

PERKIRAAN KESTABILAN TEGANGAN SECARA DINAMIS MENGUNAKAN EKSPONEN LYAPUNOV MAKSIMUM (STUDI KASUS SISTEM KELISTRIKAN WILAYAH LAMPUNG)

M. Widi Triyatno¹, Osea Zebua¹, I Made Ginarsa²

¹Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

²Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram

e-mail: osez89@yahoo.com

Abstrak—Gangguan-gangguan dalam operasi sistem tenaga listrik dapat menyebabkan kestabilan tegangan terganggu. Oleh sebab itu, analisis kestabilan tegangan secara dinamis sebelum dan setelah terjadinya gangguan perlu dilakukan. Makalah ini mengusulkan perkiraan kestabilan tegangan secara dinamis menggunakan eksponen Lyapunov maksimum dengan studi kasus sistem kelistrikan wilayah Lampung. Simulasi kestabilan tegangan dilakukan dengan berbagai jenis gangguan yang terjadi antara saluran gardu induk Baturaja dan gardu induk Bukit Kemuning. Data urutan waktu hasil simulasi pengukuran tegangan di GI Baturaja digunakan untuk analisa perkiraan kestabilan tegangan dengan menggunakan eksponen Lyapunov maksimum. Dengan jumlah sampel data dan waktu yang sama bagi pemutus-pemutus tenaga untuk memutus gangguan, hasil simulasi dengan menggunakan eksponen Lyapunov maksimum menunjukkan bahwa tegangan dapat stabil pada 1,7 detik setelah terjadinya gangguan tiga fasa, pada 1,2 detik setelah terjadinya gangguan satu fasa ke tanah, pada 0,9 detik setelah terjadinya gangguan antar fasa, pada 1,2 detik setelah terjadinya gangguan putus saluran dan 1,4 detik setelah terjadinya gangguan pelepasan beban. Jumlah sampel data yang digunakan mempengaruhi waktu untuk tegangan mencapai kestabilan.

Kata Kunci: kestabilan tegangan, eksponen Lyapunov maksimum, gangguan-gangguan, perkiraan dinamis

Abstract—Disturbances in the operation of the power system may cause disturbance in voltage stability. Therefore, dynamic voltage stability analysis before and after disturbance needs to be performed. This paper proposes dynamic voltage stability prediction using maximum Lyapunov exponent with Lampung's electrical system as case study. Voltage stability simulation is performed with various types of disturbances that occur at line between of Baturaja substation and Bukit Kemuning substation. Time-series data of voltage measurement of simulation results at GI Baturaja is applied for voltage stability prediction analysis using maximum Lyapunov exponent. With the same number of data samples and the same time for circuit breakers to interrupt disturbances, the simulation results using maximum Lyapunov exponent show that the voltage can be stabilized at 1.7 seconds after the occurrence of the three-phase disturbance, at 1.2 seconds after the occurrence of the phase-to-ground disturbance, at 0.9 second after the occurrence of the disturbance between phase, at 1.2 seconds after the occurrence of the loss of line disturbance and 1.4 seconds after the occurrence of the loss of load disturbance. The amount of data samples used in analysis affect the time for the voltage reaches stability.

Keywords : voltage stability, maximum Lyapunov's exponent, disturbance, dynamic prediction

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan beban listrik yang pesat membutuhkan pembangunan pusat-pusat pembangkitan energi listrik dan jaringan transmisi baru. Jika pembangunan pusat pembangkit listrik dan jaringan transmisi tidak dapat mengimbangi pertumbuhan beban, maka sistem tenaga listrik beroperasi di dekat batas kestabilan. Operasi sistem tenaga listrik yang ideal harus memiliki kuantitas-kuantitas operasi

sistem tenaga listrik yang stabil, yakni kestabilan tegangan, frekuensi, dan sudut rotor generator.

Kestabilan tegangan merupakan salah satu hal yang penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Gangguan-gangguan yang terjadi pada operasi sistem tenaga listrik, seperti gangguan tiga fasa, fasa ke tanah, antar-fasa, lepas beban dan putus saluran dapat menyebabkan tegangan pada setiap bus di sistem tenaga listrik tidak stabil dan selanjutnya dapat mengakibatkan peristiwa jatuh tegangan dan dapat memicu

pemadaman total dari sistem tenaga [1]. Selain itu, dampak ketidakstabilan tegangan juga dapat membuat kerusakan pada peralatan-peralatan penyaluran energi listrik dan peralatan-peralatan yang menggunakan energi listrik. Oleh sebab itu, penting untuk mengetahui kestabilan tegangan secara dinamis pada sistem tenaga listrik sehingga keandalan operasi sistem tenaga listrik dapat terjaga.

