500 kV increase from 82.02% to 98.98%.

Index Terms— *Electrical Power System, Transient Stability, Critical Clearing Time, Load Shedding*

Abstrak— Operasi Sistem Tenaga Listrik menyangkut berbagai aspek yang luas, salah satunya adalah stabilitas suplai energi listrik dari pembangkit sampai kepada konsumen. Dalam mempertahankan stabilitas Sistem Tenaga Listrik, diperlukan tindakan yang tepat dari gangguan-gangguan yang dapat terjadi kapan saja. Penelitian ini membahas mengenai stabilitas transien Sub Sistem Paiton dan Grati dari gangguan *Short Circuit 3 Phase* dan *Generator Trip*. Pada kasus *Short Circuit* ditentukan nilai CCT (*Critical Clearing Time*) didapatkan sebesar 0,97 ms, dan untuk kasus *Generator Trip* dilakukan tindakan *Load Shedding*. Hasil yang diperoleh ketika terjadi *Short Circuit*, sistem dapat kembali *steady state* dengan nilai frekuensi 50,38 Hz. Sedangkan untuk kasus *Generator Trip*, tegangan transmisi 70 kV naik dari 78,75% menjadi 95,77%, tegangan transmisi 150 kV naik dari 81,24% menjadi 98,53%, dan tegangan transmisi 500 kV naik dari 82,02% menjadi 98,98%.

Kata Kunci— *Operasi Sistem Tenaga Listrik, Stabilitas Transien, Critical Clearing Time, Load Shedding*

I. PENDAHULUAN

Operasi sistem tenaga listrik menyangkut berbagai aspek yang luas, khususnya karena menyangkut biaya yang tidak sedikit serta menyangkut penyediaan tenaga listrik bagi masyarakat, sehingga menyangkut hajat hidup orang banyak. Oleh karena itu operasi sistem tenaga listrik memerlukan manajemen yang baik.

Uraian pengoperasian sistem tenaga listrik yang baik, perlu ada hal-hal yang harus diperhatikan. Pertama,

perencanaan operasi mengenai bagaimana sistem tenaga listrik akan dioperasikan untuk jangka waktu tertentu. Perencanaan operasi, mencakup perkiraan beban, koordinasi pemeliharaan, optimisasi, serta keandalan mutu tenaga listrik. Kedua, pelaksanaan dan pengendalian operasi apabila terjadi hal-hal yang menyimpang dari rencana operasi. Ketiga, analisa operasi yaitu analisa atas hasil-hasil operasi untuk memberikan umpan balik bagi perencanaan operasi maupun bagi pelaksanaan dan pengendalian operasi [1].

Beberapa tahun terakhir, sistem tenaga berkembang lebih besar dan lebih rumit. Adanya pelanggaran aturan dari sistem kelistrikan industri sudah berlangsung di berbagai negara dan operasi sistem tenaga menjadi lebih sulit untuk dikendalikan. Stabilitas suplai energi listrik kepada konsumen adalah salah satu hal yang dipertimbangkan. Oleh karena itu, pertimbangan operator sistem tenaga dalam pengambilan keputusan tidak hanya mengacu pada aspek ekonomi, tetapi juga aspek stabilitas [2].

Sistem yang akan dibahas pada penelitian ini adalah Sub Sistem Paiton dan Grati yang merupakan bagian dari Sistem Kelistrikan Jawa Timur (Region IV Jawa-Bali). Sub Sistem Paiton dan Grati ditopang oleh dua pembangkit utama yang atau dalam sistem interkoneksi disebut dengan *base load*.

Pembangkit utama Sub Sistem Paiton dan Grati yaitu PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) PAITON 2 x 400 MW dan PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) GRATI 6 x 100 MW (Gas Turbin) + 150 MW (*Steam Turbin*) yang terhubung dengan jaringan 500 kV dan 150 kV. Sedangkan untuk pembangkit *peak load* disuplai oleh PLTA Sengguruh 2 x 14,5 MW, PLTA Sutami 3 x 35 MW, PLTA Wlingi 2 x 27 MW, PLTA Lodoyo 1 x 4,5 MW, PLTA Selorejo 2 x 27 MW, dan PLTA Mendalan 3 x 5,8 MW yang terhubung dengan jaringan 150 kV dan 70 kV.

Pada saat sistem interkoneksi mengalami gangguan, maka sistem tersebut harus segera ditangani untuk melewati kondisi *transient*. Sistem tenaga dikatakan normal apabila frekuensi sistem berkisar antara 49,5 – 50,5 Hz. Standar ekskursi tegangan sistem 150 kV dan 70 kV +5% ; -10% [3].

Pembangkit Paiton yang mengalami gangguan akibat datangnya ubur-ubur menyebabkan sistem mesin pendingin salah satu unit pembangkit rusak, sehingga unit tersebut tidak dapat beroperasi untuk mensuplai daya pada Sub Sistem Paiton Grati.

Gangguan pada sistem transmisi 150 kV Jalur Paiton-Grati terjadi karena layang-layang yang tersangkut pada kabel, mengakibatkan pasokan listrik dari pembangkit Grati menjadi terganggu. Kejadian tersebut membuat sistem interkoneksi menjadi tidak stabil.

Critical clearing time adalah waktu pemutusan kritis selama terjadi gangguan tanpa kehilangan kestabilan sistem. Tujuan dari penentuan CCT adalah untuk menentukan karakteristik proteksi yang dibutuhkan oleh sistem tenaga. Penentuan CCT

dilakukan ketika terjadi *short circuit* pada saluran transmisi maupun pada bus sistem tenaga.

