

Respon Frekuensi dan Tegangan Saat Gangguan pada Bus-Bus Sistem Kelistrikan Steam Turbine Generator – Batu Bara (STG-BB) P.T Pupuk Sriwijaya Palembang

Wiwin Arnoldo Oktaviani^{1*}, Agus Alpran Munandar¹, Taufik Barlian¹

¹Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang

Jl. Jenderal Ahmad Yani 13 Ulu

Kec. Plaju, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30116

Corresponding author: ^{*}wiwin_oktaviani@um-palembang.ac.id

Abstrak - Steam Turbine Generator – Batu Bara (STG-BB) merupakan unit pembangkit baru di PT.PUSRI berkapasitas 32 MW yang diperuntukkan untuk mendukung unit-unit pembangkit lama yang berusia lebih dari 20 tahun. Untuk menilai kinerja sistem kelistrikan STG-BB saat terjadi gangguan dilakukan simulasi stabilitas transient dengan asumsi gangguan terjadi di setiap bus sistem. Penelitian ini dibatasi mencakup kestabilan frekuensi dan tegangan. Dari simulasi yang dilakukan menunjukkan baik frekuensi dan tegangan mengalami kenaikan dan penurunan melebihi batas toleransi yang diizinkan, baik saat terjadi gangguan simetris maupun asimetris. Perubahan nilai kedua parameter ini berlangsung di kisaran 1,2 – 2 detik dengan penurunan frekuensi rata-rata sebesar 98,3%. Dari sisi tegangan, pada saat terjadi gangguan simetris tegangan pada setiap bus akan mengalami penurunan terutama pada bus yang terganggu dan bus-bus yang berada di bawahnya tegangan turun hingga mencapai nol. Sedangkan pada saat terjadi gangguan asimetris kenaikan tegangan mencapai lebih dari 200%. Hasil ini menunjukkan tingkat kestabilan transient sistem kelistrikan STG-BB saat gangguan terjadi di bus-bus belum baik, sehingga diperlukan analisis lanjutan dengan mensimulasikan proteksi frekuensi mengikuti standar pedoman tertentu seperti IEEE.

Kata Kunci : *Kestabilan Transien, Kestabilan Frekuensi, Kestabilan Tegangan*

Abstract - Steam Turbine Generator — Coal (STG-BB) is a new generator unit at PT. PUSRI with a capacity of 32 MW which is intended to support old generating units that are more than 20 years old. The performance assessment of the STG-BB electrical system when there is a disturbance on the buses is carried out by simulating transient stability, assuming the disturbance occurs in each system bus. This research is limited to include frequency and voltage stability. From the simulations performed, it shows that both the frequency and voltage have increased and decreased beyond the allowable tolerance limits, both when there is a symmetrical and asymmetrical fault. The change in the value of these two parameters took place in the range of 1.2 – 2 seconds with an average decrease in frequency of 98.3%. In terms of voltage, when a symmetrical fault occurs, the voltage on each bus will experience a voltage drop until it reaches zero on the interrupted bus and the buses that are under it. Meanwhile, when there is an asymmetrical fault, the voltage increase reaches more than 200%. These results indicate that the transient stability level of the STG-BB electrical system when the disturbance occurs on buses is not yet good, so further analysis is needed by simulating frequency protection following certain guideline standards such as IEEE.

Keywords: *Transients Stability, Frequency Stability, Voltage Stability,*

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga dikatakan baik apabila struktur energi elektrik bisa membantu konsumen terus-menerus serta voltase beserta gelombang yang stabil, perubahan voltase beserta gelombang harus pada batas standar yang telah ditetapkan, karena perubahan pada beban akan berdampak pada kestabilan sistem. Perubahan yang signifikan bisa mengakibatkan sistem keluar pada batas kestabilannya, sehingga perubahan beban harus diikuti perubahan daya pada penggerak generator. Hal ini dilakukan agar keseimbangan tetap terjadi antar daya pada beban dan daya pada suplai. Sehingga gelombang beserta tegangan bisa terus berada pada batas normal [1].

PT. Pusri Palembang mempunyai 5 pembangkit tenaga listrik yakni 1 *Steam Turbine Generator*-Batu Bara (STG-BB) dan 4 *Gas Turbine Generator* (GTG) yang terhubung interkoneksi satu dengan yang lain melalui *synchronous bus* 13,8 kV. STG-BB merupakan pembangkit baru yang beroperasi tahun 2018. Penambahan STG-BB dengan kapasitas 32 MW mampu menurunkan nilai *Loss of Load Probability* (LOLP) yang semula 9 hari / tahun

menjadi 1 hari/tahun [2]. Tiga buah GTG merupakan pembangkit tua berusia 50 tahun dan 1 GTG berusia lebih dari 20 tahun. Usia tua pembangkit berakibat menurunnya keandalan dan unjuk kerja. Pada kasus di P.T.PUSRI, STG-BB dengan kapasitas 32 MW ini direncanakan sebagai pengganti dari pembangkit Gas Turbin Generator (GTG) P3 3006-J 18 MW. Penggantian ini akan membuat tingkat kestabilan menjadi lebih baik. Ketidakstabilan akan terjadi jika satu atau dua generator lepas yang berakibat pada penurunan frekuensi. Diperlukan mekanisme *load shedding* menggunakan standar frekuensi untuk menjaga kestabilan sistem [3] - [4].

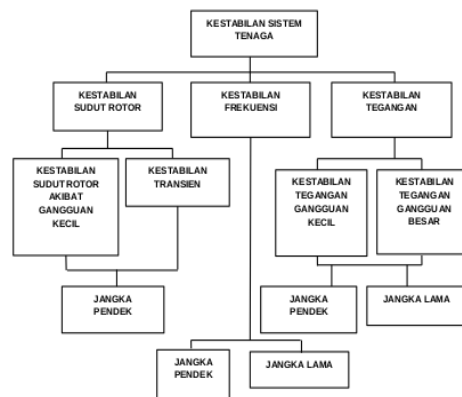
Penelitian ini bertujuan untuk mengamati respon frekuensi dan tegangan khusus di sistem kelistrikan *Steam Turbine Generator* -Batu Bara (STG-BB) PT. PUSRI Palembang saat terjadi gangguan di bus 13,8 kV, 2,4 kV dan 0,48 kV.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Tenaga Listrik

Kemampuan sistem untuk kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan menunjukkan kestabilan suatu sistem tenaga. Kestabilan ini dilihat dari kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi serta kestabilan tegangan [1], [5], [6], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Gangguan pada sistem tenaga terdiri dari gangguan besar dan gangguan kecil. Kestabilan sistem tenaga berdasarkan gangguan tersebut dibedakan lagi menjadi kestabilan *steady state* dan kestabilan transien. Kestabilan *steady state* merupakan kemampuan suatu sistem tenaga dalam mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan kecil, sedangkan kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar [7].