Perkiraan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik secara dinamis dapat dilakukan bila data tegangan terhadap waktu tersedia, namun hal ini kadang-kadang tidak dapat dipenuhi. Peralatan pengukur tegangan secara dinamis seperti *phasor measurement unit* (PMU) sangat mahal dan belum tersedia di setiap tempat. Beberapa indeks kestabilan tegangan telah diusulkan untuk prediksi kestabilan tegangan secara statis maupun dinamis [2]-[3]. Indeks kestabilan tegangan tersebut membutuhkan kuantitas-kuantitas operasi lainnya dan informasi sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Makalah ini menyajikan prediksi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik secara dinamis dengan menggunakan eksponen Lyapunov maksimum. Data yang dibutuhkan hanya data urutan waktu (*time-series data*) dari tegangan. Dengan menggunakan kasus pada sistem kelistrikan wilayah Lampung, simulasi operasi sistem tenaga listrik dan prediksi kestabilan tegangan akibat gangguan dilakukan untuk menguji keefektifan eksponen Lyapunov maksimum dalam memprediksi kestabilan tegangan secara dinamis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kestabilan Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan tegangan ialah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga keseimbangan tegangan di semua bus pada sistem di saat sistem berada pada kondisi normal ataupun pada kondisi tidak normal setelah terjadinya gangguan. Keseimbangan tegangan artinya nilai tegangan berada pada batas-batas operasi yang diijinkan. Sistem tenaga listrik mengalami kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, perubahan beban, dan perubahan kondisi pada sistem tersebut [4].

2.2. Eksponen Lyapunov

Eksponen Lyapunov berfungsi untuk menentukan ketergantungan sebuah sistem terhadap kondisi awalnya. Selain itu, dapat pula untuk menunjukkan perilaku dinamis sebuah sistem. Oleh sebab itu, eksponen Lyapunov dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem secara dinamis.

Dalam studi kestabilan dengan eksponen Lyapunov, diumpamakan terdapat dua buah lintasan terhadap waktu pada sebuah bidang dan digambarkan dengan persamaan-persamaan $x(t) = f(x_0)$ dan $x(t) + \delta x(t) = f(x_0 + \delta x_0)$. Sensitivitas terhadap keadaan awal antara kedua lintasan tersebut memenuhi persamaan:

$$\|\delta x(t)\| \approx e^{\lambda t} \|\delta x_0\| \quad (1)$$

dimana λ merupakan jarak antar lintasan dalam sistem atau dikenal dengan eksponen Lyapunov. Nilai eksponen Lyapunov maksimum diperoleh dari dua lintasan dengan rentang waktu t dapat didefinisikan sebagai [5]:

$$\lambda \cong \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\|\delta x(t)\|}{\|\delta x_0\|} \right) \quad (2)$$

dimana;

λ = eksponen Lyapunov maksimum

t = rentang waktu uji

$\delta x(t)$ = perubahan jarak dalam waktu t

δx_0 = jarak awal

Pengamatan kestabilan dengan eksponen Lyapunov maksimum menghasilkan gambaran apakah sistem stabil, keadaan tetap, atau tidak stabil. Sistem stabil adalah sistem yang menuju titik keseimbangan ($\lambda < 0$). Sedangkan, keadaan tetap adalah sistem yang stabil netral, yaitu sistem yang konservatif atau tidak mengalami perubahan ($\lambda = 0$). Sistem yang tidak stabil menurut eksponen Lyapunov terjadi saat $\lambda > 0$, yaitu ketika salah satu lintasan mendekati titik kestabilan dan lintasan yang lainnya menjauhi titik kestabilan atau kedua lintasan sama-sama menjauhi titik kestabilan.

Eksponen Lyapunov untuk data urutan waktu dari tegangan juga dapat dihitung dengan mengambil sekumpulan data selama rentang waktu tertentu atau periode sampling Δt . Jika N sampel data digunakan untuk setiap k periode

sampling, maka eksponen Lyapunov maksimum didefinisikan sebagai berikut [6]:

$$\lambda(k\Delta t) = \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \left(\frac{|V_{(k+m)\Delta t}^i - V_{(k+m)\Delta t}^i|}{|V_{(m+1)\Delta t}^i - V_{m\Delta t}^i|} \right) \quad (3)$$

dimana,

$\lambda(k\Delta t)$: nilai eksponen Lyapunov maksimum untuk data dengan rentang waktu $k\Delta t$.

N : jumlah sampel data

$V_{k\Delta t}^i$: tegangan urutan waktu pada bus i .

III. METODOLOGI

3.1. Pemodelan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung

Pemodelan sistem kelistrikan wilayah Lampung dilakukan untuk kebutuhan bagi simulasi. Pemodelan hanya dilakukan pada sistem transmisi 150kV. Pemodelan terdiri dari pemodelan bus, pemodelan saluran (*line/branch*) dan pemodelan beban. Pemodelan-pemodelan ini membutuhkan data-data sistem kelistrikan wilayah Lampung, seperti diagram satu garis, data-data beban harian maksimum, data-data panjang saluran, jenis kabel yang dipakai beserta nilai resistansi, reaktansi dan suseptansi kabel [7]. Pemodelan sistem eksitasi generator, turbin governor, dan pemodelan generator itu sendiri dilakukan dengan memperhatikan data-data generator yang terpasang pada sistem kelistrikan wilayah Lampung. Semua hasil pemodelan ini digunakan dalam pembuatan program simulasi dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB [8].