Menurut Taylor, untuk menangani stabilitas tegangan akibat terganggunya suplai daya pembangkit dilakukan *undervoltage load shedding*. Sistem dimodelkan di dalam rangkaian *equivalent* dengan tegangan sebagai parameter, kemudian diaplikasikan pada seting relay *undervoltage* dan *time delay* [4].

Menurut Bambaravanage, pembangkit utama memiliki peran yang sangat penting dalam aspek ekonomi maupun stabilitas, dalam hal ini adalah PLTGU Grati dan PLTU Paiton. Jika terjadi gangguan yang terhubung dengan pembangkit kapasitas besar, maka harus dilakukan isolasi dari sistem interkoneksi untuk menghindari sistem *blackout*. Selanjutnya analisa dilakukan menggunakan *undervoltage load shedding*. Tahapan – tahapan *load shedding* diidentifikasi berdasarkan pada perubahan tegangan sistem [5]. Diperlukan pemodelan sistem interkoneksi Sub Sistem Paiton dan Grati Jawa Region 4 Jaringan Transmisi 150 kV yang mengalami kejadian *short circuit* pada line yang menghubungkan Bus Grati 150 kV dengan Bus GDTAN 1 150 kV dan Pembangkit Paiton *trip*. Kemudian dilakukan penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) untuk pengamanan sistem interkoneksi khusus untuk terjadi *short circuit*.

Hasil pemodelan tersebut disimulasikan menggunakan data *real* yang diambil dari Unit Pelayanan Pengatur Beban (UP2B) Jawa Timur saat *peak load* dengan total pembangkitan sebesar 1415,244 MW dan 553,149 MVAR.

II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Pengertian kestabilan dalam sistem tenaga listrik adalah kesanggupan dari sebuah sistem tenaga listrik atau dari komponennya dalam menjaga sistem tetap sinkron dan seimbang. Pada sistem tenaga listrik pengelompokan masalah kestabilan dibagi menjadi 3 bagian berkaitan dengan kecil atau besar gangguan dan bentuk dari gangguan, yaitu[1]:

1. Kestabilan *Steady-State*
2. Kestabilan Transien
3. Kestabilan Dinamis

Pada sistem tenaga listrik terdapat 2 kategorigangguan yang menyebabkan masalah kestabilan, yaitu:

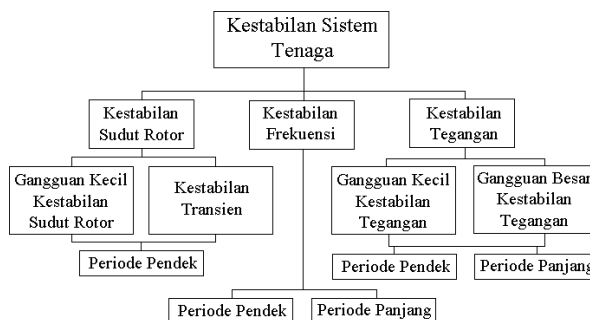
1. Gangguan Kecil

Gangguan kecil adalah gangguan dengan perubahan sisi beban atau sisi pembangkit dengan acak, perlahan,

dan meningkat atau menurun.

2. Gangguan Besar

Gangguan besar adalah gangguan menyebabkan perubahan secara mendadak di tegangan bus yang seharusnya langsung dihilangkan. Apabila tidak langsung dihilangkan, kestabilan sistem sangat terpengaruh dengan gangguan tersebut. Selain besarnya gangguan, kestabilan sistem terpengaruh dengan panjang waktu gangguan.



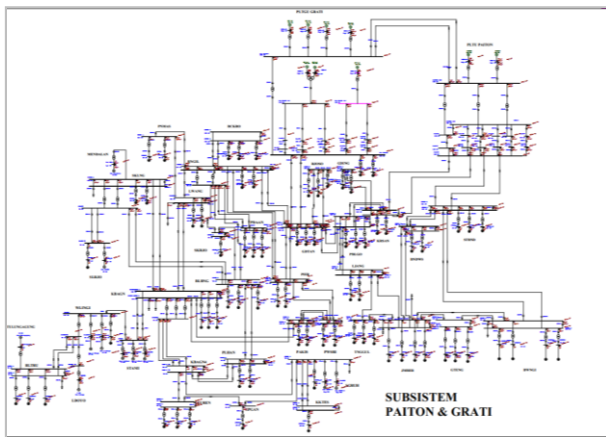
Gambar 1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [1]

Dalam paper IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik secara umum dapat dibagi menjadi tiga macam kategori, yaitu: Stabilitas Sudut Rotor, Stabilitas Frekuensi dan Stabilitas Tegangan. Stabilitas Sudut Rotor yaitu kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling terkoneksi pada suatu sistem tenaga listrik untuk tetap dalam keadaan sinkron. Stabilitas Frekuensi yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* frekuensi akibat gangguan. Sedangkan Stabilitas Tegangan yaitu kestabilan dari sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan nilai tegangan yang masih dapat diterima saat terjadi *kontingensi* atau gangguan.

III. PEMODELAN DAN METODOLOGI ANALISIS GANGGUAN SUB SISTEM PAITON DAN GRATI

Interkoneksi Sub Sistem Paiton dan Grati digunakan sebagai bahan untuk analisa stabilitas transien dapat digambarkan pada *single line diagram* pada gambar 2. Sistem Interkoneksi Paiton dan Grati memiliki jumlah pembangkit sebanyak 20 unit dengan total beban yang ditanggung sebesar 1441,785 MW dan 359,604 Mvar.

Hasil simulasi sistem interkoneksi SS Paiton dan Grati dalam kondisi normal sebelum gangguan. Bus Grati 500 kV memiliki tegangan 501,944 kV, Bus Grati 150 kV memiliki tegangan 152,454 kV dan Bus Kebonagung 70 kV memiliki tegangan nominal 69,012 kV. Data dari hasil simulasi *load flow* pada tabel 5.7 akan dianalisis perubahannya setelah terjadi gangguan *short circuit 3 phase* dan gangguan Paiton *trip*. Perubahan aliran daya aktif dan reaktif juga menjadi bahan analisis untuk mengetahui kurva P-V dan Q-V pada kejadian *transient stability*.

