

ANALISIS PENGARUH INTEGRASI PEMBANGKIT ENERGI BARU TERBARUKAN TERHADAP KESTABILAN FREKUENSI PADA SALURAN TRANSMISI 150KV BALI

¹ Abdurrohman Eko Saputra, ² Awan Uji Krismanto, ³ Abraham Lomi

^{1,2,3} Teknik Elektro S1 ITN Malang, Malang, Indonesia

¹ saputraeko222@icloud.com, ² awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³ abraham@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Pemanfaatan sumber daya terbarukan membawa banyak manfaat bagi sistem tenaga listrik, tetapi juga beberapa tantangan seperti dampak yang dimiliki pembangkit listrik terbarukan. Pemasangan pembangkit listrik tenaga matahari atau photovoltaic surya PV di Negara dan Baturiti memberikan dampak terhadap frekuensi sistem. Studi ini bertujuan untuk menganalisis perilaku frekuensi pembangkit listrik tenaga surya terhadap frekuensi sistem setelah gangguan (stabilitas frekuensi) dengan menyelidiki bagaimana sistem merespons gangguan, dalam sistem tenaga dan mengembangkan cara untuk meningkatkan stabilitas frekuensi pada Sistem Kelistrikan Bali sebelum dan sesudah diintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya, saat diberikan simulasi penambahan beban dan juga pelepasan generator. Parameter frekuensi yang diselidiki termasuk (Tingkat Perubahan Frekuensi) ROCOF, penyimpangan frekuensi, dan waktu penyelesaian.

Kata Kunci : Integrasi Sistem Konversi Energi surya PV, Stabilitas Frekuensi, ROCOF

I. PENDAHULUAN

Sumber energi terbarukan (RES) memiliki peran penting dalam pengembangan sistem tenaga listrik, membawa kontribusi yang signifikan untuk generasi yang didistribusikan di seluruh Indonesia.[1] Sistem pembangkit listrik menggunakan sumber energi terbarukan semakin penting dalam sistem tenaga[2] energi terbarukan seperti tenaga surya dan turbin angin telah dipromosikan di seluruh dunia. Ini harus menjadi masalah yang menantang menjaga sistem daya stabil dengan energi terbarukan integrasi karena output mereka umumnya tidak pasti tergantung kondisi cuaca[3] Fraksi total pembangkit listrik yang diperoleh dari sumber energi terbarukan telah meningkat karena teknologi terkait telah matang dan menjadi lebih kompetitif. Tren ini diperkirakan akan berlanjut di tahun-tahun mendatang, dengan beberapa sumber seperti angin dan energi matahari

mencapai tingkat penetrasi sekitar 30% di beberapa sistem tenaga. Pembangkit listrik semacam ini, yang dibentuk oleh generator angin atau sistem photovoltaic (PV) surya, berdampak pada grid, tidak hanya karena karakteristik khusus sumber daya, tetapi juga karena teknologi yang digunakan untuk mengirimkan energi ke dalam daya jaringan, yang dalam banyak kasus didasarkan pada elektronika daya. Berlawanan dengan generator sinkron, dinamika konverter daya elektronik cepat (biasanya dalam kisaran beberapa siklus grid), dan interaksi mereka dengan grid terutama ditentukan oleh pengontrol mereka, yang sering dirancang untuk mengekstraksi daya maksimum dari sumber, tanpa memperhitungkan interaksi dengan sistem tenaga. Ketika bagian dari generator ini dalam campuran energi meningkat, dengan banyak generator terdistribusi yang terhubung ke jaringan distribusi, dan juga pembangkit listrik berbasis konverter skala besar yang terhubung ke jaringan transmisi, menjadi perlu untuk menganalisis dan mengurangi dampak dari sistem ini, merancang yang memadai mengendalikan strategi dan kemungkinan peningkatan sistem.[4]

Integrasi sumber energi terbarukan (RES) ke dalam sistem tenaga adalah topik yang sering dibahas dalam jurnal dan di konferensi. Contoh literatur tersebut termasuk investigasi dari efek PV pada keamanan sistem melalui nilai eigen, stabilitas tegangan dan analisis stabilitas sementara.[5]

Penetrasi tinggi dari pembangkit listrik yang terhubung dengan antarmuka, seperti tenaga surya, memiliki hal yang penting berdampak pada inersia sistem tenaga yang saling berhubungan. Ini dapat menimbulkan ancaman signifikan terhadap frekuensi stabilitas.[6]

Perubahan nilai frekuensi merupakan akibat dari semakin tingginya kebutuhan beban, yang memberikan pengaruh yang semakin besar terhadap kestabilan frekuensi suatu sistem. Dimana suatu frekuensi sistem yang ditetapkan memiliki standar batas yaitu 4% dari frekuensi nominal yaitu $48\text{Hz} \leq u \leq 52\text{Hz}$

Penelitian ini akan membahas tentang analisa pengaruh integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya terhadap kestabilan frekuensi sistem transmisi Bali menggunakan *software Power factory DigSilent*. Untuk menganalisis kestabilan frekuensi akibat integrasi PLTS ke dalam sistem, maka simulasi dilakukan menggunakan studi kasus pada sistem kelistrikan Bali 150kV yang dilakukan dengan simulasi *Load Flow* dan *RMS Simulation* dengan metode perbandingan grafik respon frekuensi. Simulasi dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bagaimana kestabilan frekuensi pada Sistem Kelistrikan Bali sebelum dan sesudah diintegrasikan PLTS saat diberikan gangguan, penambahan beban dan pelepasan salah satu generator.