3.2. Simulasi Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Akibat Gangguan

Simulasi dinamika tegangan sistem kelistrikan wilayah Lampung akibat gangguan dilakukan pada salah satu saluran, yakni saluran yang menghubungkan GI Baturaja (bus 10) dan GI Bukit Kemuning (bus 11). Skenario gangguan terdiri dari gangguan tiga fasa, gangguan satu fasa ke tanah, gangguan antar fasa, dan gangguan akibat putus saluran dan pelepasan beban. Semua gangguan dianggap terjadi pada saluran di dekat GI Baturaja dan terjadi pada 0,1 detik setelah awal simulasi.

Simulasi gangguan akibat pelepasan beban dilakukan dengan melepas beban pada GI Baturaja. Pada semua skenario gangguan, pemutus tenaga pada GI Baturaja bekerja untuk mengisolir gangguan pada 0,05 detik setelah terjadinya gangguan, sedangkan pemutus tenaga pada GI Bukit Kemuning bekerja 0,1 detik setelah gangguan terjadi. Data urutan waktu dari tegangan yang dipakai untuk analisa adalah data tegangan dari bus 10 (GI Baturaja).

Simulasi juga dilakukan dengan memperpanjang waktu lamanya gangguan dan merubah waktu bekerja pemutus tenaga pada bus 10 (GI Baturaja) dan bus 11 (GI Bukit Kemuning) dalam pengisolasian gangguan. Waktu langkah pada seluruh simulasi adalah 0,01 detik.

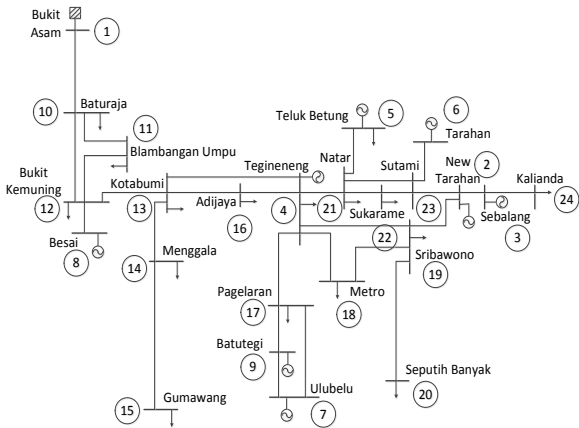
3.3. Kestabilan Tegangan dengan Eksponen Lyapunov Maksimum

Data tegangan urutan waktu yang diperoleh dari simulasi aliran daya sistem kelistrikan wilayah Lampung digunakan untuk analisa kestabilan tegangan dengan menggunakan eksponen Lyapunov maksimum. Nilai eksponen Lyapunov maksimum dari N data dihitung dengan persamaan (3). Hal-hal yang harus diperhatikan dalam perhitungan λ adalah:

- Jika pembilang dan penyebut pada persamaan 3 bernilai nol, maka pembilang dan penyebut diumpamakan sebagai bilangan positif yang sangat kecil.
- Jika pembilang sama dengan nol dan penyebut lebih besar dari nol, maka pembilang diumpamakan sebagai bilangan yang sangat kecil.
- Jika pembilang lebih besar dari nol dan penyebut sama dengan nol, maka penyebut diumpamakan sebagai bilangan yang sangat kecil.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jaringan transmisi 150 kV pada sistem kelistrikan wilayah Lampung dimodelkan menjadi 24 bus, yang terdiri dari bus generator sebanyak 9 bus dan bus beban sebanyak 15 bus, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Beban yang terhubung pada bus-bus dimodelkan dengan beban model P dan Q dan besar masing-masing beban dalam MW dan MVAR serta per unit ditunjukkan pada tabel 1. Beban dianggap tidak berubah selama periode simulasi.



Gambar 1. Diagram Satu Garis Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung

Tabel 1. Beban Masing-masing Bus

No. Bus	Nama Bus	Beban		Beban	
		MW	MVAR	pu	Pu
1	Bukit Asam	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	New Tarahan	2,0265	1,7872	0,0203	0,0179
3	Sebalang	0,0000	0,000	0,0000	0,0000
4	Tegineneng	23,7464	20,9424	0,2375	0,2094
5	Teluk Betung	57,9371	51,0579	0,5794	0,5106
6	Tarahan	9,6648	8,5236	0,0966	0,0852
7	Ulubelu	2,4422	2,1538	0,0244	0,0215
8	Besai	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9	Batutegi	0,0000	0,000	0,0000	0,0000
10	Baturaja	42,9982	37,9208	0,4300	0,3792
11	Blambangan Umpu	6,3393	5,5907	0,0634	0,0559
12	Bukit Kemuning	17,1473	15,1225	0,1715	0,1512
13	Kotabumi	27,3577	24,1273	0,2736	0,2413
14	Menggala	41,8290	36,8897	0,4183	0,3689
15	Gumawang	31,3588	27,6558	0,3136	0,2765
16	Adijaya	22,1096	19,4989	0,2211	0,1950
17	Pagelaran	29,7740	26,2582	0,2977	0,2626
18	Metro	23,9802	21,1486	0,2398	0,2115
19	Sribawono	27,6955	24,4251	0,2770	0,2443
20	Seputih Banyak	17,2097	15,1775	0,1721	0,1518
21	Natar	31,3588	27,6558	0,3136	0,2765
22	Sukarame	19,0439	16,7951	0,1904	0,1680
23	Sutami	15,3546	13,5415	0,1535	0,1354
24	Kalianda	10,4962	9,2568	0,1050	0,0926