Gambar 1. Klasifikasi Kestabilan Sistem [8]

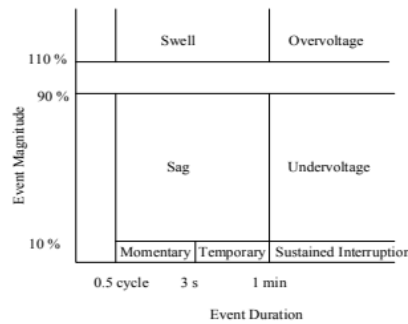
B. Kestabilan Tegangan

Batas toleransi yang diterapkan dalam tegangan normal didasarkan pada standar.PLN.[9], yaitu:

1. 500 kV $\pm 5\%$ (95% - 105%)
2. 150 kV +5%, -10% (90% - 105%)
3. 70 kV +5%, -10% (90% - 105%)
4. 20 kV +5%, -10% (90% - 105%)

Definisi kedip tegangan berdasarkan IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality [10]-[11] adalah “Penurunan tegangan RMS sebesar 0,1 – 0,9 p.u dalam durasi 0,5 cycle hingga 1 menit”. Definisi ini secara grafis ditunjukkan pada Gambar 2.

Sedangkan menurut standar Eropa, kedip tegangan adalah penurunan tegangan secara tiba-tiba dengan nilai antara 90% hingga 1% dari tegangan nominal yang diikuti dengan perbaikan tegangan dalam waktu yang singkat [12]. Untuk mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan dalam hal penurunan tegangan, pedoman IEEE 1564 menganjurkan dilakukannya perhitungan satu atau lebih karakteristik dari tegangan sampel [13].



Gambar 2. Definisi. *Voltage.Magnitude.Event* berdasarkan standar.IEEE.1159-1995.[10]

Kombinasi metode *Countinous Power Flow* dan *Time Domain Analysis* akan memberikan gambaran kestabilan tegangan sistem yang lebih komprehensif. Kombinasi kedua metode tersebut memberikan gambaran kondisi kestabilan tegangan sistem dalam keadaan statis, normal dan dinamis [14].

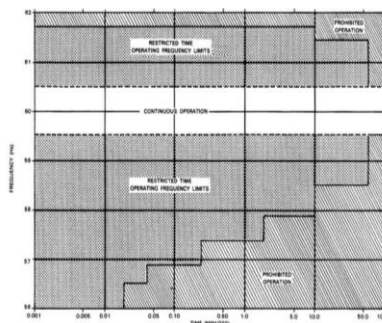
Untuk kestabilan tegangan dalam kondisi dinamis Metode Lyapunov digunakan karena metode ini mampu memodelkan ketergantungan sistem terhadap kondisi awalnya. Pada analisa stabilitas dinamis, data tegangan terhadap waktu mutlak tersedia [15].

Selain Metode Lyapunov, *Phasor Measurement Unit* (PMU) juga digunakan untuk mengukur batas kestabilan tegangan secara real time. Kelebihan Metode PMU ini adalah batasan daya reaktif pembangkit turut diperhitungkan. Metode ini memungkinkan operator sistem tenaga mampu mengetahui dengan segera seberapa jauh sistem tenaga dari kondisi tidak stabil [16].

C. Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi mengacu kepada kemampuan suatu sistem tenaga dalam mempertahankan kondisi *steady state* frekuensi akibat gangguan yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan. Hal ini didasarkan dari kemampuan sistem dalam mempertahankan dan mengembalikan keseimbangan antar pembangkitan beserta pembebanan yang disebabkan karena adanya gangguan. Umumnya, masalah kestabilan frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan dari respon peralatan listrik, lemahnya kordinasi dari peralatan kontrol dan peralatan frekuensi atau kurangnya daya cadangan pembangkitan (*spining reserve*) [11].

Batas toleransi yang diterapkan dalam menjalankan frekuensi operasi yang diizinkan pada *Steam Turbine Generator* menurut IEEE Std.106-2003 sebesar 60 Hz (Gambar 3). Namun sistem yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan frekuensi 50 Hz. sehingga perlu mengubah satuan dalam bentuk % agar dapat digunakan dalam frekuensi 50 Hz [9]. Batas toleransi frekuensi untuk Jaringan Sistem Tenaga Listrik di Sumatera adalah 50 Hz ± 0,2 Hz atau dalam rentang 99,6% - 100,4% [17].

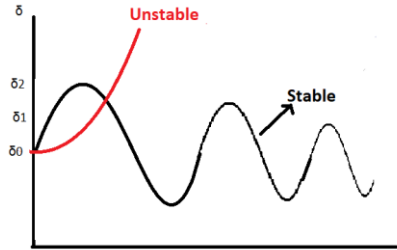


Gambar 3. Standar Frekuensi untuk *Steam Turbine Generator*. [9]

D. Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem untuk mencapai titik kesetimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar, Jika sistem kehilangan kemampuan ini akan mengakibatkan sistem kehilangan stabilitasnya karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem.

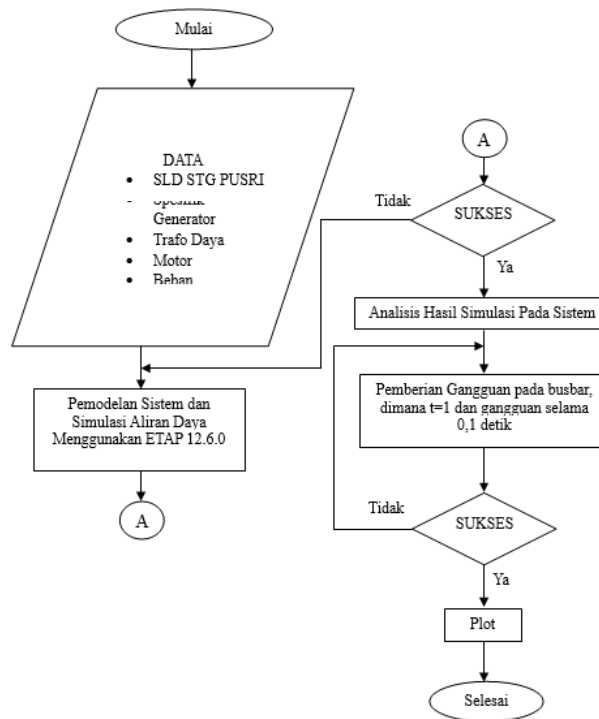
Pada kasus kestabilan transien ini sistem harus dapat mempertahankan diri dari gangguan besar atau perubahan beban yang relative besar terjadi. Perubahan beban ini dapat terjadi setelah putusnya daerah pembangkit dan lepasnya beban besar secara mendadak. Kestabilan antar energi yang masuk dan keluar pada suatu sistem akan hilang. Jika energi pada masukan tidak bisa lagi untuk mencukupi, inersia rotor mesin akan masih bekerja pada periode waktu yang relatif singkat akan terus melambat [18]. Gambar 4 menunjukkan grafik sistem saat kondisi stabil dan tidak stabil.



Gambar 4. Grafik sistem saat kondisi stabil dan tidak stabil [18]

III. METODE PENELITIAN

Tahapan simulasi pada penelitian ini digambarkan pada Gambar 5 berikut.