Bali menjadi lokasi penelitian di karenakan pada daerah tersebut terdapat 4 PLTS yang masing-masing berkapasitas 25 MW yang mempengaruhi kestabilan frekuensi pada sistem transmisi.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Stabilitas Sistem Tenaga

Suatu sistem tenaga listrik dikatakan baik jika memenuhi beberapa syarat sebagai berikut:

1. Keandalan (Reliability) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (Quality) yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Kestabilan (Stability) yaitu kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi. Dalam artian, sistem tenaga listrik harus memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku serta harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan.

Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terhubung satu sama lain, maka tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban sementara pembangkit yang lain bebanya kecil.

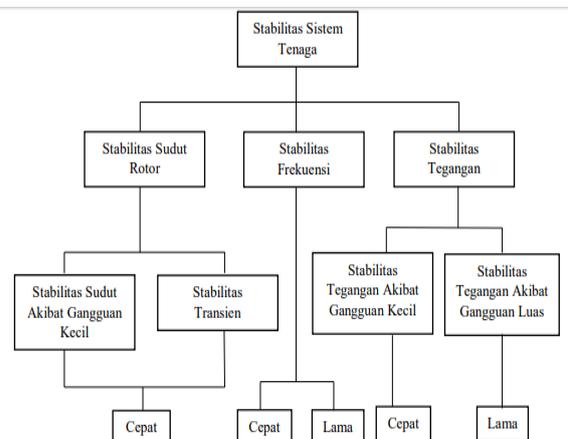
Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dan akan berubah-ubah setiap detiknya. Perubahan beban yang tidak terduga dapat dikategorikan sebagai gangguan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik.

Gangguan pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu, diperlukan satu penelaan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem. Kestabilan sistem daya dapat didefinisikan sebagai sifat sistem yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta balik kembali dalam keadaan semula bila keadaan menjadi normal.

Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu:

1. Kestabilan keadaan Tetap (Steady State Stability) Adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.
2. Kestabilan Dinamis (Dynamic Stability) Adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relative kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisa kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.
3. Kestabilan Peralihan (Transient Stability) Adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan system.

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Secara umum permasalahan kestabilan sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (Rotor Angle Stability), kestabilan tegangan (Voltage Stability) dan kestabilan frekuensi (Frequency Stability). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi Small Signal Stability dan transient Stability. Small signal Stability adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam, sedangkan Transient Stability dikarenakan kurang serempaknya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.



Gambar 1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik. [7]

A. Rate of Change of Frequency

Integrasi pembangkit listrik tenaga bayu kedalam sistem (on grid) menimbulkan beberapa dampak teknis dari berbagai tingkat penetrasi variabel kecepatan turbin angin pada inersia dan RoCoF (*Rate of Change of Frequency*).

Inersia dan RoCoF merupakan dua parameter penting yang bertanggungjawab untuk menyeimbangkan power system. Konsumsi daya dan pembangkitan harus selalu seimbang. Jika demand dan supply tidak seimbang atau jika tidak ada kapasitas cadangan yang memadai dalam power system maka akan timbul ketidakseimbangan yang dapat menyebabkan bekerjanya relay over/under frequency, kerusakan pada objek pembangkitan dan objek beban, dan dengan kemungkinan terburuk akan menimbulkan black out pada sistem. [8]

ROCOF adalah indikator yang paling banyak digunakan untuk menilai kinerja frekuensi dalam penahanan frekuensi periode[6]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibutuhkan peralatan yang dapat meningkatkan faktor daya untuk memperbaiki kestabilan frekuensi sehingga frekuensi sistem akan kembali normal. Dengan melakukan pemutusan beban tertentu maupun menambah kapasitas pembangkitan akan mengembalikan kestabilan frekuensi sistem. Hal ini dilakukan dengan menggunakan metode RoCoF. Untuk melihat respon optimal dibutuhkan suatu analisa yang akurat sehingga lebih efisien.