Tabel 2. Nilai Parameter Saluran Transmisi Lampung 150 kV

No Bus		R (pu)	X (pu)	B (pu)
Dari	Ke			
1	10	0,0214	0,0673	0,0954
2	3	0,0010	0,0066	0,0207
2	23	0,0015	0,0103	0,0318
2	19	0,0045	0,0308	0,0956
3	24	0,0033	0,0224	0,0695
4	13	0,0416	0,1306	0,0463
4	16	0,0258	0,0497	0,0176
4	17	0,0110	0,0346	0,0491
4	18	0,0120	0,0359	0,0119
4	19	0,0186	0,0807	0,0592
4	21	0,0052	0,0163	0,0231
5	21	0,0048	0,0149	0,0212
6	23	0,0046	0,0143	0,0203
7	17	0,0164	0,0709	0,0520
7	9	0,0098	0,0423	0,0310
8	12	0,0043	0,0136	0,0193
9	17	0,0068	0,0296	0,0217
10	11	0,0367	0,1153	0,0408
10	12	0,0550	0,1726	0,0611
11	12	0,0183	0,0573	0,0203
12	13	0,0097	0,0304	0,0431
13	14	0,0330	0,1035	0,0367
13	16	0,0258	0,0810	0,0287
14	15	0,0299	0,0894	0,1183
18	19	0,0308	0,0913	0,0302
19	20	0,0201	0,0630	0,0892
21	22	0,0069	0,0218	0,0077
21	23	0,0173	0,0543	0,0193
22	23	0,0104	0,0326	0,0115

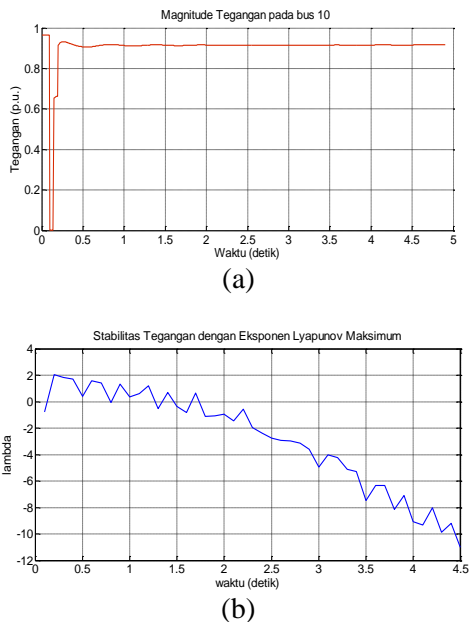
Saluran transmisi antar bus dimodelkan dengan dengan model pi, yakni terdiri dari parameter R, X dan B. Terdapat 22 saluran dengan data-data saluran dinyatakan dalam satuan per unit seperti ditunjukkan pada tabel 2.

Pemodelan generator dilakukan dengan memasukkan konstanta-konstanta transien dan subtransien dari setiap generator seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.

Pemodelan generator juga mengikutsertakan pemodelan sistem eksitasi dari setiap generator, dimana setiap generator mempunyai data seperti yang ditunjukkan pada tabel 5. K_a adalah konstanta penguat pengatur tegangan, V_{Rmax} dan V_{Rmin} masing-masing adalah keluaran pengatur tegangan maksimum dan minimum, V_{Imax} dan V_{Imin} masing-masing adalah sinyal internal maksimum dan minimum.

4.1. Kestabilan Tegangan Dengan Eksponen Lyapunov Maksimum Pada Kondisi Gangguan

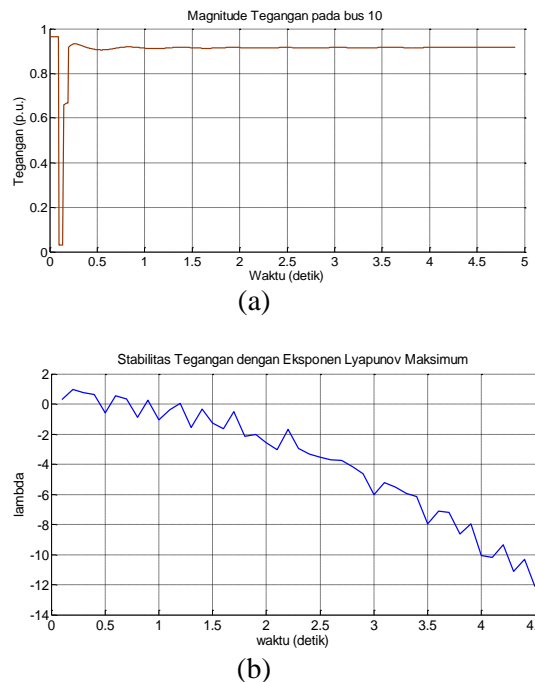
Simulasi gangguan pada sistem kelistrikan wilayah Lampung dilakukan dengan berbagai skenario jenis gangguan pada saluran transmisi GI Baturaja dan GI Bukit Kemuning. Perhitungan eksponen Lyapunov maksimum dilakukan dengan mengambil 10 sampel (N=10) dari data tegangan urutan waktu.