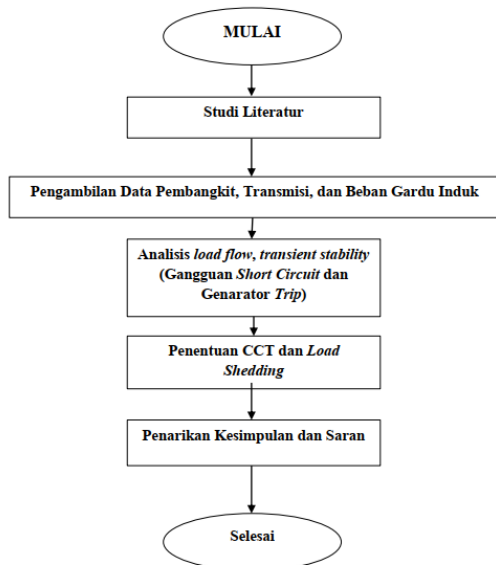


Gambar 2. Simulasi Etap 12.6 Kondisi Normal

Tabel 1
Pemodelan Sistem Kondisi Normal

Bus ID	Nominal kV	Voltage	MW Loading	Mvar Loading
Bus Grati7	500	501,944	453,85	236,987
Bus Grati5	150	152,454	731,666	235,304
PAITON 500	500	506,423	530,534	127,034
PAITON 150	150	150,829	175,022	21,824
GDTAN_1	150	147,315	389,297	98,717
KBGN A 70	70	69,012	102,694	37,045

(Sumber) Hasil Simulasi Etap 12.6

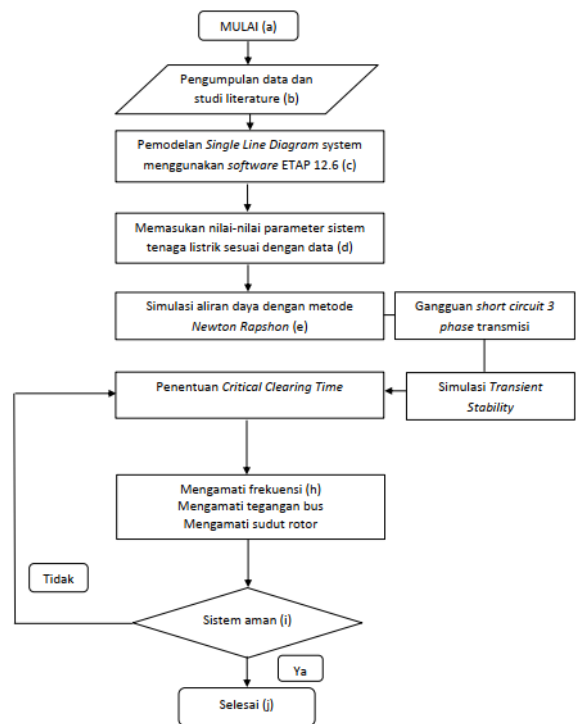


Gambar 3. Diagram Alir Metode Penelitian

Gambar 3 menjelaskan diagram alir metodologi penelitian sebagai berikut :

1. Studi Literatur pada penelitian ini berkaitan dengan *transient stability* pada sistem interkoneksi
2. Data yang digunakan adalah data aliran daya UP2B Jawa Timur yang terdiri dari data pembangkitan, beban gardu induk, data busbar dan penghantar.
3. Analisis *transient stability* untuk mengetahui perubahan frekuensi, tegangan, serta perubahan sudut rotor dari gangguan yang terjadi menggunakan simulasi Etap 12.6

4. Analisis stabilitas transien berdasarkan jenis gangguan yaitu *short circuit 3 phase* pada transmisi 150 kV dan generator *trip* Pembangkit Paiton. Pada gangguan *short circuit 3 phase* dilakukan penentuan waktu CCT untuk pengamanan sistem. Pada gangguan generator *trip* dilakukan pengamanan dengan metode *undervoltage load shedding* dengan beberapa skenario pelepasan beban.
5. Penarikan kesimpulan yaitu memberikan penilaian secara kualitatif berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dalam menjawab permasalahan yang telah dirumuskan dan mencapai tujuan yang telah ditentukan.

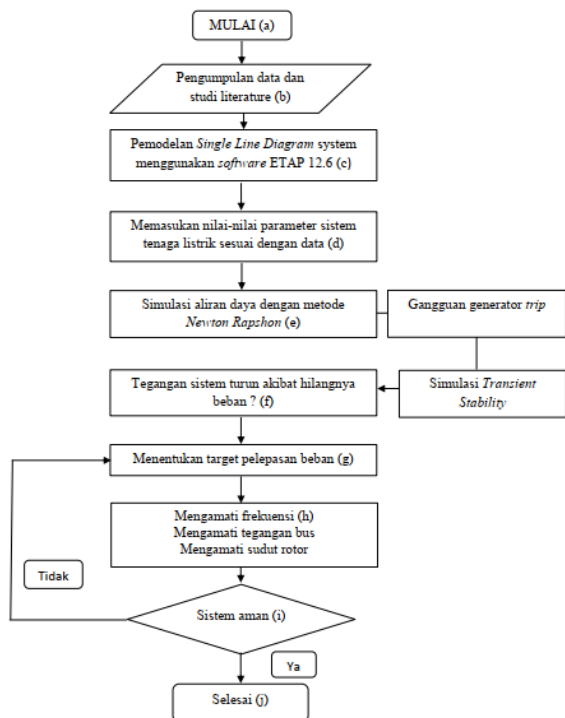


Gambar 4. Diagram Alir Gangguan Short Circuit Transmisi

Gambar 4 merupakan diagram alir penyelesaian untuk kasus gangguan *short circuit* transmisi dengan tahapan sebagai berikut :