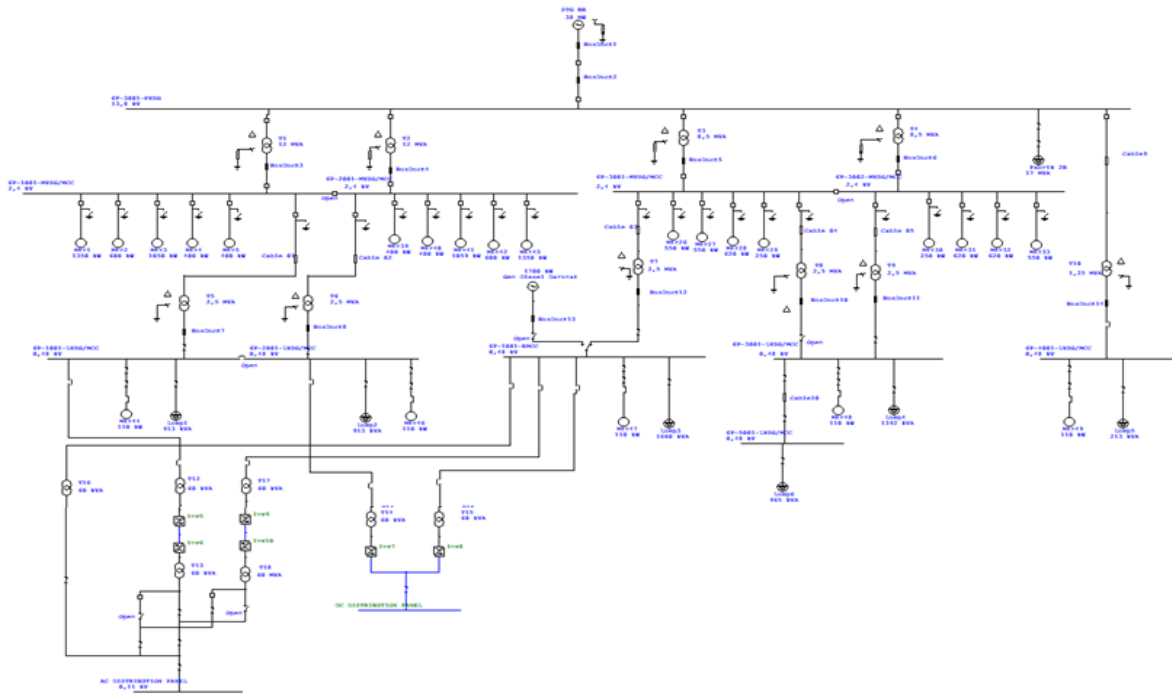


Gambar 5. Diagram Flowchart

Dalam sistem kelistrikan PT.PUSRI yang digunakan pada penelitian ini terdapat 1 bus tegangan tinggi/HVSG-13,8 kV, 4 bus tegangan menengah/MVSG-2,4 kV, dan 6 bus tegangan rendah/LVSG-440 V.

Berdasarkan data yang ada, dilakukan pemodelan dalam bentuk *single line diagram* dari sistem kelistrikan *Steam Turbine Generator*-Batu Bara (STG-BB) di PT PUSRI Palembang (Gambar 6). Perencanaan simulasi *transient stability* dilakukan menggunakan software ETAP 12.6.0 dengan asumsi bahwa terjadi gangguan simetris dan asimetris pada setiap bus sistem. Pada setiap simulasi, interval waktu yang digunakan ialah 10 detik.

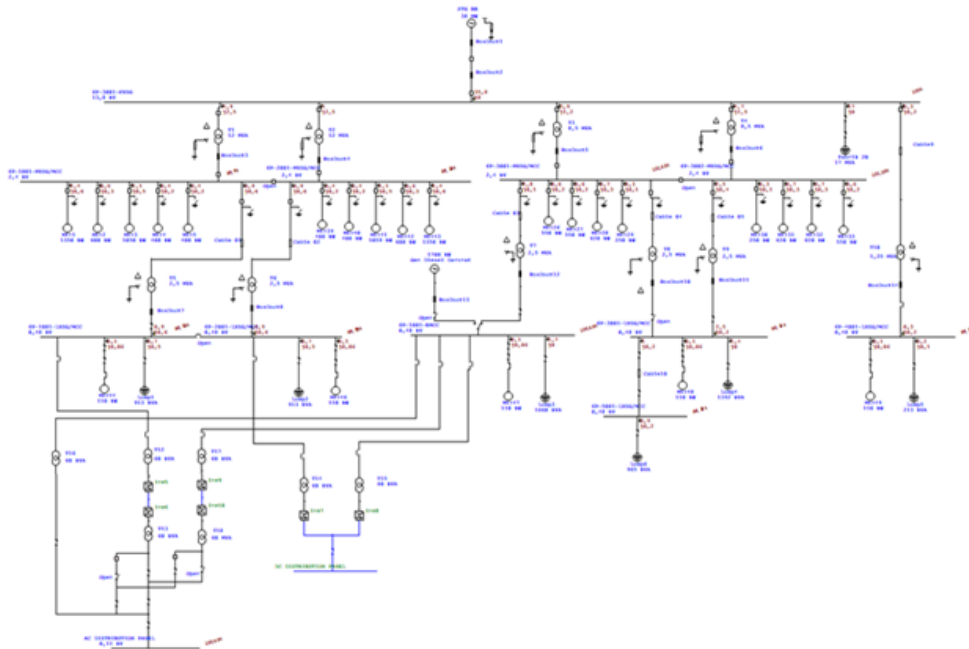
Simulasi aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson* dengan ketelitian 10^{-6} , dilakukan pada kondisi sistem tanpa gangguan. Metode dan tingkat ketelitian yang sama juga diterapkan pada simulasi transien dengan maksimal 3. Simulasi dilakukan dengan mengatur terjadinya gangguan pada $t=1$, dengan interval waktu 10 detik.



Gambar 6. Pemodelan *single line diagram* STG-BB PT. PUSRI

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi diawali dengan melakukan analisis aliran daya sistem dalam keadaan beroperasi normal. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil Simulasi *Load Flow* STG-BB PT. PUSRI

Pada Gambar 7. dapat dilihat dari simulasi aliran daya menunjukkan bahwa pada iterasi ke-3 didapatkan hasil yang diinginkan dimana pada setiap busnya tidak melewati batas tegangan yang telah ditentukan, yaitu antara 98% - 102%. Besaran tegangan ditunjukkan pada Tabel 1 berikut :

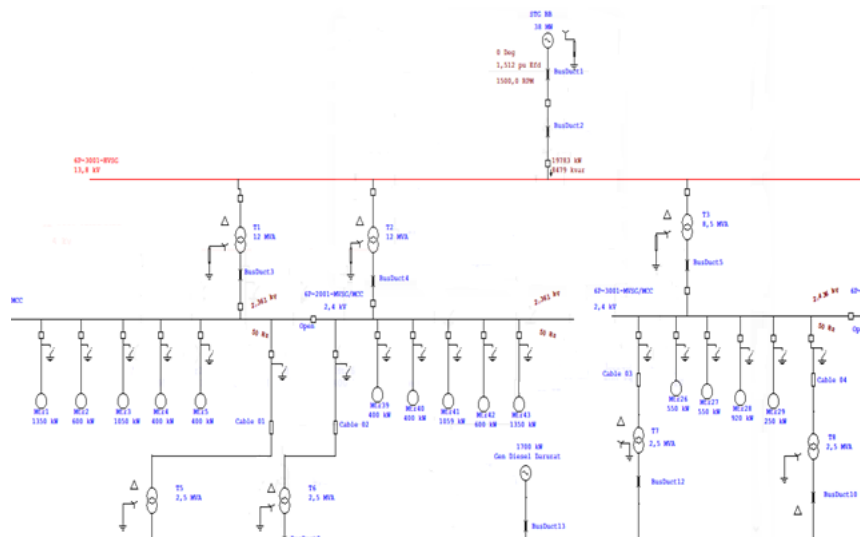
TABLE I. HASIL SIMULASI *LOAD FLOW* STG-BB PT. PUSRI