Gambar 2. Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

Hasil simulasi tegangan pada bus 10 (GI Baturaja) selama gangguan tiga fasa yang terjadi pada saluran antara GI Baturaja dan GI Bukit Kemuning ditunjukkan pada gambar 2a dan hasil perhitungan eksponen Lyapunov maksimum ditunjukkan pada gambar 2b. Kestabilan tegangan tercapai pada waktu 1,8 detik.

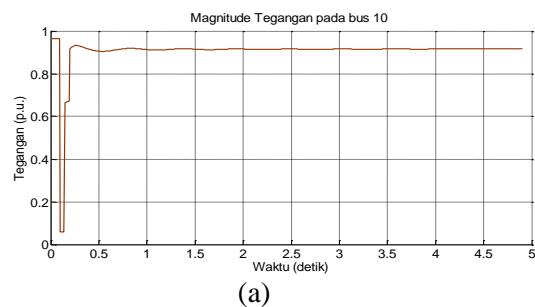
Hasil simulasi tegangan pada bus 10 (GI Baturaja) selama gangguan satu fasa ke tanah yang terjadi pada saluran antara GI Baturaja dan GI Bukit Kemuning ditunjukkan pada gambar 3a dan hasil perhitungan eksponen Lyapunov maksimum ditunjukkan pada gambar 3b. Tegangan stabil setelah 1,3 detik.

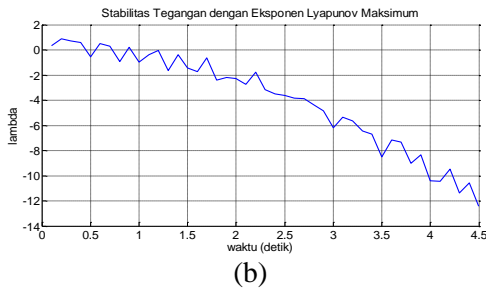


Gambar 3. Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Ke Tanah di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

Hasil simulasi tegangan pada bus 10 (GI Baturaja) selama gangguan antarfasa yang terjadi pada saluran antara GI Baturaja dan GI Bukit Kemuning ditunjukkan pada gambar 4a dan hasil perhitungan eksponen Lyapunov maksimum ditunjukkan pada gambar 4b. Kestabilan tegangan baru tercapai setelah 1 detik.

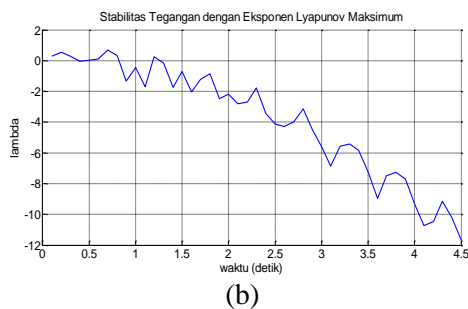
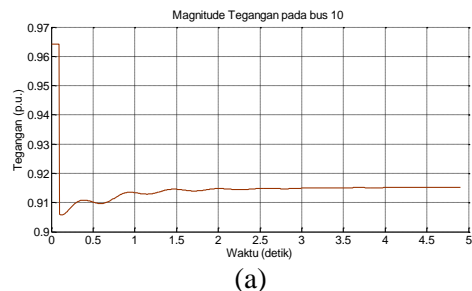
Hasil simulasi tegangan dan eksponen Lyapunov maksimum pada GI Baturaja akibat gangguan putus saluran ditunjukkan pada gambar 5a dan 5b. Simulasi menunjukkan tegangan di Bus Baturaja mengalami penurunan yang tajam akibat putusnya saluran antara GI Baturaja dan GI Bukit Kemuning.