1. Pengumpulan data pembebanan SS Paiton dan Grati
2. Memasukkan nilai parameter pada simulasi etap 12.6
3. Mensimulasikan aliran daya pada simulasi untuk mengetahui kondisi sistem
4. Menimulasikan gangguan *short circuit 3 phase* pada transmisi
5. Mengamati stabilitas transien akibat gangguan *short circuit 3 phase*
6. Menentukan nilai *critical clearing time* untuk pemutusan jaringan transmisi yang mengalami gangguan
7. Mengamati frekuensi, tegangan bus, dan sudut rotor apakah kembali dalam kondisi *steady state*
8. Apabila sistem sudah kembali dalam keadaan *steady state* maka dilakukan penarikan kesimpulan

dari hasil simulasi, tetapi apabila sistem masih belum dalam keadaan *steady state* maka kembali pada tahap 6 yaitu menentukan nilai *critical clearing time*.



Gambar 5. Diagram Alir Gangguan *Short Circuit* Transmisi

Gambar 5 merupakan diagram alir penyelesaian untuk kasus gangguan generator paiton *trip* dengan tahapan sebagai berikut :

1. Pengumpulan data pembebanan SS Paiton dan Grati
2. Memasukkan nilai parameter pada simulasi etap 12.6
3. Mensimulasikan aliran daya pada simulasi untuk mengetahui kondisi sistem
4. Mensimulasikan gangguan generator *trip* pembangkit paiton
5. Mengamati frekuensi, tegangan, dan sudut rotor apakah sudah memenuhi kriteria sistem dalam kondisi aman.
 - Frekuensi pada bus 50 Hz (+ - 2%)
 - Tegangan pada bus 150 kV dan 70 kV (+5% , - 10%)
 - Perubahan sudut rotor melihat pada kurva generator
6. Apabila sistem belum mencapai standar aman dilakukan *load shedding*. Bila sistem sudah mencapai kondisi standar, maka ditarik kesimpulan.

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

Setelah menggambarkan pemodelan Sub Sistem Paiton dan Grati dalam bentuk *single line diagram software* ETAP 12.6, maka selanjutnya akan dilakukan dimulasi stabilitas transien meliputi kasus *short circuit 3*

phase transmisi 150 kV dan generator paiton *trip* dengan studi kasus seperti tabel di bawah ini.

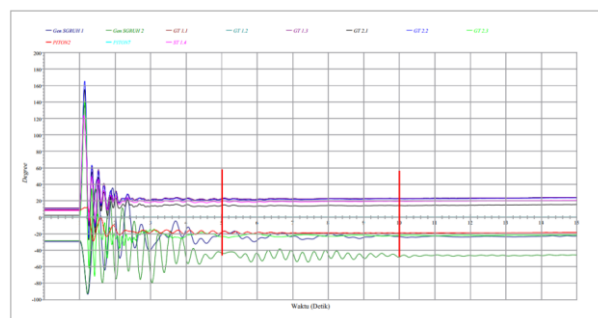
Tabel 2
Gangguan Pada Sub Sistem Paiton dan Grati

No	Jenis Gangguan	Lokasi	Aksi	Daya
1	<i>Short Circuit 3 Phase</i>	Line 150 kV Bus GRATIS-GDTAN	CB 923 Open 316	364,4 MW 106,4 MVAR
2	Generator <i>Trip</i>	Pembangkit PITON2	CB 943 Open	300 MW 55,9 MVAR

Simulasi Gangguan *Short Circuit 3 Phase*

Pada kasus ini, *short circuit* disebabkan oleh saluran 150 kV yang menghubungkan Bus Grati dan Bus GDTAN terkena gangguan hubung singkat 3 *phase*, sehingga dilakukan analisis dengan mensimulasikan hubung singkat pada saluran tersebut.

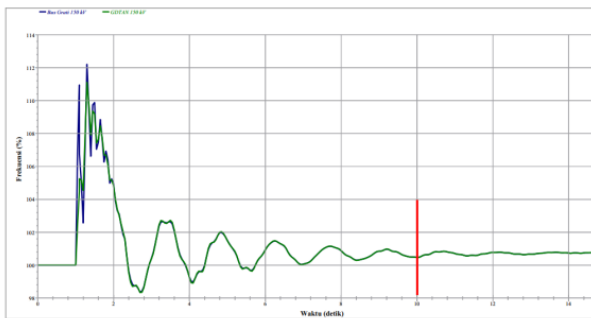
Untuk menentukan waktu *trip* CB dilakukan metode *trial and error* dengan mengatur waktu pemutusan yang tepat pada saluran sebelum sistem menjadi tidak stabil. Pada analisis ini parameter yang dilihat yaitu bus Grati5 dan bus terdekat dengan saluran yang terkena hubung singkat. Waktu pemutusan sebelum sistem menjadi tidak stabil adalah *critical fault clearing time*. Pada simulasi berikut yang digunakan adalah data operasi P2B Jawa Timur, untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 6. Respon Sudut Rotor Gangguan *Short Circuit*

Pada simulasi kejadian *short circuit* Line217 merupakan saluran transmisi yang menghubungkan Bus Grati 150 kV dan Bus GDTAN dengan pemutus saluran CB316 dan CB923. Waktu CCT ditentukan sebesar 97 ms dengan memperhatikan respon sistem agar menjadi stabil kembali dalam kondisi sinkron.