No	Bus ID	Nominal kV	Voltage
1	6P-1001-EMCC	0,48	100,33 %
2	6P-2001-LVSG/MCC	0,48	98,55 %
3	6P-1001-MVSG/MCC	2,4	98,37 %
4	6P-2001-MVSG/MCC	2,4	98,39 %
5	6P-3001-HVSG	13,8	100 %
6	6P-3001-LVSG/MCC	0,48	99 %
7	6P-3001-MVSG/MCC	2,4	101,49 %
8	6P-3002-MVSG/MCC	2,4	100,96 %
9	6P-4001-LVSG/MCC	0,48	98,84 %
10	6P-5001-LVSG/MCC	0,48	98,02 %
11	6P-1001-LVSG/MCC	0,48	98,55 %

Tabel 1 menunjukkan besaran tegangan di setiap bus dalam keadaan konvergen atau tidak melewati batas toleransi yang sudah ditentukan.

Tahapan simulasi selanjutnya adalah menjalankan simulasi stabilitas transient saat sistem mengalami gangguan simetris dan gangguan asimetris pada semua bus. Pada paper ini hanya ditampilkan hasil simulasi berupa grafik perubahan frekuensi dan tegangan saat terjadi gangguan pada bus 13,8 kV, 2,4 kV dan 0,48 kV yang diwakili oleh bus 6P-3001-HVSG , bus 6P-1001-MVSG dan 6P-1001-LVSG berturut-turut.

A. Simulasi stabilitas transien dengan gangguan simetris dan asimetris pada bus 6P-3001-HVSG



Gambar 8. Letak Gangguan Simetris dan Asimetris pada Busbar 6P-3001-HVSG

Pada gambar 8 memperlihatkan gangguan yang terjadi pada bus 6P-3001-HVSG yang memiliki tegangan nominal 13,8 kv.

1) Respon Frekuensi saat terjadi gangguan pada bus 6P-3001-HVSG

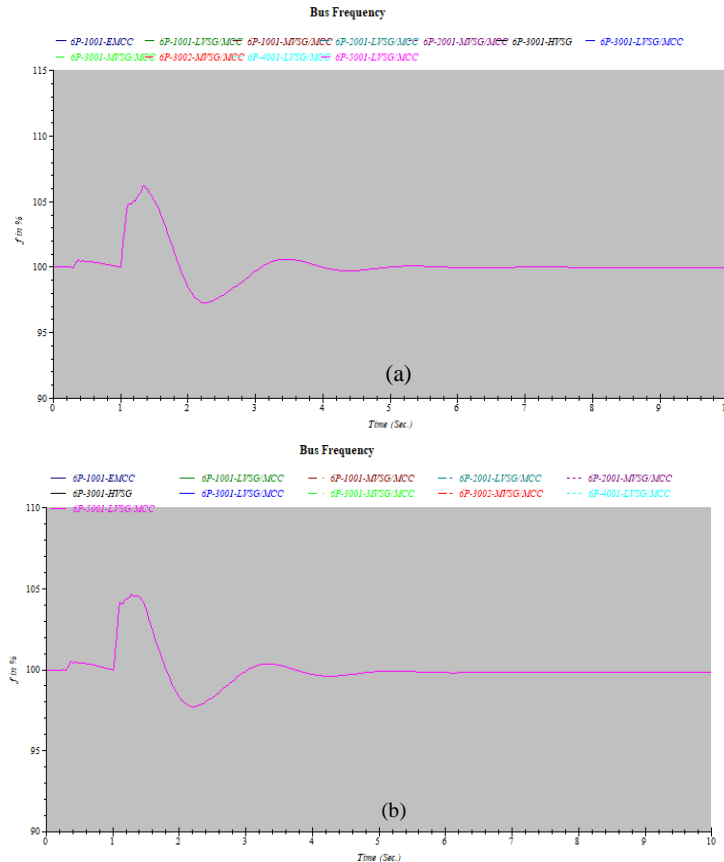
Gambar 9 dan Tabel 2 menunjukkan, saat terjadi gangguan simetris di bus 6P-3001-HVSG pada t=1, frekuensi meningkat disebabkan arus dan tegangan mengalami perubahan. Perubahan ini menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan yang berujung pada kenaikan frekuensi. Dilihat dari grafik tersebut bahwa saat terjadi

gangguan transien pada detik ke 1,1 frekuensi naik hingga detik ke 1,381 dengan kenaikan frekuensi mencapai 106,17 %. Setelah 1,381 detik frekuensi menurun hingga 97,46 %, namun pada detik-detik berikutnya frekuensi mulai menuju ke keadaan konstan dan mencapai kestabilan pada detik ke 4,2.

Sedangkan saat terjadi gangguan asimetris, frekuensi sistem naik hingga 104,67 % pada detik ke-1,281 dan mengalami penurunan frekuensi pada pada detik ke-2,221 dengan frekuensi mencapai 97,73 %. Kondisi stabil dicapai mulai detik ke 4,4.

TABLE II. RESPON FREKUENSI SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6P-3001-HVSG

Respon frekuensi di semua bus	Gangguan Simetris						Gangguan Asimetris					
	Frekuensi naik			Frekuensi Turun			Frekuensi naik			Frekuensi Turun		
	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)
	106,17	53	1,381	97,46	48,73	2,381	104,67	52,38	1,281	97,73	48,86	2,221



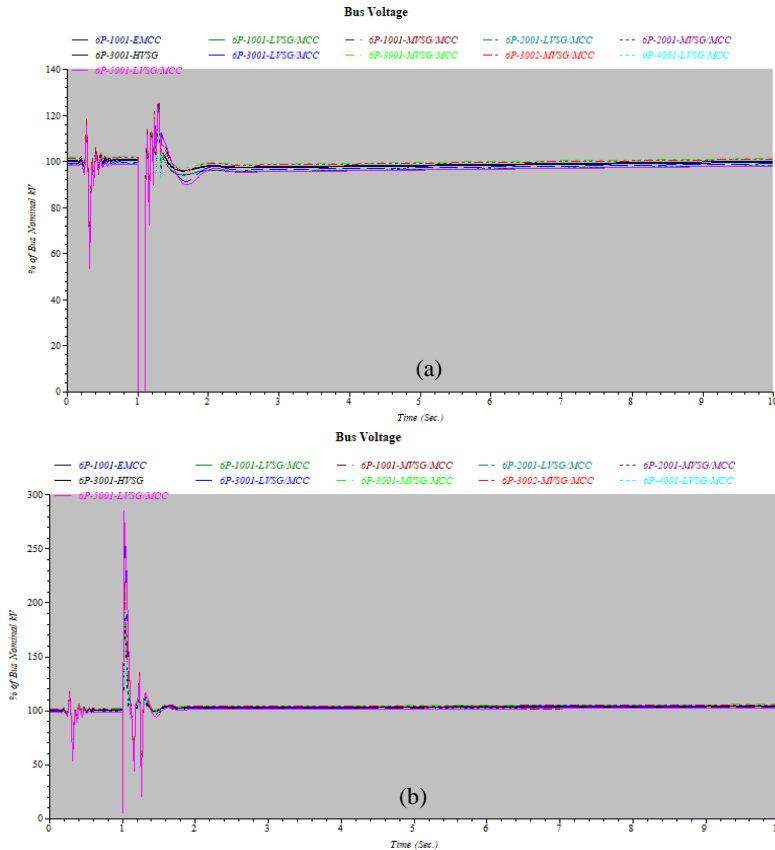
Gambar 9. Respon Frekuensi saat terjadi gangguan a) simetris dan b) asimetris di bus 6P-3001-HVSG