Frekuensi sistem tenaga tergantung pada keseimbangan antara daya yang dihasilkan dan daya yang dikonsumsi. Ketidakcocokan di antara mereka mempengaruhi frekuensi sistem. ROCOF sistem karena trip generator dapat dihitung menggunakan

$$\text{Rocof} = \frac{\Delta P \times F}{2Sn \times h} \quad (1)$$

$\frac{df}{dt}$ merupakan RoCoF sistem atau dengan kata lain tingkat perubahan frekuensi per satuan waktu (dalam Hz/s), H adalah inersia konstan dari mesin/generator (dalam s), dalam ΔP adalah total perubahan daya dari generator ke-n dalam sistem (MW) dan F adalah frekuensi sistem nominal (dalam Hz), dan Sn adalah total daya dalam sistem, termasuk daya tambahan dari PV (MVA) [9]–[10]

B. Stabilitas Frekuensi

Sistem tenaga listrik harus dapat memenuhi kebutuhan tenaga listrik dari para konsumen dari waktu ke waktu. Untuk itu daya yang dibangkitkan dalam sistem tenaga listrik harus selalu sama dengan beban sistem, hal ini diamati melalui frekuensi sistem. Adapun batas maksimal yang diijinkan oleh sistem untuk batas frekuensi adalah $\pm 4\%$.[11] stabilitas frekuensi adalah kemampuan sistem daya untuk mempertahankan frekuensi keadaan tunak, mengikuti gangguan sistem yang parah, yang mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Stabilitas frekuensi tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara generasi sistem dan permintaan beban dengan kehilangan beban minimum.[12]

stabilitas frekuensi dikhususkan untuk analisis tunggal atau beberapa skenario operasional terburuk yang dipilih

Namun demikian, pendekatan sistematis untuk menentukan jarak ke ketidakstabilan diperlukan untuk mengkarakterisasi relasional secara akurat pola antara indikator stabilitas (mis., laju perubahan-perubahan-frekuensi, ROCOF atau NADIR) dan variabel sistem utama (energi kinetik). [6]

Stabilitas frekuensi sistem tenaga selama yang pertama beberapa detik setelah gangguan tergantung pada kinetik energi yang diserap atau dilepaskan oleh generator, Jenis ini layanan kontrol frekuensi yang tersedia untuk sistem diketahui sebagai inersia karena memperlambat RoCoF.[13]

C. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sinar matahari yang mengenai permukaan bumi dapat dikonversikan menjadi energi listrik melalui solar sel. Solar sel terbuat dari bahan semikonduktor. Solar sel memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan energi listrik DC (Direct Current). Energi listrik yang dihasilkan oleh solar sel tunggal sangat kecil sehingga dibutuhkan beberapa solar sel yang digabungkan menjadi sebuah panel yang disebut dengan panel surya atau panel solar photovoltaic. Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

1. PLTS On Grid

PLTS *On Grid* merupakan model yang terdiri dari dua sumber energi yaitu *solar panel* dan jaringan listrik PLN. Penggunaan *solar panel* / PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik digunakan untuk mensuplai energi listrik di rumah tangga selama 24 jam, karena energi listrik yang disediakan oleh *Grid* PLN di lokasi penelitian hanya 14 jam sehari. Dengan rancangan implementasi seperti ini diharapkan dapat mengurangi pemakaian energi listrik dari jaringan listrik PLN dengan mengoptimalkan pemakaian energi terbarukan (PLTS) yang diterapkan pada rumah tangga.

2. PLTS Off Grid

PLTS *Off Grid* disebut juga dengan *stand-alone pv* merupakan system pembangkit listrik yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu - satunya sumber energi utama. Untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan pada rumah tangga, maka digunakan rangkaian *photovoltaic modul*. Sistem ini biasanya diterapkan pada daerah yang tidak mendapat pasokan listrik PLN.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam pembuatan penelitian analisa kesetabilan frekuensi akibat integrasi pembangkit energi baru terbarukan pada sistem 150kV Bali adalah :

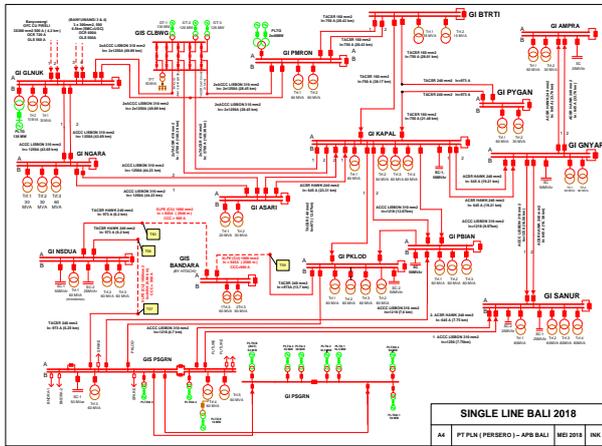
1. Kajian Literatur
2. Pengumpulan Data
3. Analisa Data

Adapun studi kasus dan flowchart dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2 dan