Dapat dilihat pada gambar 6 ketika terjadi hubung singkat 3 fasa maka setelah dilakukan pemutusan waktu CCT 97 ms respon sudut rotor generator Grati, Paiton, dan Sengguruh mengalami osilasi, akan tetapi dapat kembali dalam keadaan *steady state* pada detik ke 10. Osilasi terbesar terjadi pada generator Grati GT 2.2 yaitu sebesar 162,50 *degree*.



Gambar 7 Respon Frekuensi Gangguan Short Circuit

Dapat dilihat pada gambar 7, respon frekuensi antara bus Grati dan bus Gondangwetan ketika terjadi gangguan frekuensi sistem mengalami osilasi maksimal sebesar 55,47 Hz dan minimal 49,18 Hz tetapi frekuensi sistem atau bus dapat kembali mencapai *steady state* pada 50,38 Hz. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi masih dalam *range* aman. Kenaikan frekuensi ini disebabkan karena transfer daya aktif pada bus grati mengalami penurunan dari 727,2 590 MW menjadi 590,5 MW, sehingga kehilangan daya penyaluran sebesar 137,2 MW.

Tabel 3
Respon Sudut Rotor Seluruh Generator

Generator ID	Angle Awal (Deg.)	Angle Peak (Deg.)	Angle Akhir (Deg.)	Daya Awal MW	Daya Akhir MW
SGRUH1	29,79 (lagging)	97,62 (lagging)	22,39 (lagging)	8,000	7,956
SGRUH2	28,22 (lagging)	99,59 (lagging)	20,42 (lagging)	8,000	7,958
GT 1.1	11,01 (leading)	134,37 (leading)	24,27 (leading)	100,000	99,829
GT 1.2	11,01 (leading)	134,37 (leading)	24,27 (leading)	100,000	99,829
GT 1.3	11,01 (leading)	134,37 (leading)	24,27 (leading)	100,000	99,829
GT 2.1	2,28 (leading)	152,52 (leading)	15,50 (leading)	100,000	99,809
GT 2.2	9,34 (leading)	162,50 (leading)	23,83 (leading)	100,000	99,827
GT 2.3	2,47 (lagging)	132,45 (leading)	22,14 (lagging)	80,000	61,974
PITON2	8,77 (leading)	34,44 (lagging)	18,29 (lagging)	300,000	240,120
PITON7	0,00 (leading)	0,00 (leading)	0,00 (leading)	231,072	171,958
ST 1.4	8,01 (leading)	122,61 (leading)	20,67 (leading)	150,000	149,761

(Sumber) Hasil Simulasi Etap 12.6

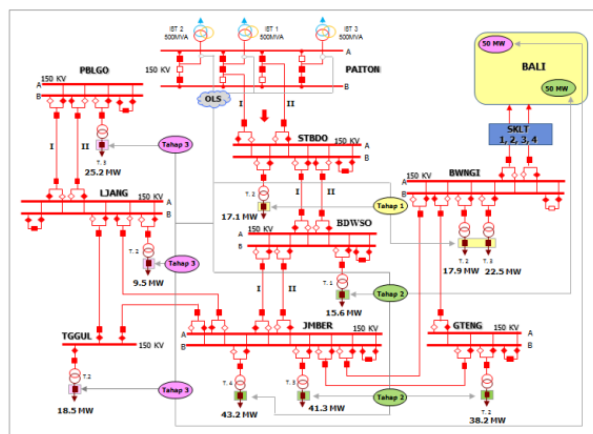
Dapat dilihat pada tabel 3 respon sudut rotor masing-masing generator setelah mengalami kejadian *short circuit* dengan waktu *critical clearing time* sebesar 0,97 ms. Seluruh generator mengalami isolasi dengan nilai terbesar terjadi pada generator grati GT 2.2 yaitu 162,50 *degree* dalam posisi *leading* dan mencapai *steady state* pada 23,83 *degree* dalam posisi *leading*. Generator yang lain juga berhasil mencapai *stady state* setelah mengalami isolasi akibat kejadian *short circuit 3 phase*.

Sedangkan penurunan transfer daya terbesar terjadi pada generator piton7 yang beroperasi sebagai *swing generator* dan piton2 yang beroperasi sebagai *mvar control generator*. Penurunan generator piton7 sebesar 59,114 MW dan generator piton2 sebesar 59,88 MW.

Apabila \sum Pembangkit < \sum Beban maka frekuensi sistem akan mengalami kenaikan. Perubahan frekuensi sistem dari 50 Hz berubah menjadi 50,38 Hz.

Simulasi Gangguan Generator Trip

Pada kasus ini, Sub Sistem Paiton dan Grati kehilangan suplai daya pembangkit dari PLTU Paiton sebesar 300 MW dan 55,927 MVAR. Sehingga dari total kebutuhan beban 1441,785 MW sistem kehilangan 20,8 % suplai daya. Dalam mengatasi gangguan ini, dilakukan analisis *undervoltage load shedding* untuk tindakan pengamanan sistem.