2) Respon Tegangan saat terjadi gangguan pada bus 6P-3001-HVSG

Respon tegangan pada Gambar 10 a) menunjukkan saat terjadi gangguan simetris mulai pada detik ke 1, nilai arus yang mengalir pada setiap bus dan generator meningkat hingga membuat nilai tegangannya tidak dapat dipertahankan. Akibatnya tegangan pada setiap bus jatuh hingga menuju nol. Berbeda dengan gangguan asimetris, Gambar 10 b), penurunan tegangan mulai terjadi pada detik ke-0,4 dengan tegangan turun mencapai 24,22 %, kemudian pada detik ke-1,021 terjadi kenaikan tegangan hingga melampaui 200 %. Tabel 3 menunjukkan respon tegangan saat terjadi gangguan di bus 6P-3001-HVSG.

B. Simulasi stabilitas transien dengan gangguan simetris dan asimetris pada bus 6P-1001-HVSG

Gambar 11 memperlihatkan letak gangguan simetris dan asimetris yang terjadi pada bus 6P-1001-MVSG yang memiliki tegangan nominal 2,4 kV.



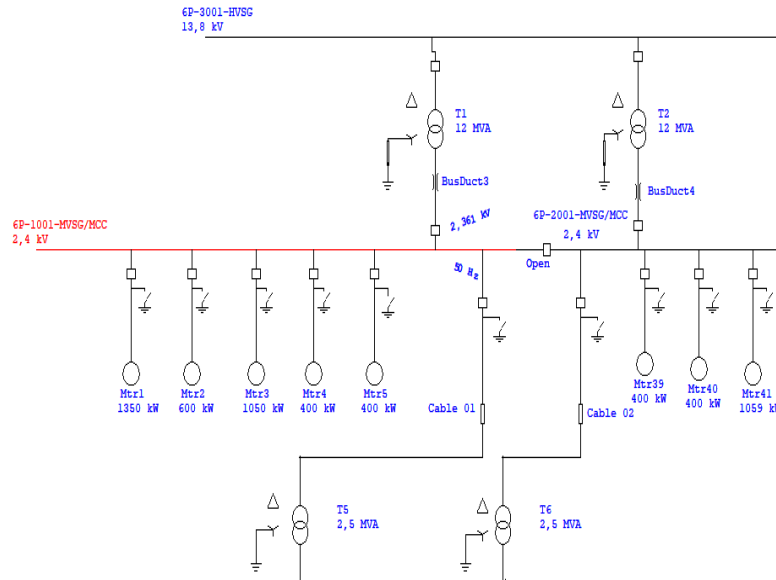
Gambar 10. Respon Tegangan saat terjadi gangguan a) simetris dan b) asimetris di bus 6P-3001-HVSG

TABLE III. RESPON TEGANGAN SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6P-3001-HVSG

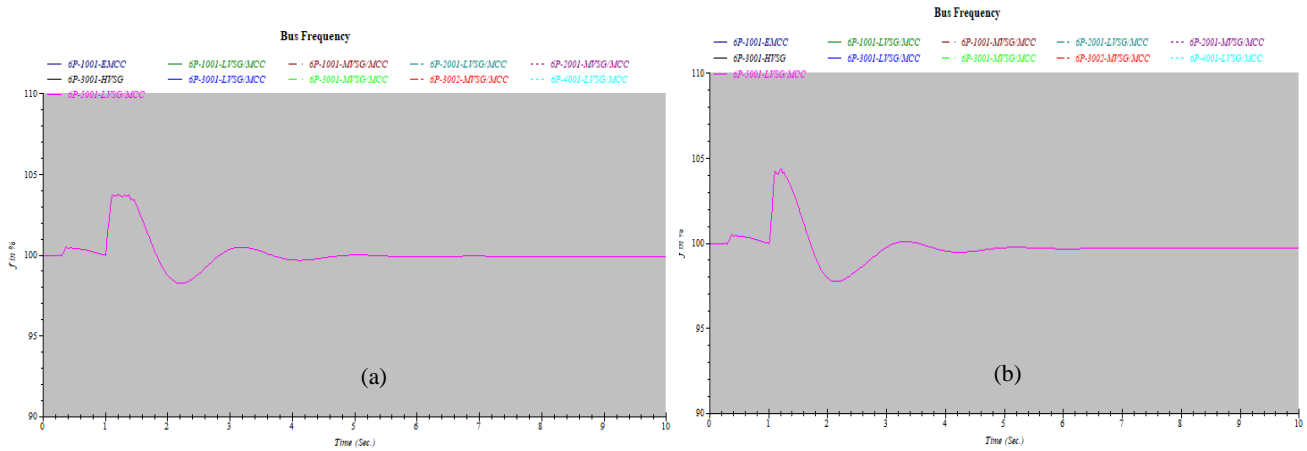
Kondisi	Gangguan Simetris						Gangguan Asimetris					
	Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan			Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan		
	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)
6P-3001-HVSG	16,806	121,78	1,281	0	0	1	29,617	214,62	1,021	3,342	24,22	1
6P-1001-MVSG/MCC	2,907	121,11	1,281	0	0	1	5,041	225,09	1,021	0,318	13,24	1
6P-2001-MVSG/MCC	2,907	121,11	1,281	0	0	1	5,402	225,09	1,021	0,317	13,22	1
6P-3001-MVSG/MCC	2,998	124,9	1,281	0	0	1	5,443	226,78	1,021	0,387	16,11	1
6P-3002-MVSG/MCC	2,997	124,89	1,281	0	0	1	5,744	239,32	1,021	0,364	15,18	1
6P-1001-LVSG/MCC	0,586	122,06	1,281	0	0	1	1,15	239,51	1,021	0,041	8,49	1
6P-2001-LVSG/MCC	0,586	122,08	1,281	0	0	1	1,149	239,33	1,021	0,041	8,52	1
6P-3001-LVSG/MCC	0,598	124,64	1,281	0	0	1	1,341	279,47	1,021	0,034	7,08	1
6P-4001-LVSG/MCC	0,58	120,9	1,281	0	0	1	1,031	214,86	1,021	0,094	19,5	1
6P-5001-LVSG/MCC	0,595	123,96	1,281	0	0	1	1,369	285,25	1,021	0,026	5,45	1
6P-1001-EMCC	0,597	105,59	1,281	0	0	1	1,138	237,14	1,021	0,049	10,13	1

1) Respon frekuensi saat terjadi gangguan pada bus 6P-1001-MVSG

Pada Gambar 12 a) menunjukkan saat terjadi gangguan simetris di bus 6P-3001-MVSG/MCC pada detik ke-1,1 hingga detik ke 1,301 kenaikan frekuensi hingga 103,74 % dan pada detik 2,221 mengalami penurunan mencapai 98,25 % sebelum menuju keadaan konstan pada detik ke 4,8. Saat terjadi gangguan asimetris respon frekuensi tidak jauh berbeda dengan saat terjadi gangguan simetris. Frekuensi sistem meningkat di detik ke-1,241 hingga 104,97 % dari frekuensi normal dan pada detik ke 2,061 mengalami penurunan frekuensi mencapai 98,04 % dari frekuensi normal. Frekuensi kembali pada nilai nominalnya saat t = 5 detik. Tabel 4 menunjukkan respon frekuensi saat terjadi gangguan di bus 6P-3001-HVSG.