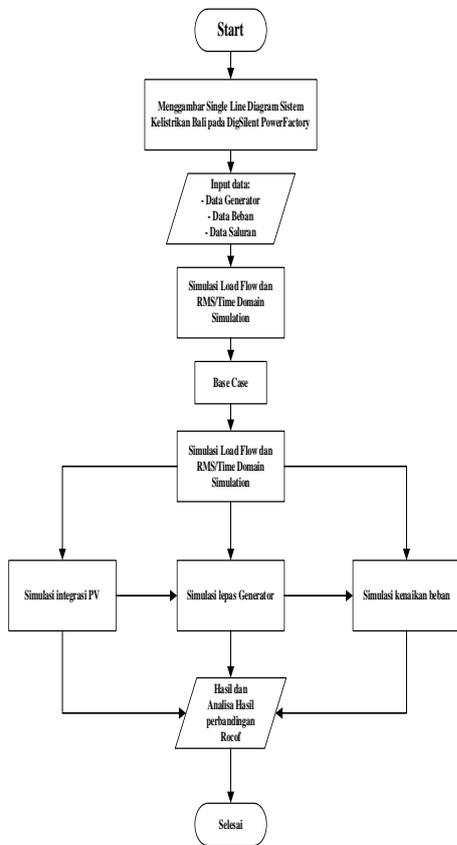
A. Studi Kasus

Sistem Kelistrikan Bali

Sistem kelistrikan yang di gunakan adalah sistem kelistrikan Bali yang terdiri dari 16 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 17 Bus.



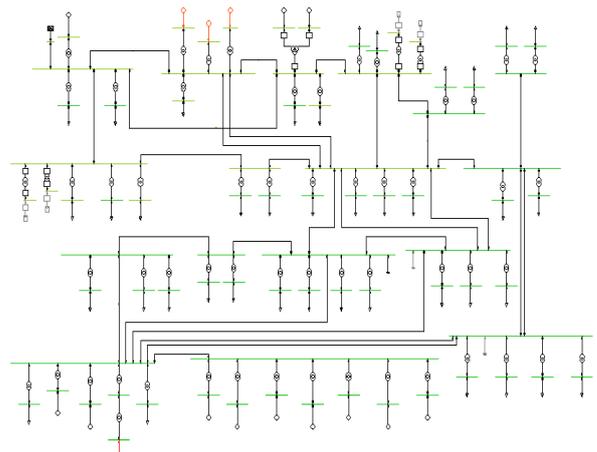
Gambar 2. Single Line diagram Bali 150kv



Gambar 3. Flowchart Penelitian

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Gambar Single line diagram Sistem Kelistrikan Bali

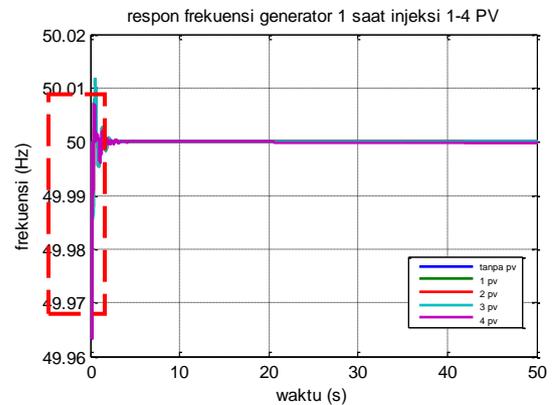


Gambar 4. Load flow SLD Sistem Kelistrikan Bali

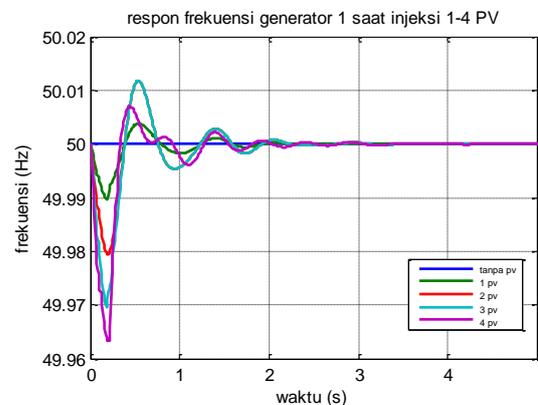
B. RMS Simulation.

Simulasi awal dijalankan untuk melihat *base case frequency*. Selanjutnya akan dilakukan simulasi terkait.