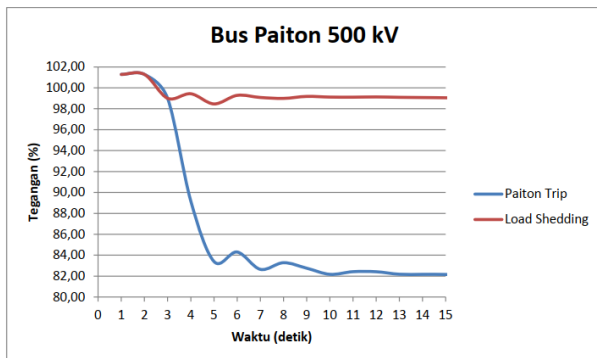
Gambar 8. Skema Load Shedding (Sumber) PLN APB Jawa Timur

Tabel 4
Tahap Pelepasan Beban Tahap 1 dan 2

Bus	Circuit Breaker Open	Daya
Banyuwangi	CB 596	19,647 MVA
	CB 597	4 MVA
	CB 598	14,142 MVA
	CB 599	10,198 MVA
Situbondo	CB 142	10,198 MVA
	CB 286	9,22 MVA
	CB 287	12,649 MVA
	CB 287	12,649 MVA
Bondowoso	CB 189	17,029 MVA
	CB 302	15,133 MVA
Genteng	CB 889	88,53 MVA
	CB 889	88,53 MVA
Jember	CB 583	24,083 MVA
	CB 603	9,062 MVA
	CB 604	38,471 MVA
	CB 605	44,272 MVA
TOTAL		316,634 MVA

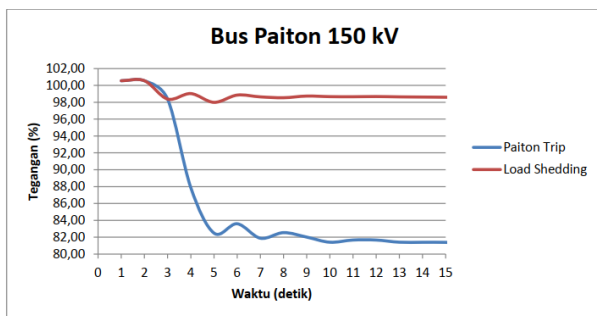
Dapat dilihat pada gambar 8 skema *load shedding* IBT 500/150 kV GITET Paiton yang dibagi menjadi beberapa tahap. Pada tahap I pelepasan beban dilakukan pada bus Banyuwangi dan bus Situbondo. Pada tahap II pelepasan beban dilakukan pada bus Bondowoso, bus Genteng dan bus Jember. Pada tahap III pelepasan beban dilakukan pada bus Probolinggo, bus Lumajang, dan bus Tanggul.

Tahap pelepasan beban tergantung pada besar selisih daya pembangkitan dan daya pembebanan dengan mengacu pada perubahan tegangan sistem.



Gambar 9. Grafik Perubahan Tegangan Bus 500 kV

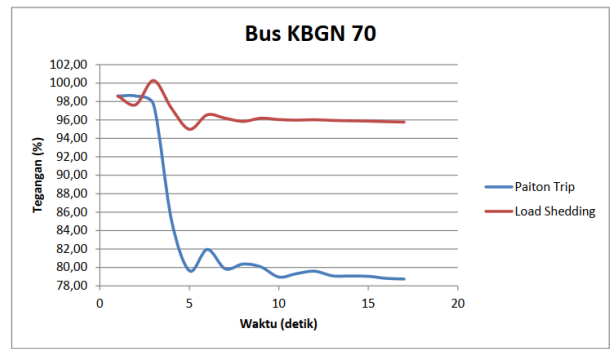
Dapat dilihat pada gambar 9 grafik perubahan tegangan simulasi gangguan Paiton *trip* pada bus 500 kV sebelum dan setelah dilakukan *load shedding* dengan waktu simulasi 15 detik. Sebelum dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 500 kV turun menjadi 82,02 % dan setelah dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 500 kV naik menjadi 98,98 %.



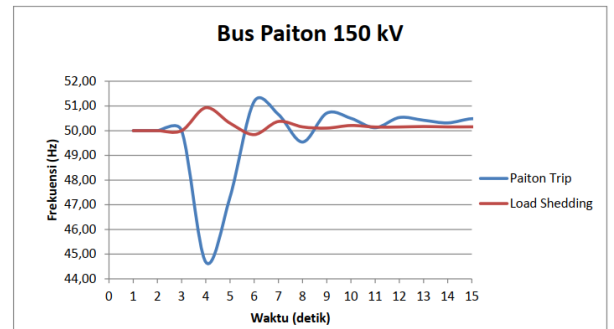
Gambar 10. Grafik Perubahan Tegangan 150 kV

Dapat dilihat pada gambar 10 grafik perubahan tegangan simulasi gangguan Paiton *trip* pada bus 150 kV sebelum dan setelah dilakukan *load shedding* dengan waktu simulasi 15 detik. Sebelum dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 150 kV turun menjadi 81,24 % dan setelah dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 150 kV naik menjadi 98,53 %.

Dapat dilihat pada gambar 11 grafik perubahan tegangan simulasi gangguan Paiton *trip* pada bus 70 kV sebelum dan setelah dilakukan *load shedding* dengan waktu simulasi 15 detik. Sebelum dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 70 kV turun menjadi 78,75 % dan setelah dilakukan *load shedding* tegangan nominal bus 70 kV naik menjadi 95,77 %.