Gambar 11. Letak Gangguan Simetris dan Asimetris pada Busbar 6P-1001-MVSG



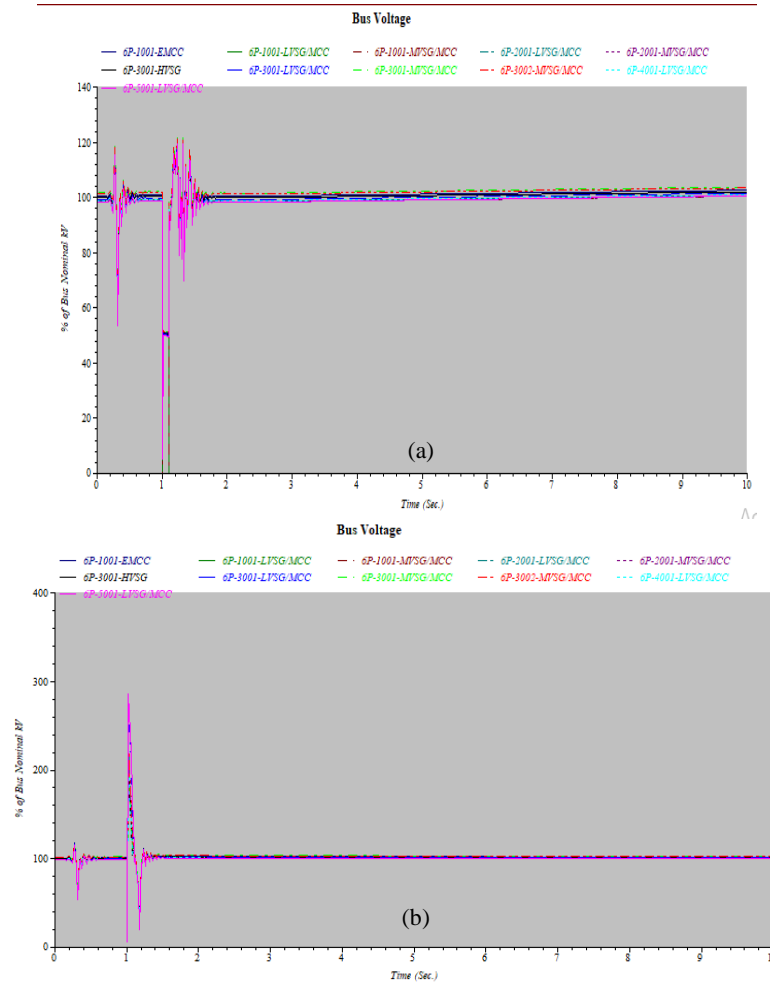
Gambar 12. Respon Frekuensi saat terjadi gangguan a) simetris dan b) asimetris di bus 6P-1001-MVSG

TABLE IV. RESPON FREKUENSI SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6P-1001-HVSG

Gangguan Simetris						Gangguan Asimetris					
Frekuensi naik			Frekuensi Turun			Frekuensi naik			Frekuensi Turun		
(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)
103,74	51,87	1,301	98,25	49,12	2,221	104,97	52,49	1,241	98,04	49,02	2,061

2) Respon tegangan saat terjadi gangguan pada bus 6P-1001-MVSG

Pada Gambar 13 dan Tabel 5, menunjukan bahwa saat terjadinya gangguan simetris di bus 6P-1001-MVSG, tegangan pada semua bus mengalami penurunan bahkan pada bus terganggu dan bus 6P-1001-LVSG/MCC penurunan tegangan hingga mencapai nol pada detik ke 1. Sedangkan saat terjadi gangguan asimetris, tegangan pada bus terganggu mengalami penurunan sebesar 24,24 % pada t = 1 dan pada bus-bus lainnya penurunan tegangan berada pada range 5% - 19,5%. Namun pada t = 1,201detik, tegangan mengalami kenaikan tegangan hingga melampaui 200 %.



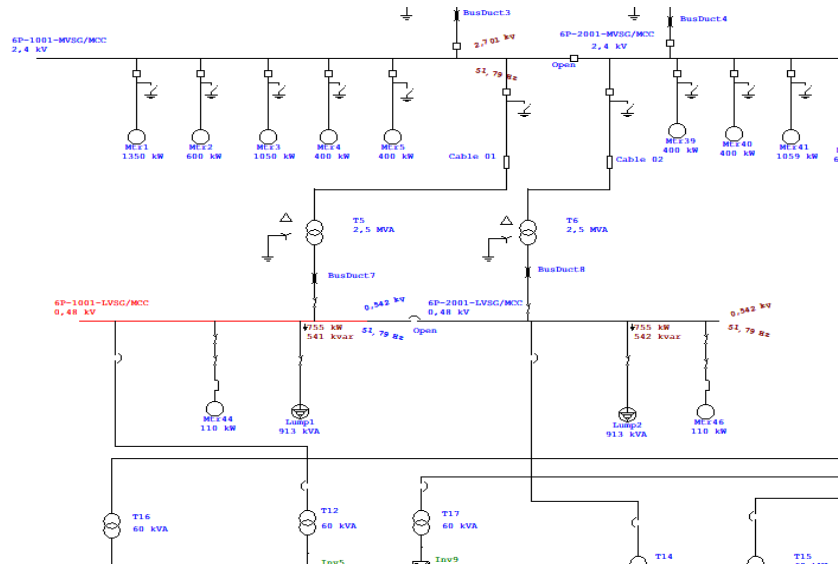
Gambar 13. Respon Tegangan saat terjadi gangguan a) simetris dan b) asimetris di bus 6P-1001-MVSG

