



Analisis Kinerja *Flywheel Energy Storage System* (FESS) Untuk Stabilisasi Output Daya Pada Pembangkit Listrik Solar PV

Adhom Nirwana¹

¹Institute Technology PLN, adhom2310531@itpln.ac.id

Corresponding Author: adhom2310531@itpln.ac.id¹

Abstract: Solar energy has great potential as a renewable energy source, but fluctuations in the power output of solar power plants due to changes in solar radiation intensity can disrupt the stability of the frequency and voltage of the electricity system, thus demanding a fast and efficient energy storage system. To overcome this challenge, the Flywheel Energy Storage System (FESS) is proposed because it has a fast response, high efficiency, and long service life. In this study, it is analyzed quantitatively through MATLAB Simulink and Simscape simulations by integrating it into the Cirata solar power plant in the Jamali network. The expected result is a significant increase in the stability of the system's frequency and voltage by reducing power fluctuations, thus supporting optimal penetration of renewable energy and providing an important contribution to the development of integrated energy storage systems for clean and reliable electricity.

Keyword: Renewable Energy, Energy Storage, Flywheel, Solar PV, Matlab Simulink

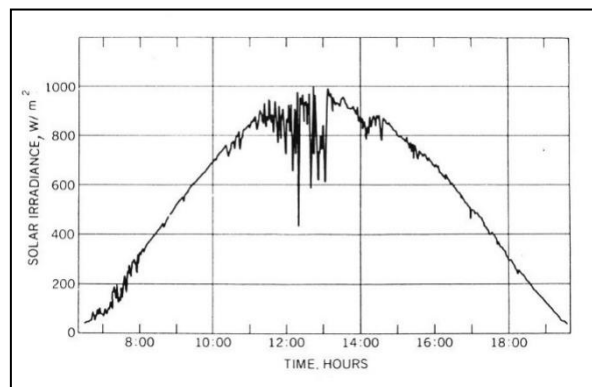
Abstrak: Energi surya memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan, namun fluktuasi output daya PLTS akibat perubahan intensitas radiasi matahari dapat mengganggu kestabilan frekuensi dan tegangan sistem kelistrikan, sehingga menuntut adanya sistem penyimpanan energi yang cepat dan efisien. Untuk mengatasi tantangan ini, Flywheel Energy Storage System (FESS) diusulkan karena memiliki respon cepat, efisiensi tinggi, dan umur pakai panjang, yang dalam penelitian ini dianalisis secara kuantitatif melalui simulasi MATLAB Simulink+Simscape dengan mengintegrasikannya pada PLTS Cirata di jaringan Jamali. Hasil yang diharapkan adalah peningkatan signifikan pada kestabilan frekuensi dan tegangan sistem dengan mengurangi fluktuasi daya, sehingga mendukung penetrasi optimal energi terbarukan dan memberikan kontribusi penting bagi pengembangan sistem penyimpanan energi terintegrasi untuk kelistrikan yang bersih dan andal.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Penyimpanan Energi, Flywheel, Solar PV, Matlab Simulink

PENDAHULUAN

Meningkatnya permintaan dan dampak lingkungan dari energi fosil mendorong Indonesia untuk berfokus pada energi terbarukan dimana saat ini 14% atau 9.761,5 MW terpasang dengan menetapkan target bauran energi terbarukan ambisius sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (PT PLN (Persero), 2021-2030). Potensi energi surya di Indonesia sangat besar (3.294 GW), namun pemanfaatannya baru mencapai 0,3 GW, menjadikannya pilihan utama energi terbarukan karena teknologi Panel Surya (PV) semakin efisien, bersih, mudah diakses, dan layak secara ekonomi maupun teknis (DEN, 2023).

Meskipun teknologi Solar PV memiliki keunggulan, tantangan utamanya adalah fluktuasi *output* daya akibat ketergantungan pada intensitas cahaya matahari (*intermitensi*), di mana penurunan daya dapat terjadi drastis dalam hitungan detik atau menit (berkisar 5%-27%) karena perubahan cuaca. Ketidakstabilan ini berisiko mengganggu stabilitas jaringan dan kualitas daya sistem kelistrikan. Saat ini, masalah intermitensi diatasi oleh pembangkit energi kinetik lain, namun respons waktunya yang lambat memerlukan solusi alternatif, sehingga Sistem Penyimpanan Energi (*Energy Storage System*) berespons cepat seperti *Flywheel Energy Storage System* (FESS) menjadi penting untuk mengatasi kendala ini.



Sumber : (Karisma, 2013)

Gambar 1 : Irradiasi Matahari dalam sehari

Flywheel Energy Storage System (FESS) adalah teknologi penyimpanan energi mekanik yang menyimpan energi listrik sebagai energi kinetik dalam putaran roda gila, dan mengembalikannya menjadi listrik saat dibutuhkan. Keunggulan utama FESS adalah respons sangat cepat, efisiensi tinggi, umur panjang, dan sifatnya yang lebih ramah lingkungan dibandingkan baterai karena tidak menggunakan bahan kimia berbahaya. Meskipun menjanjikan untuk menstabilkan *output* Solar PV yang fluktuatif, implementasi FESS masih memerlukan kajian mendalam terkait efisiensi konversi, respons waktu, kapasitas, biaya investasi, dan integrasi teknis dengan sistem Solar PV dan jaringan listrik.