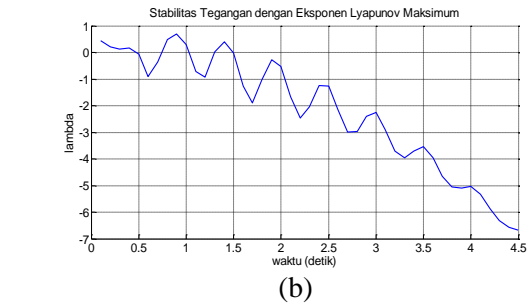
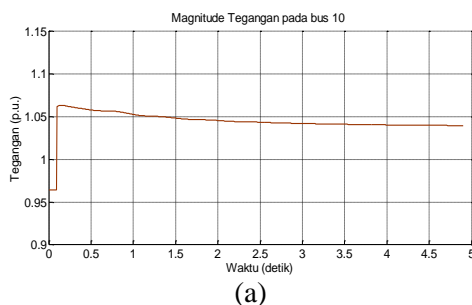


Gambar 4. Hasil Simulasi Gangguan Antar Fasa di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

Eksponen Lyapunov menunjukkan tegangan mulai stabil pada 1,3 detik, tetapi nilainya di bawah batas operasi yang diijinkan.



Gambar 5. Hasil Simulasi Gangguan Putus Saluran di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum



Gambar 6. Hasil Simulasi Gangguan Lepas Beban di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

Pelepasan beban menyebabkan tegangan di GI Baturaja mengalami kenaikan, seperti ditunjukkan pada gambar 6a. Eksponen Lyapunov maksimum menunjukkan tegangan mulai stabil 1,5 detik setelah beban di GI Baturaja dilepaskan, seperti ditunjukkan pada gambar 6b.

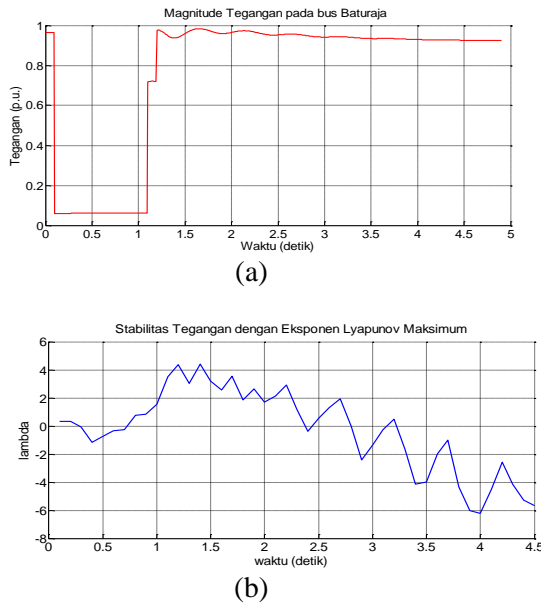
Kestabilan tegangan dinamis yang terjadi di Bus Baturaja akibat dari masing-masing gangguan diamati dengan eksponen Lyapunov maksimum. Kestabilan tercipta saat nilai lambda kurang dari nol ($\lambda < 0$) secara kontinyu. Tabel 3 memperlihatkan nilai λ hasil perhitungan untuk setiap jenis gangguan dalam periode waktu simulasi selama 2 detik. Dari tabel 3, tegangan akibat gangguan antar fasa lebih cepat stabil dibandingkan tegangan akibat gangguan lainnya.

Tabel 3. Eksponen Lyapunov Maksimum Dari Berbagai Jenis Gangguan Selama 2 detik

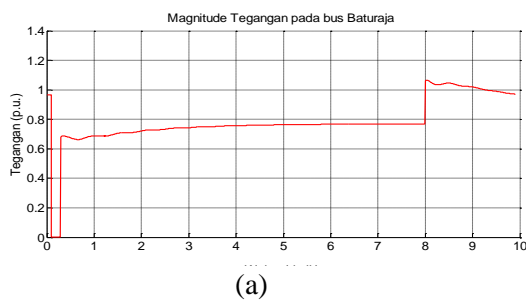
Waktu (detik)	Eksponen Lyapunov maksimum (λ)				
	Tiga Fasa	Fasa ke Tanah	Antar Fasa	Putus Saluran	Lepas Beban
0,1	-0,7893	0,2864	0,3496	0,2995	0,4331
0,2	2,0398	0,9633	0,8993	0,5266	0,2178
0,3	1,8337	0,7613	0,7007	0,2808	0,1267
0,4	1,6915	0,6272	0,5740	-0,0468	0,1593
0,5	0,4180	-0,5701	-0,5583	0,0149	-0,0557
0,6	1,5927	0,5359	0,4894	0,1205	-0,9082
0,7	1,4301	0,3443	0,2738	0,6861	-0,3674
0,8	-0,0610	-0,8920	-0,9093	0,3286	0,4750
0,9	1,3236	0,2663	0,2200	-1,3311	0,6861
1,0	0,3416	-1,0417	-0,9577	-0,4620	0,2996
1,1	0,6144	-0,3753	-0,3717	-1,6960	-0,7185
1,2	1,1990	0,0622	-0,0379	0,2454	-0,9191
1,3	-0,5262	-1,5498	-1,6292	-0,1605	0,0109
1,4	0,7074	-0,3506	-0,3872	-1,7235	0,3984
1,5	-0,3529	-1,2799	-1,4238	-0,7074	-0,0277
1,6	-0,8210	-1,6619	-1,7383	-2,0202	-1,2539
1,7	0,6396	-0,5155	-0,6243	-1,2143	-1,8858
1,8	-1,1127	-2,1361	-2,3936	-0,8650	-1,0024
1,9	-1,0774	-2,0159	-2,1987	-2,4681	-0,2823
2,0	-0,9673	-2,5588	-2,2887	-2,1883	-0,5326