1. Integrasi PV 1 hingga 4x25MW



Gambar 5. .Grafik respon frekuensi pada Generator 1

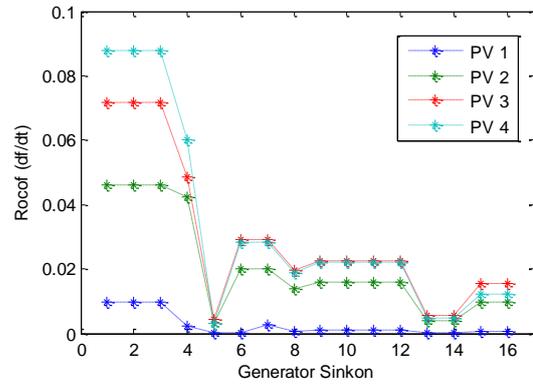


Gambar 6. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

Tabel 1. Rocof Generator 1

No. Gen	Status	Frekuensi		ΔP (MW)	2Sn (MVA)	Rocof
		Awal	Akhir			
1	PV 1	50	49.98975	0.910602	1172	0.009712052
1	PV 2	50	49.9795	4.529483	1232	0.045956605
1	PV 3	50	49.964	7.397807	1292	0.07157321
1	PV 4	50	49.9633	9.487445	1352	0.087716762

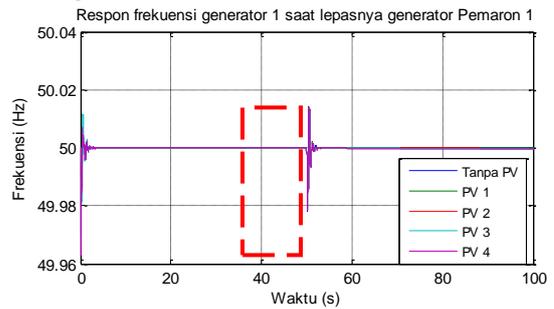
- Dapat dilihat bahwa kondisi tanpa injeksi PV pada generator 1 tidak mengalami transient, namun saat diinjeksikan PV 1x25 MW terjadi transient pada gelombang frekuensi generator dari rentan waktu 0-0,3 detik sebesar 49,98 Hz dan stady state kembali ketika mencapai detik ke 1,5 namun kembali transient di detik ke 2,4 namun tidak begitu besar dampaknya, ini karena system baru pertama menerima injeksi PV dan mencoba untuk kembali ke kondisi stady state.
- Setelah dilakukan injeksi PV yang kedua sebesar 25 MW, dengan total PV dalam sistem 2x25MW kembali terjadi transient yang nilai frekuensinya lebih tinggi dari kondisi saat pemasangan 1 PV yaitu dari rentan waktu 0-0,2 detik sebesar 49,97 Hz, dan stady state kembali ketika mencapai detik ke 1,4
- Setelah dilakukan injeksi PV yang ketiga sebesar 25 MW, dengan total PV dalam sistem 3x25MW, kembali terjadi transient yang nilai frekuensinya lebih tinggi dari kondisi saat pemasangan 2 PV yaitu dari rentan waktu 0-0,4 detik sebesar 49,964 Hz, lalu kembali naik ke frekuensi 50,01 Hz di waktu 0,4-0,7 detik dan turun drastis di frekuensi 49,89 Hz di waktu 0,7-0,9 detik lalu naik drastis kembali di frekuensi 50,09 Hz sampai detik ke 1,3 dan perlahan mulai menuju kondisi steady state kembali ketika mencapai detik ke 3.
- Untuk yang terakhir dilakukan injeksi PV sebesar 25 MW, dengan total PV dalam sistem 4x25MW dan pada saat kondisi awal transient yang nilai frekuensinya tidak jauh beda dengan pemasang 1 dan 2 PV, yaitu turun di frekuensi 49,963 Hz di waktu 0-0,5 detik lalu naik kembali sampai frekuensi 50,02 Hz sampai detik ke 0,8 dan perlahan mulai stady state kembali ketika mencapai detik ke 2,3.



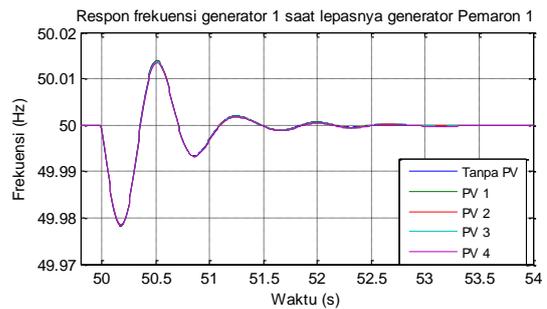
Gambar 7. .Grafik rocof pada study case 1

Pada grafik rocof diatas menunjukkan bahwa nilai rocof tertinggi berada pada generator 1, 2, 3, 4, 6, dan 7.