TABLE V. RESPON TEGANGAN SAAT TERJADI GANGGUAN SIMETRIS DI BUS 6P-1001-MVSG

Nama Busbar	Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan			Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan		
	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)
6P-3001-HVSG	10,2	103,72	1,201	3,238	23,46	1	29,731	215,44	1,021	3,345	24,24	1
6P-1001-MVSG	108,52	2,605	1,201	0	0	1	5,421	225,86	1,021	0,318	13,23	1
6P-2001-MVSG	108,52	2,604	1,201	0,307	12,81	1	5,422	225,92	1,021	0,318	13,23	1
6P-3001-MVSG	1122,12	2,691	1,201	0,375	15,61	1	5,463	227,63	1,021	0,387	16,12	1
6P-3002-MVSG	111,74	2,682	1,201	0,353	14,71	1	5,763	240,15	1,021	0,365	15,19	1
6P-1001-LVSG	108,68	0,522	1,201	0	0	1	1,153	240,3	1,021	0,041	8,49	1
6P-2001-LVSG	108,7	0,522	1,201	0,04	8,25	1	1,153	240,14	1,021	0,041	8,53	1
6P-3001-LVSG	109,75	0,527	1,201	0,033	6,86	1	1,345	280,23	1,021	0,034	7,09	1
6P-4001-LVSG	108,94	0,523	1,201	0,091	18,89	1	1,035	215,69	1,021	0,094	19,52	1
6P-5001-LVSG	108,67	0,522	1,201	0,025	5,28	1	1,373	285,96	1,021	0,026	5,46	1
6P-1001-EMCC	110,97	0,533	1,201	0,047	9,82	1	1,142	237,98	1,021	0,049	10,14	1

C. Simulasi stabilitas transien dengan gangguan simetris dan asimetris pada bus 6P-1001-LVSG

Gambar 14, memperlihatkan letak gangguan simetris dan asimetris yang terjadi pada bus 6P-1001-LVSG yang memiliki tegangan nominal 0,48 kv.



Gambar 14. Letak Gangguan Simetris dan Asimetris pada Busbar 6P-1001-LVSG

1) Respon frekuensi saat terjadi gangguan simetris pada bus 6P-1001-LVSG

Saat gangguan simetris, kenaikan frekuensi terjadi pada detik ke-1 dengan mencapai puncak pada 103,66 % di detik 1,681 kemudian mengalami penurunan frekuensi terendah mencapai 97,66 % pada detik ke 2,401. Fenomena yang sama juga terjadi saat terjadi gangguan asimetris dimana frekuensi sistem naik menjadi 102,55 % pada detik ke-1,361 dan mengalami penurunan frekuensi pada detik selanjutnya yaitu pada detik ke-2,221 dengan frekuensi mencapai 98,76 %. Tabel 6 menunjukkan respon frekuensi saat terjadi gangguan di bus 6P-1001-LVSG.

TABLE VI. RESPON FREKUENSI SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6P-1001-LVSG

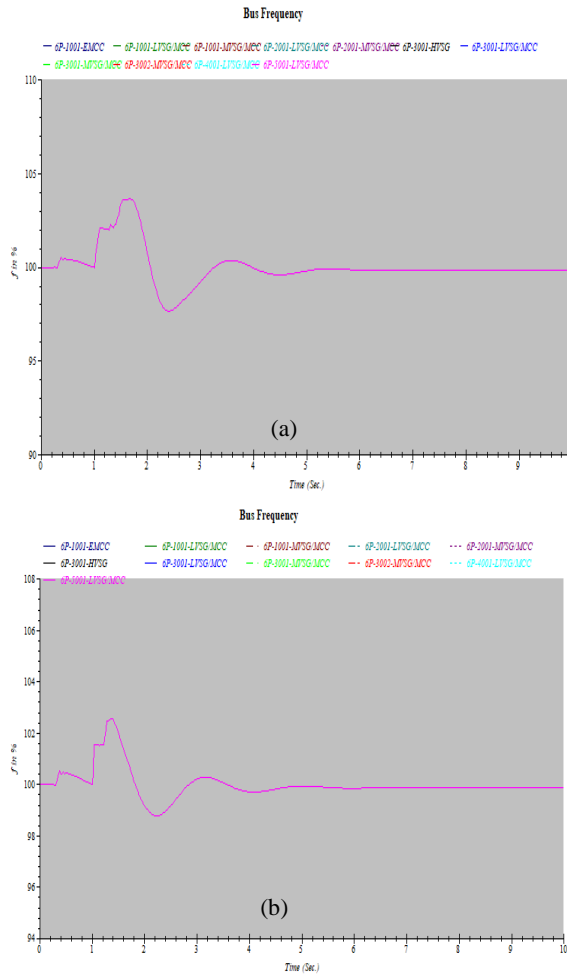
Respon frekuensi di semua bus	Gangguan Simetris						Gangguan Asimetris					
	Frekuensi naik			Frekuensi Turun			Frekuensi naik			Frekuensi Turun		
	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)	(%)	(Hz)	(s)
	103,66	51,83	1,681	97,66	48,83	2,401	102,55	51,27	1,361	98,76	49,39	2,221

2) Respon tegangan saat terjadi gangguan pada bus 6P-1001-LVSG

Respon Tegangan saat terjadi gangguan di bus 6P-1001-LVSG ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 15. Saat terjadinya gangguan simetris di bus 6P-1001-LVSG, tegangan pada semua bus mengalami penurunan bahkan pada bus terganggu penurunan tegangan hingga mencapai nol pada detik ke-1. Sedangkan saat terjadi gangguan asimetris, tegangan pada bus terganggu mengalami penurunan sebesar 24,29 % pada t = 1 dan pada bus-bus lainnya penurunan tegangan berada pada range 5,47% - 19,56%. Pada t = 1,201 detik, kenaikan tegangan tertinggi terjadi di Bus HVSG 13,8 kV sebesar 184,22 %.

TABLE VII. RESPON TEGANGAN SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6P-1001-LVSG

Nama Busbar	Gangguan Simetris						Gangguan Asimetris					
	Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan			Kenaikan Tegangan			Penurunan Tegangan		
	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)	(kv)	(%)	(s)
6P-3001-HVSG	18,856	136,64	1,421	3,66	24,39	1	19,903	184,22	1,021	3,353	24,29	1
6P-1001-MVSG	3,244	112,56	1,421	0,295	12,29	1	3,353	139,69	1,021	0,315	13,13	1
6P-2001-MVSG	3,244	135,15	1,421	0,32	13,31	1	3,72	154,98	1,021	0,318	13,26	1
6P-3001-MVSG	3,344	139,22	1,421	0,389	16,22	1	3,718	154,92	1,021	0,368	16,16	1
6P-3002-MVSG	3,335	138,97	1,421	0,367	15,29	1	4,06	169,17	1,021	0,365	15,23	1
6P-1001-LVSG	0,652	113	1,421	0	0	1	0,525	109,41	1,021	0,033	6,77	1
6P-2001-LVSG	0,652	113,02	1,421	0,041	8,58	1	0,814	169,63	1,021	0,041	8,55	1
6P-3001-LVSG	0,657	136,89	1,421	0,034	7,23	1	1,035	215,53	1,021	0,034	7,11	1
6P-4001-LVSG	0,65	112,8	1,421	0,094	19,62	1	0,693	144,45	1,021	0,094	19,56	1
6P-5001-LVSG	0,652	135,32	1,421	0,026	5,49	1	1,069	222,78	1,021	0,026	5,47	1
6P-1001-EMCC	0,663	138,11	1,421	0,049	10,21	1	0,805	167,65	1,021	0,049	10,17	1



Gambar 15. Respon frekuensi saat terjadi gangguan a) simetris dan b) asimetris di bus 6P-1001-LVSG

Hasil simulasi di setiap bus dirangkum dalam Tabel 8 berikut.