4.2. Pengaruh Durasi Gangguan dan Waktu Pengisolasian Gangguan Terhadap Kestabilan Tegangan.

Lamanya durasi gangguan dan waktu isolir gangguan dengan pemutus tenaga berpengaruh terhadap perbedaan kestabilan tegangan. Kestabilan tegangan di bus Baturaja akibat gangguan tiga fasa pada saluran Baturaja-Bukit Kemuning diamati dengan menggunakan eksponen Lyapunov maksimum. Simulasi tegangan dinamis dilakukan selama 10 detik dan gangguan terjadi pada 0,1 detik setelah simulasi dilakukan. Lama gangguan adalah 1 detik sebelum pemutus tenaga bekerja untuk mengisolir gangguan. Gambar 7 memperlihatkan dinamika tegangan secara dinamis dan kestabilan tegangan di Bus Baturaja dengan eksponen Lyapunov maksimum.



Gambar 7. Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa selama 1 detik di Bus Baturaja
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum



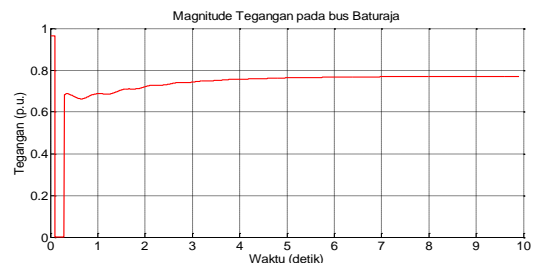
(b)

Gambar 8. Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa di Bus Baturaja dengan waktu pemutusan 8 detik setelah gangguan
(a). Tegangan
(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

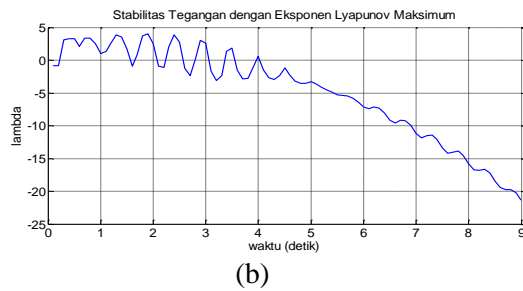
Eksponen Lyapunov maksimum menjelaskan bahwa tegangan di bus Baturaja lebih lama stabil bila gangguan lebih lama diisolir oleh pemutus tenaga di GI Baturaja.

Simulasi gangguan tiga fasa pada saluran dan waktu pengisoliran gangguan oleh pemutus tenaga di GI Bukit Kemuning adalah 8 detik setelah gangguan terjadi ditunjukkan pada gambar 8. Eksponen Lyapunov maksimum menunjukkan bahwa tegangan dapat stabil dalam 4,1 detik, tetapi nilai tegangan jauh di bawah nilai yang diijinkan untuk operasi sistem tenaga listrik [9].

Begitu pula dengan simulasi gangguan tiga fasa tanpa pengisolasian gangguan atau pemutus tenaga di GI Bukit Kemuning tidak bekerja memutus gangguan, ditunjukkan pada gambar 9. Eksponen Lyapunov menunjukkan tegangan di GI Baturaja stabil pada 4,1 detik, tetapi dengan nilai yang jauh di bawah batas operasi yang diijinkan.



(a)



(b)

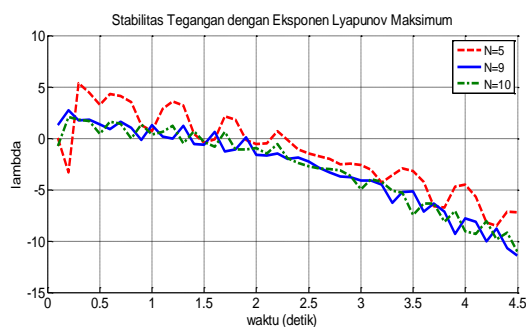
Gambar 9. Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa di Bus Baturaja tanpa pemutusan gangguan

(a). Tegangan

(b). Eksponen Lyapunov Maksimum

4.3. Pengaruh Panjang Sampel Data pada Kestabilan Tegangan Dinamis dengan Eksponen Lyapunov Maksimum

Nilai eksponen Lyapunov maksimum dengan berbagai panjang sampel data ditunjukkan pada gambar 10. Nilai ini adalah nilai hasil perhitungan eksponen Lyapunov maksimum untuk simulasi gangguan tiga fasa pada saluran GI Baturaja-GI Bukit Kemuning. Jumlah sampel data masing-masing $N=5$, $N=9$ dan $N=10$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada bus Baturaja mulai stabil dengan waktu yang berbeda-beda, jika jumlah sampel data yang digunakan berbeda-beda. Semakin besar jumlah sampel data yang digunakan, maka waktu untuk tegangan mulai stabil semakin cepat. Hal ini disebabkan oleh semakin banyak data yang digunakan menunjukkan jumlah waktu yang dianalisis. Semakin kecil jumlah sampel data yang dianalisis, keakuratan nilai eksponen Lyapunov semakin berkurang.