2. Loss generator Pemaron 1



Gambar 8. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

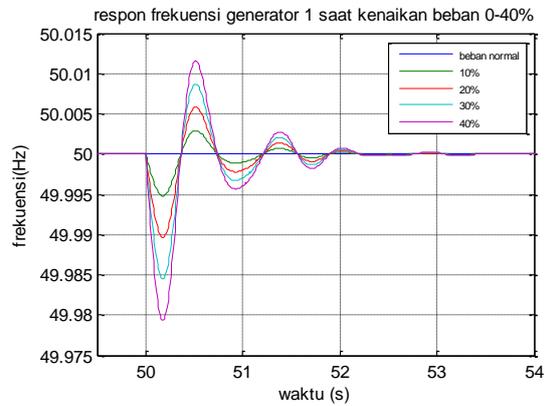


Gambar 9. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

Dapat dilihat bahwa kondisi tanpa injeksi PV dan dengan injeksi PV dari 1x25MW hingga 4x25MW tidak mengalami perubahan transient yang besar, hal ini dapat dilihat pada tabel, bahwa frekuensi nadir tiap – tiap kondisi hanya memiliki perbedaan frekuensi nadir 0.00005Hz. Hal ini dapat terjadi karena meskipun generator PV tidak menambah inersia dalam sistem, namun generator sinkron pada sistem Bali dapat mempertahankan frekuensi sistem pada 50Hz.

Tabel 2. Rocof Generator 1

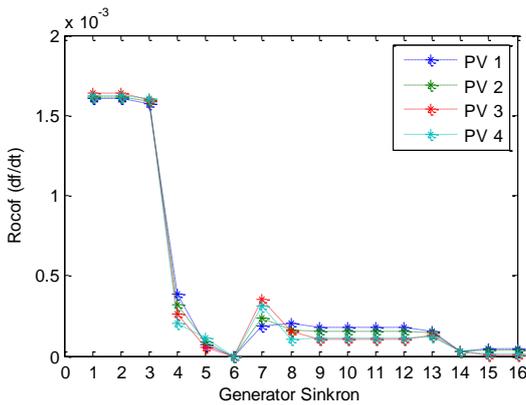
No. Gen	Keadaan	Frekuensi		ΔP (MW)	F (Hz)	2Sn (MVA)	h	Rocof
		Awal	Akhir					
1	PV 1 + Loss Generator	49.9999	49.97825	0.150384	50	1172	4	0.0016039
	PV 2 + Loss Generator	49.9999	49.9783	0.159145	50	1232	4	0.0016147
	PV3 + Loss Generator	49.9999	49.97835	0.169202	50	1292	4	0.001637
	PV 4 + Loss Generator	49.9999	49.9784	0.175912	50	1352	4	0.0016264



Gambar 12. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

Tabel 3. Rocof Generator 1

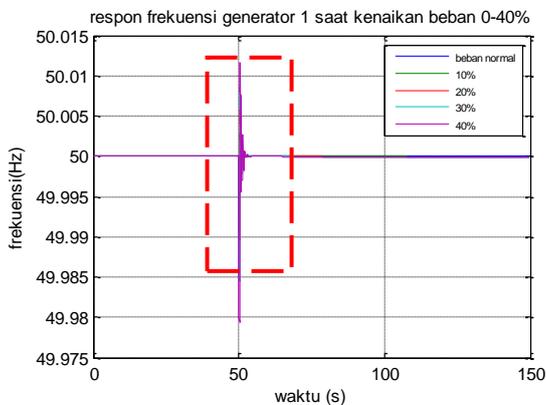
No. Gen	Keadaan	Frekuensi		ΔP (MW)	F (Hz)	2Sn (MVA)	h	Rocof
		Awal	Akhir					
1	10%	50	49.9948	0.045189	50	1112	4	0.00050797
1	20%	50	49.98965	0.089917	50	1112	4	0.001010758
1	30%	50	49.9845	0.134129	50	1112	4	0.001507745
1	40%	50	49.97935	0.183893	50	1112	4	0.002067143



Gambar 10. Grafik rocof pada study case 2

Pada grafik rocof diatas menunjukkan bahwa nilai rocof tertinggi berada pada generator 1, 2, 3, dan 7.