TABLE VIII. RANGKUMAN HASIL SIMULASI STABILITAS TRANSIENT STG-BB P.T. PUSRI

No	Bus Terganggu	Gangguan Simetris		Gangguan Asimetris	
		Kenaikan Tegangan (%)	Bus lain yang tegangannya = 0	Kenaikan Tegangan (%) di semua bus	Penurunan Tegangan (%) di semua bus
1	6P-3001-HVSG	105-121	Semua Bus	214-225	5,45-24,22
2	6P-1001-MVSG	108-110	6P-1001-LVSG	215-230	5,46-24,24
3	6P-2001-MVSG	118-121	6P-2001-LVSG	215-285	5,46-24,24
4	6P-3001-MVSG	119-120	6P-1001-EMCC 6P-3001-LVSG	215-285	5,46-24,23
5	6P-3002-MVSG	112-116	6P-3001-LVSG 6P-5001-LVSG	215,16-285,6	5,45-24,23
6	6P-1001-LVSG	112-136	-	109-222,8	5,47-24,29
7	6P-2001-LVSG	113-138	-	109,16-222,59	5,47-24,3
8	6P-2001-EMCC	113-124	-	108,76-222,16	5,48-24,38
9	6P-3001-LVSG	126-128	6P-5001-LVSG	119-164,24	4,69-24,31
10	6P-4001-LVSG	121-124	-	108,76-234,93	5,42-16,09
11	6P-5001-LVSG	128-132	-	157,46-184,32	4,78-24,27

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan rentang waktu frekuensi sistem kelistrikan STG-BB P.T. PUSRI akan mengalami kenaikan diantara $t = 1,2 - 1,5$ detik dengan kenaikan frekuensi tertinggi sebesar 105%. Selanjutnya frekuensi menurun pada kisaran $t = 2$ detik dan penurunan frekuensi terendah di 97%. Khusus pada gangguan simetris

kenaikan terjadi di semua bus pada $t = 1,361$ detik dengan rata-rata kenaikan frekuensi sebesar 103,56% dan penurunan di $t = 2,361$ detik dengan nilai penurunan frekuensi rata-rata sebesar 98,3%. Dengan demikian, respon frekuensi stabilitas transien STG-BB PT PUSRI dikategorikan buruk dan berbahaya dikarenakan tidak berada dalam rentang yang diijinkan sesuai Standard PLN ($\pm 0,2$ Hz atau 99,6% - 100,4%). Sedangkan untuk respon tegangan menunjukkan bahwa saat gangguan simetris, pada bus terganggu dan bus-bus yang berada di bawah bus terganggu tegangannya akan sama dengan nol, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8. Rentang kenaikan tegangan pada gangguan simetris berada di kisaran 105% - 138%. Pada gangguan asimetris, kenaikan tegangan mencapai lebih dari 200%, sedangkan persentase penurunan tegangan untuk gangguan asimetris relatif sama nilainya dengan gangguan simetris. Dengan demikian respon tegangan stabilitas transien STG-BB PT PUSRI telah melewati batas toleransi (90% - 105%).

Pada paper ini, simulasi yang dilakukan belum memperhitungkan efek dari sistem proteksi terhadap perbaikan sistem. Karenanya untuk melengkapi hasil penelitian ini, perlu dilakukan simulasi proteksi frekuensi mengikuti pedoman IEEE Std C37.106-2003 untuk mengetahui bagaimana respon frekuensi dan tegangan serta menilai adakah perbaikan respon sistem STG-BB terhadap stabilitas transiennya.

REFERENSI

- [1] D. T. Kumara, O. Penangsang, and N. K. Aryani, "Analisa stabilitas transien pada sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV - 275 kV dengan penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Sep. 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16119.
- [2] R. Thayib and R. Apriani, "Perhitungan loss of load probability (probabilitas kehilangan beban) sistem tenaga listrik di PT. Pupuk Sriwidjaya," *Jurnal Mikrotiga*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Nov. 2015, Accessed: Sep. 16, 2020. [Online]. Available: <https://ejournal.unsri.ac.id/index.php/jmt/article/view/2408>
- [3] B. A. Arzandhy, M. Pujiantara, and D. Fahmi, "Analisis kestabilan transien dan mekanisme pelepasan beban di PT. Pusri akibat penambahan generator dan penambahan beban," *Journal:eArticle*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017. Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/194295/analisis-kestabilan-transien-dan-mekanisme-pelepasan-beban-di-pt-pusri-akibat-pe>
- [4] C. Hermanu, A. Soeprijanto, and M. Pujiantara, "Analisis stabilitas transien di PT. Pupuk Sriwidjaya Palembang akibat penggantian sebuah unit pembangkit GTG 18 MW menjadi STG 32 MW," *dokumen.tech*. <https://dokumen.tech/document/analisis-stabilitas-transien-di-pt-pupuk-sriwidjaya-awal-generator-mesin-mesin.html> (accessed Sep. 15, 2020).
- [5] I. B. Sulistiawati, A. Priyadi, O. A. Qudsi, A. Soeprijanto, and N. Yorino, "Critical clearing time prediction within various loads for transient stability assessment by means of the extreme learning machine method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 77, pp. 345–352, May 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.034.
- [6] M. M. I. Fathoni, "Analisis setting waktu rele pengaman di PT. Pupuk Sriwidjaya dengan mempertimbangkan transient stability assessment," *Undergraduate*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016. Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/41529/>
- [7] R. P. Sari, "Perhitungan CCT (critical clearing time) berdasarkan critical trajectory menggunakan hilangnya sinkronisasi pada sistem multi mesin dengan mempertimbangkan kondisi unbalance," *Undergraduate*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015. Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/71075/>
- [8] P. Kundur, J. Paserba, and V. Ajarapu, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, 2004. Accessed: May 31, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1318675>
- [9] R. S. Anwar, "Analisis stabilitas transien dan mekanisme pelepasan beban akibat penambahan pembangkit 1x26,8 MW pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik," *Undergraduate*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017. Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/42587/>
- [10] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE, 1995.
- [11] D. Y. Sepriawan, "Analisis stabilitas transien dan perancangan pelepasan beban pada joint operation Body (JOB) Pertamina-Petrochina East Java," *Undergraduate*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015. Accessed: Sep. 15, 2020. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/59313/>
- [12] UNE-EN 50160:2011, "UNE-EN 50160:2011-Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks." https://www.techstreet.com/standards/une-en-50160-2011?product_id=1787845 (accessed May 31, 2022).
- [13] IEEE Guide for Voltage Sag Indices, "IEEE guide for voltage sag indices," *IEEE Std 1564-2014*, pp. 1–59, Jun. 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6842577.
- [14] W. A. Oktaviani, T. Barlian, Y. Apriani, and N. Syarif, "Continuous power flow and time domain analysis for assessing voltage stability," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 1, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2020.
- [15] M. W. Triyatho, O. Zebua, and I. M. Ginarsa, "Perkiraan kestabilan tegangan secara dinamis menggunakan eksponen Lyapunov maksimum," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2015, doi: 10.25077/jnte.v4n1.138.2015.
- [16] H.-Y. Su and C.-W. Liu, "Estimating the voltage stability margin using PMU measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3221–3229, Jul. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2477426.
- [17] Permen ESDM No 37 tahun 2008, "Aturan jaringan sistem tenaga listrik Sumatera." 2008.
- [18] J. C. Das, *Transients in electrical systems: analysis, recognition, and mitigation*. Mc Graw Hill, 2010.