Gambar 10. Nilai Eksponen Lyapunov dengan berbagai ukuran sampel data

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian antara lain:

1. Eksponen Lyapunov maksimum dapat memperkirakan kestabilan tegangan dinamis dalam jangka waktu yang pendek dengan baik.
2. Eksponen Lyapunov maksimum dapat memperkirakan perilaku tegangan secara dinamis dalam jangka waktu yang lebih panjang tetapi tidak dapat dengan tepat memperkirakan kestabilan tegangan.
3. Ukuran sampel data tegangan sangat mempengaruhi analisa perkiraan kestabilan tegangan secara dinamis dengan eksponen Lyapunov maksimum.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Taylor, C.W., *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill (1994).
- [2] Huang, G.M., and Nair, N.K.C., *Detection of Dynamic Voltage Collapse*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol.3, pp.1284-1289, (2002).
- [3] Raghunatha, R., Ramanujam, R., Parthasarathy, K., and Thukaram, D., *A New and Fast Technique for Voltage Stability Analysis of A Grid Network Using System Voltage Space*, International Journal Electrical Power Energy System, vol. 20, no.5, pp.337-344, (1998).
- [4] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill (1994).
- [5] Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L., and Vastano, J.A., *Determining Lyapunov Exponents From a Time Series*, Elsevier Science, vol. 16(D), pp. 285-317, (1985).
- [6] Dasgupta, S., Paramasivam, M., Vaidya, U., and Ajarapu V., *PMU-Based Model – Free Approach for Short Term Voltage Stability Monitoring*, IEEE Transactions on Power System, pp. 1-8, (2012)
- [7] PT. PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Tanjung Karang, *Single Line Diagram Sistem 150/20kV dan Laporan Beban Tertinggi Transformator Gardu Induk*, (2012).
- [8] *MATLAB R2011a version 7.12.0.635 User's Guide*, www.mathwork.com, (2011).

[9] PT PLN (Persero). 1985. SPLN No.1 Tahun 1985 tentang Regulasi Tegangan. Jakarta.

Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2001. Sekarang menjadi staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Biodata Penulis

M. Widi Triyatno, lahir di Tanjung Karang tanggal 29 Desember 1990. Menamatkan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung tahun 2014.

Osea Zebua, lahir di Medan tanggal 9 Juni 1970. Menamatkan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara tahun 1995 dan pendidikan S2 di Jurusan Teknik Elektro

I Made Ginarsa, lahir di Denpasar tanggal 25 Maret 1970. Menamatkan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana tahun 1997, pendidikan S2 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2001 dan pendidikan S3 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tahun 2012. Sekarang menjadi staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram LAMPIRAN

Tabel 4. Konstanta Model Eksitasi Generator Pada Setiap Bus

No Bus	K _a	V _{Rmax} _x	V _{Rmin}	V _{Imax}	V _{Imin}	T _a	T _b	T _c	K _p	K _c
1	25	8,70	0,00	0,96	0,38	0,00	0,05	0,90	0,04	1,00
2	25	8,70	0,00	0,96	0,38	0,00	0,05	0,90	0,04	1,00
3	185	8,89	-2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	185	8,89	-2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	253	8,86	-7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	25	8,70	0,00	0,96	0,38	0,00	0,05	0,90	0,04	1,00
7	25	8,70	0,00	0,96	0,38	0,00	0,05	0,90	0,04	1,00
8	25	8,70	0,00	0,96	0,38	0,00	0,05	0,90	0,04	1,00

Tabel 5 Konstanta Model Generator Pada Setiap Bus

No. Bus	X _l	X _d	X _d '	X _d ''	T _d '	T _d ''	X _q	X _q '	X _q ''	T _q '	T _q ''	H
1	0,120	1,891	0,196	0,136	8,533	0,043	1,829	0,382	0,136	0,948	0,084	6,280
2	0,120	1,891	0,196	0,136	8,533	0,043	1,829	0,382	0,136	0,948	0,084	6,280
3	0,160	1,400	0,350	0,259	5,500	0,045	0,800	0,300	0,259	0,000	0,060	1,500
4	0,100	1,400	0,350	0,153	5,500	0,045	0,800	0,300	0,153	0,000	0,060	1,500
5	0,160	1,400	0,350	0,250	5,500	0,045	0,800	0,300	0,250	0,000	0,060	1,500
6	0,180	2,100	0,370	0,214	6,000	0,050	2,000	0,630	0,214	0,450	0,060	6,000
7	0,150	1,009	0,230	0,147	8,780	0,450	0,660	0,300	0,147	0,000	0,060	4,000
8	0,140	1,039	0,197	0,141	6,000	0,045	0,700	0,300	0,141	0,000	0,060	4,000