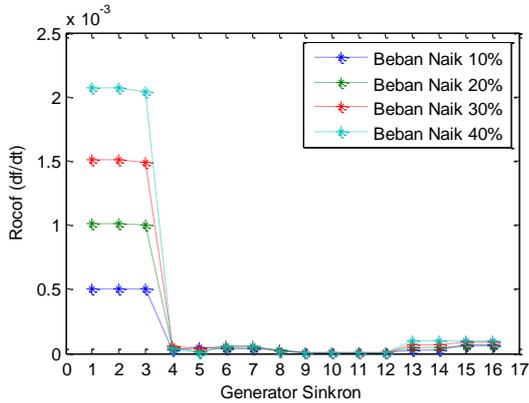
3. Kenaikan beban 0-40%



Gambar 11. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

- Dapat dilihat bahwa kondisi pertama tidak mengalami transient, namun saat beban di naikan 10% pada detik ke 50 terjadi transient pada gelombang frekuensi generator 1 (celukanbawang1) dari rentang waktu 50-50,3 detik sebesar 49,99 Hz dan naik kembali ke frekuensi 50,01 Hz pada detik ke 50,3-50,8 dan perlahan mulai perlahan stady state kembali ketika mencapai detik ke 50,4.
- Setelah dilakukan penambahan beban 20%, kembali terjadi transient yang nilai frekuensinya lebih tinggi dari kondisi saat penambahan beban 10% yaitu dari rentan waktu 50-50,3 detik sebesar 49,989 Hz, dan naik kembali ke frekuensi 50,03 Hz pada detik ke 50,3-50,8 dan perlahan mulai perlahan stady state kembali ketika mencapai detik ke 50,4
- Setelah dilakukan penambahan beban 30%, kembali terjadi transient yang nilai frekuensinya lebih tinggi dari kondisi saat penambahan beban 10% yaitu dari rentan waktu 50-50,3 detik sebesar 49,984 Hz, dan naik kembali ke frekuensi 50,05 Hz pada detik ke 50,3-50,8 dan perlahan mulai perlahan stady state kembali ketika mencapai detik ke 50,4

- Untuk yang terakhir dilakukan penambahan beban 40% pada detik ke 60 terjadi transient dari rentan waktu 50-50,3 detik sebesar 49,979 Hz dan naik kembali ke frekuensi 50,06 Hz pada detik ke 50,3-50,8 dan perlahan mulai perlahan steady state kembali ketika mencapai detik ke 50,3

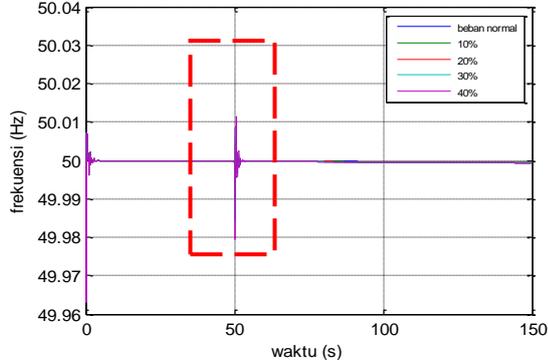


Gambar 13. .Grafik rocof pada study case 3

Pada grafik rocof diatas menunjukkan bahwa nilai rocof tertinggi berada pada generator 1, 2, dan 3.

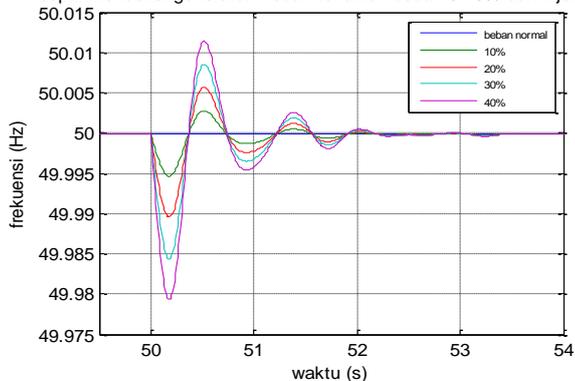
4. Kenaikan beban 0-40% dengan injeksi 4PV

respon frekuensi generator 1 saat kenaikan beban 0-40% dan injek 4 PV



Gambar 14. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

respon frekuensi generator 1 saat kenaikan beban 0-40% dan injek 4 PV

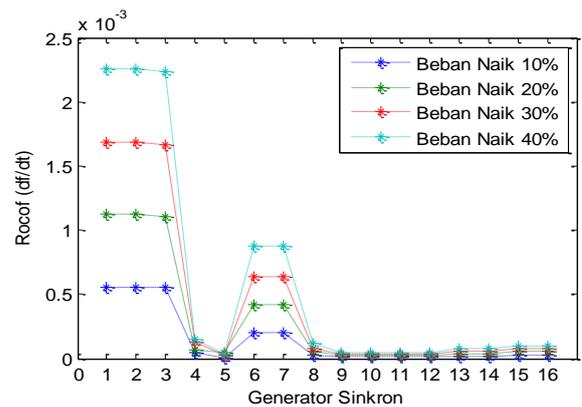


Gambar 15. Grafik respon frekuensi pada Generator 1

Untuk study case yang terakhir adalah respon frekuensi generator saat mengalami kenaikan beban dari 0-40% dengan injeksi 4PV dan ternyata hasilnya hampir sama dengan study case sebelumnya yaitu respon frekuensi generator hanya berbeda 0.00005Hz hingga 0.00015Hz dengan saat mengalami kenaikan beban tanpa injeksi PV.

Tabel 4. Rocof Generator 1

No. Gen	Keadaan	Frekuensi		ΔP (MW)	2Sn (MVA)	Rocof
		Awal	Akhir			
1	4PV + 10%	49.9998	49.99465	0.060439	1352	0.000558793
1	4PV + 20%	49.9998	49.98955	0.121251	1352	0.001121034
1	4PV + 30%	49.9998	49.98444	0.182444	1352	0.001686797
1	4PV + 40%	49.9998	49.97933	0.244027	1352	0.002256167



Gambar 16. Grafik respon frekuensi pada Generator 4

Pada grafik rocof diatas menunjukkan bahwa nilai rocof tertinggi berada pada generator 1, 2, 3, 6, dan 7.