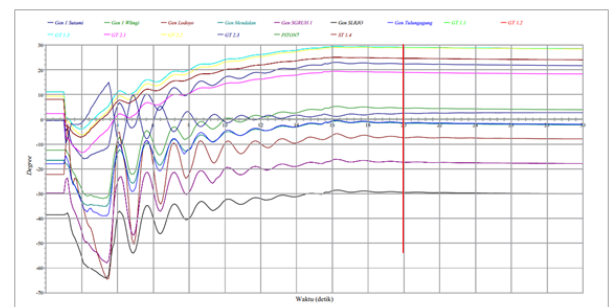


Gambar 11. Grafik Perubahan Tegangan Bus 70 kV



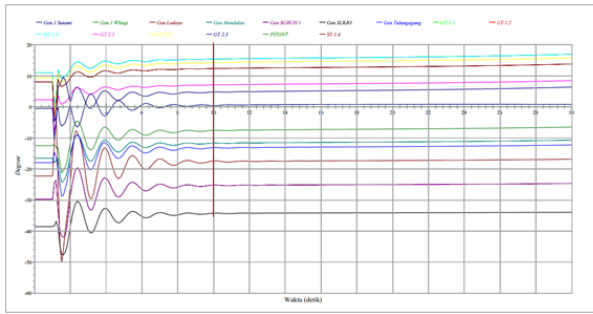
Gambar 12. Grafik Perubahan Frekuensi

Dapat dilihat pada gambar 12 grafik perubahan frekuensi simulasi gangguan Paiton *trip* pada bus 150 kV sebelum dan setelah dilakukan *load shedding* dengan waktu simulasi 15 detik. Sebelum dilakukan *load shedding* frekuensi sistem pada detik ke empat mengalami penurunan menjadi 44,68 Hz dan mencapai keadaan stabil menjadi 50,40 Hz. Setelah dilakukan *load shedding* frekuensi sistem pada detik ke empat mengalami kenaikan menjadi 50,93 Hz dan mencapai keadaan stabil menjadi 50,16 Hz.



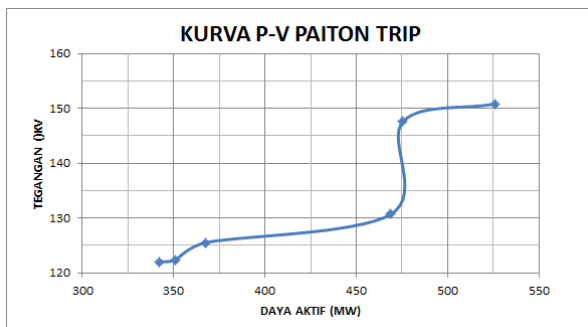
Gambar 13. Grafik Perubahan Sudut Rotor Sebelum Load Shedding

Ketika pembangkit PAITON2 lepas dengan daya pembangkitan sebesar 300 MW maka sudut rotor semua generator pada sistem akan mengalami perubahan. Dapat dilihat pada gambar 5.15 yaitu, pada generator GT 1.1, GT 1.2, GT 1.3 PLTGU Grati nilainya 11,01 *degree* turun menjadi -4,07 *degree* dan *steady state* pada 23,39 *degree*. Kemudian pada generator GT 2.1 nilainya 2,28 *degree* turun menjadi -13,51 *degree* dan *steady state* pada 18,30 *degree*. Waktu yang dibutuhkan semua generator untuk mencapai kondisi stabil / *steady state* sebelum dilakukan *load shedding* yaitu 20 detik.



Gambar 14. Grafik Perubahan Sudut Rotor Setelah Load Shedding

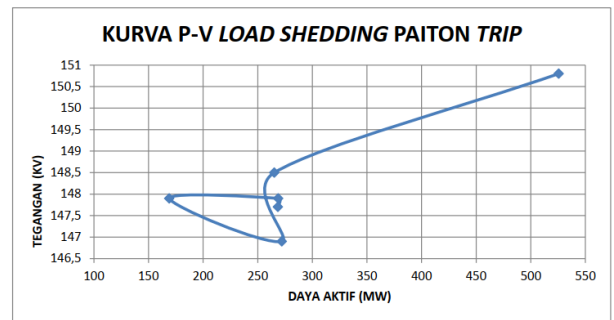
Dapat dilihat pada gambar 5.16 perubahan sudut rotor setelah dilakukan *load shedding*, semua generator mencapai kondisi stabil / *steady state* dengan waktu 10 detik. Pada generator GT 1.1, GT 1.2, GT 1.3 PLTGU Grati perubahan sudut rotor nilainya 11,01 *degree* turun menjadi -0,02 *degree* dan *steady state* pada 15,65 *degree*. Kemudian pada generator GT 2.1 nilainya 2,28 *degree* turun menjadi -8,24 *degree* dan *steady state* pada 7,29 *degree*. Waktu yang dibutuhkan semua generator untuk mencapai kondisi stabil / *steady state* sebelum dilakukan *load shedding* yaitu 10 detik.



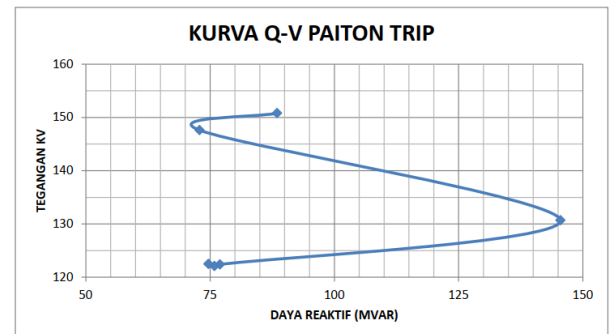
Gambar 15. Kurva P-V Bus Paiton 150 kV Paiton Trip

Dapat dilihat pada gambar 15 pada saat generator paiton mengalami *trip*, perbandingan kurva antara daya aktif dan tegangan pada bus 150 kV mengalami penurunan. Sebelum sistem mengalami gangguan daya aktif pada bus 150 kV sebesar 525,6 MW dan tegangan menunjukkan 150,8 kV. Setelah paiton mengalami *trip* aliran daya aktif 342 MW dan tegangan turun menjadi 122 kV.

Dapat dilihat pada gambar 16 perbandingan antara daya aktif dengan tegangan setelah dilakukan *load shedding* pada bus 150 kV. Sebelum mengalami gangguan daya aktif yang mengalir yaitu 525,6 MW dan tegangan menunjukkan 150,8 kV. Setelah sistem mengalami gangguan paiton *trip* dan dilakukan *load shedding* daya aktif yang mengalir yaitu 268,5 MW dan tegangan menunjukkan 147,7 kV.