V. KESIMPULAN

Dalam penelitian “Analisa Pengaruh Integrasi Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan Terhadap Kestabilan Frekuensi Pada Saluran Transmisi 150kv Bali” ini menggunakan metode analisis tingkat perubahan frekuensi dengan sistem jaringan 150kV PT PLN Bali, di dapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Integrasi PLTS pada sistem Interkoneksi New England dapat memperburuk respon frekuensi sistem, hal ini terjadi karena beberapa faktor, yaitu lokasi pemasangan PLTS, jumlah beban, besarnya injeksi PLTS, yang mempengaruhi sistem secara menyeluruh. Dan dalam study case penambahan PV pengaruhnya terhadap frekuensi sangat terlihat.
2. Dari study case yang pertama semakin banyak jumlah PV yang di injeksikan maka dampak terhadap nilai frekuensi juga ikut meningkat, dan untuk mencapai steady state kembali pada PV 4 lebih membutuhkan waktu yang lebih lama dibanding ketika injeksi PV

- 1,2,3, karena tinggi gelombang transient sangat jauh berbeda disbanding PV yang lain hal ini dikarenakan kapasitas injeksi yang semakin besar yakni 4x25 MW.
3. Rocof tertinggi setiap study case berada pada generator 1, 2, 3. Hal ini disebabkan oleh frekuensi nadir yang tinggi dan perubahan supply daya dari generator tinggi. Rocof tinggi mengidentifikasi generator yang membutuhkan waktu lebih lama untuk stabil kembali.
 4. Sistem Bali memiliki ketahanan sistem yang tinggi (damping ratio), hal ini dapat dilihat dari kembalinya frekuensi ke titik 50Hz setelah diberikan gangguan seperti 3 study case diatas.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Marinescu, *Member, IEEE*, and I. Şerban, *Member, IEEE (2009)* Analysis of Frequency Stability in a Residential Autonomous Microgrid Based on a Wind Turbine and a Microhydro Power Plant Transilvania University of Braşov, Department of Electrical Engineering
- [2] Daniel Remon , Antoni M. Cantarellas, Juan Manuel Mauricio, Pedro Rodriguez.(2017). Power system stability analysis under increasing penetration of photovoltaic powerplants with synchronous power controllers. *Department of Electrical Engineering, Technical University of Catalonia, 08222 Barcelona, Spain.*
- [3] Hyangryul Bae, Takao Tsuji and Tsutomu Oyama, Kenko Uchida,(2016), Graduate School of Engineering Yokohama National University Yokohama, Japan, Frequency Regulation Method With Congestion Management Using Renewable Energy Curtailment
- [4] Remon, Daniel., Cañizares, A, Claudio., Rodriguez, Pedro. (2017). Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile. *1Department of Electrical Engineering, Technical University of Catalonia, 08222 Barcelona, Spain*
- [5] Karel Máslo,(2015) *Member, IEEE* Impact of Photovoltaics on Frequency Stability of Power System During Solar Eclipse,
- [6] Elyas,Rakhshani, Digvijay,Gusain,Vinay,Sewdien, Jose ,L, Rueda,Tores, Mart.A.M.M,Van Der Meijden. *Member, IEEE (2019)*. A Key Performance Indicator to Assess the Frequency Stability of Wind Generation Dominated Power System.
- [7] Sultan, Anggriani, (Me2018). Analisis Kestabilan Frekuensi Pada Sistem SULBAGSEL Dengan Integrasi PLTB.
- [8] V. Pavlovsky, A. Steliuk, O. Lenga, V. Zaychenko, and M. Vyshnevskiy, "Frequency stability simulation considering underfrequency load shedding relays, special protection automatics and AGC software models," *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, pp. 5–9, 2017
- [9] F. U. Qureshi, G. Verbic, M. Garmroodi, A. Chapman, and A. S. Ahmadyar, "Using fast frequency response services to improve frequency stability of low inertia power systems," *Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [10] Nahid-Al-Masood, R. Yan, and T. K. Saha, "Frequency response with significant wind power penetration: Case study of a realistic power system," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014-
- [11] M. S. Sehedra and O. B. Dudurch, "Issues of inertia response and rate of change of frequency in power systems with different penetration of variable speed wind turbines," *Proc. - EPNet 2016, Electr. Power Networks*, pp. 1–4, 2017.
- [12] Bashar Sabeeh Abdulraheem, Chin Kim Gan,(2016), *Ministry of Electricity of Iraq1, University Technical Malaysia Melaka*, Power System Frequency Stability and Control: Survey
- [13] Fassahat Ullah Qureshi, Gregor Verbič, Mehdi Garmroodi, Archie Chapman, Ahmad Shabir Ahmadyar, Using Fast Frequency Response Services to Improve Frequency Stability of Low Inertia Power Systems, School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, Sydney, Australia