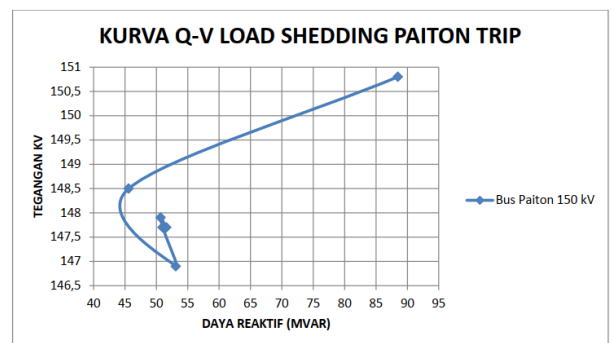


Gambar 16. Kurva P-V Bus Paiton 150 kV Load Shedding



Gambar 17. Kurva Q-V Bus Paiton 150 Paiton Trip

Dapat dilihat pada gambar 5.19 perbandingan antara daya reaktif dan tegangan pada bus 150 kV ketika sistem mengalami gangguan paiton *trip*. Sebelum gangguan daya reaktif yang melewati bus 150 kV yaitu 88,5 Mvar dan tegangan 150,8 kV. Setelah sistem mengalami gangguan paiton *trip*, daya reaktif menunjukkan 74,7 Mvar dan tegangan 122,5 kV.



Gambar 18. Kurva Q-V Bus Paiton 150 kV Load Shedding

Dapat dilihat pada gambar 18 perbandingan antara daya reaktif dan tegangan pada bus 150 kV ketika sistem mengalami gangguan paiton *trip* dan dilakukan *load shedding*. Sebelum gangguan daya reaktif yang melewati bus 150 kV yaitu 88,5 Mvar dan tegangan 150,8 kV. Setelah sistem dilakukan *load shedding*, daya reaktif menunjukkan 51,6 Mvar dan tegangan 147,7 kV.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi stabilitas transien pada sistem interkoneksi Paiton dan Grati yang mengalami gangguan *short circuit 3 pashe* dan generator paiton *trip* maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Gangguan *short circuit 3 phase* transmisi bus Grati – Gondangwetan diperoleh nilai *critical clearing time* sebesar 0,97 ms.
2. Sistem interkoneksi Paiton dan Grati mengalami *short circuit* sistem kembali dalam keadaan stabil / *steady state* dengan nilai frekuensi 50,38 Hz. Sedangkan untuk sudut rotor generator yang terhubung dapat mencapai kondisi stabil dalam waktu 10 detik, dengan osilasi terbesar terjadi pada generator PLTGU Paiton GT 2.2 yaitu 162,50 *degree*.
3. Sistem interkoneksi Paiton dan Grati saat mengalami generator Paiton *trip* tegangan transmisi 70 kV turun menjadi 78,75 %, tegangan transmisi 150 kV turun menjadi 81,24 %, dan tegangan transmisi 500 kV turun menjadi 82,02 % sehingga perlu dilakukan *load shedding*.
4. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2 nilai tegangan transmisi 70 kV naik menjadi 95,77 %, tegangan transmisi 150 kV naik menjadi 98,53%. Dan tegangan transmisi 500 kV naik menjadi 98,98%.
5. Frekuensi sistem ketika mengalami generator Paiton *trip* naik menjadi 50,40 Hz dan setelah dilakukan *load shedding* mencapai nilai baru menjadi 50,16 Hz.
6. Respon sudut rotor ketika mengalami generator Paiton *trip* mengalami osilasi dan mencapai kondisi *steady state* dengan waktu 20 detik. Setelah dilakukan *load shedding* respon sudut rotor dapat mencapai kondisi *steady state* dengan waktu 10 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Graha Ilmu
- [2] Takada, Kato, Iwamoto. 2001. *Transient Stability Preventive Control Using CCT and Generation Margin*. Tokyo, Japan. 0-7893-7173-9
- [3] PT. PLN (PERSERO). 2013. SPLN T6.001. Jakarta Selatan
- [4] Taylor, Carson W. 1992. "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability." *IEEE Transactions on Power Delivery* 7(2): 480–88.
- [5] Bambaravanage, Tharangika. 2018. *Modeling, Simulation, and Control of a Medium-Scale Power System*. Springer Nature Singapore Pte Ltd
- [6] Acharya Sandesh. *Transient Stability Assessment for Generators and DER integration into the IEEE 9 Bus System*.
- [7] Li, Ye, Baohui Zhang, and Zhiqian Bo. 2014. "The Optimization of Undervoltage Load Shedding Strategy." *POWERCON 2014 - 2014 International Conference on Power System Technology: Towards Green, Efficient and Smart Power System, Proceedings (Powercon)*: 164–69.
- [8] Rovnyak, Steven M., Kejun Mei, and Guang Li. 2003. "Fast Load Shedding for Angle Stability Control." *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Conference Proceedings* 4: 2275–79.
- [9] Shikha Sharma, 2018. *Sensitivity of Transient Stability Critical Clearing Time*. IOWA State University
- [10] Zhao, Yiming, Songhao Yang, Baohui Zhang, and Ye Li. 2020. "Undervoltage and Underfrequency Combined Load Shedding Method." : 903–7.
- [11] Rezky, Prima Prahasta, Ontoseno Penangsang, and Ni Ketut Aryani. 2016. "Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW Pada Tahun 2021." *Jurnal Teknik ITS* 5(2).
- [12] Sunyoto, Andrik, Hadi Suyono, and Abraham Lomi. 2018. "Load Shedding Strategy in Electrical Power System Using Under Frequency Relay." 13(3): 12–19.
- [13] P. Kundur. 1993. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Inc, New York
- [14] Allen J. Wood, Bruce F. 1996. Wollenberg. *Power Generation, Operation, and Control*. New York, United States of America