Tujuan penulisan jurnal ini adalah untuk menganalisis dan mengkaji kinerja *Flywheel Energy Storage System* (FESS) dalam mendukung kestabilan *output* daya pada pembangkit Solar PV. Secara spesifik, bertujuan menentukan seberapa besar FESS mampu meredam fluktuasi daya akibat intermitensi intensitas cahaya matahari, dengan mengukur respons waktu, efisiensi energi, dan keandalannya. Hasil analisis ini akan digunakan untuk menentukan skenario pemasangan FESS yang paling optimal demi mencapai kestabilan *output* daya yang maksimal.

METODE

Metode penelitian pada jurnal ini berisi tentang perbandingan pembangkit solar PV yang langsung terhubung ke beban (konvensional) dan pembangkit solar PV yang terhubung

terlebih dahulu ke Flywheel dan ke Generator kemudian ke beban. Dari keduanya untuk mengetahui perbedaan stabilitas daya yang dikeluarkan.

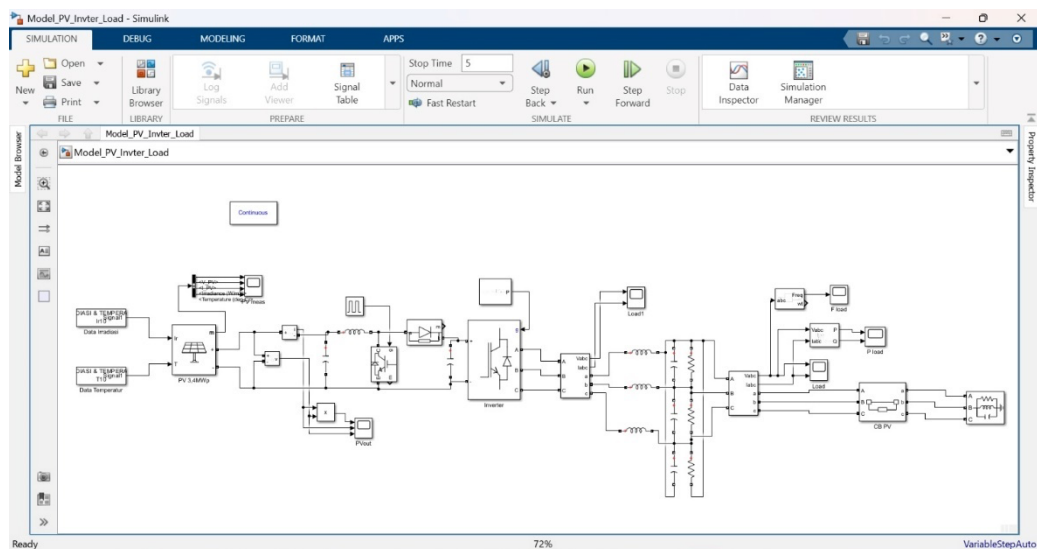
Dengan menggunakan 10 waktu sample data Irradiasi matahari pada lokasi PLTS Cirata yang kemudian dilakukan simulasi menggunakan software MATLAB Simulink untuk mengetahui hasil yang diperoleh.

Tabel 1: Data Radiasi Matahari dan Temperatur

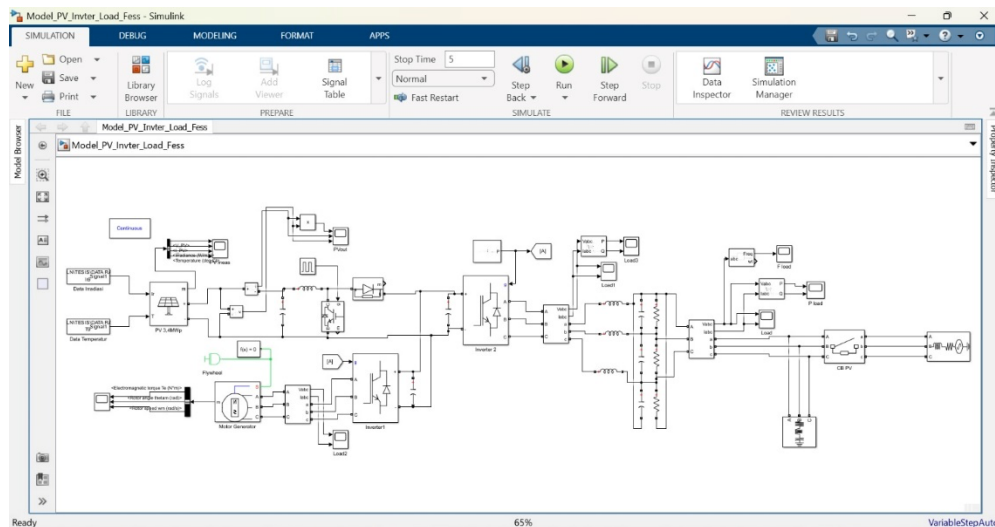
Pukul	Sample Radiasi Matahari																				Rata-Rata	
	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10			
	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T	Ir	T
4:00	0	24.7	0	23.26	0	22.63	0	24.42	0	21.88	0	22.77	0	23.46	0	23.07	0	23.78	0	23.17	0.00	23.31
5:00	2.8	24.67	0	23.18	0	22.48	11.98	24.41	3.2	21.96	0	22.71	0	23.33	0	22.89	0	23.7	0	23.15	1.80	23.25
6:00	77.72	25.46	40.12	24.5	38.83	23.19	153.15	25.32	75.38	23.42	78.97	24.01	38.62	23.84	18.77	23.92	50.72	24.6	49.03	23.99	62.13	24.23
7:00	262.98	27.07	162.8	25.84	219.68	24.66	376.83	26.42	216.15	25.25	250.12	25.57	146.38	24.67	76.05	25	212.48	25.77	189.12	25.63	211.26	25.59
8:00	454.1	27.91	305.15	26.94	420.95	26.13	612.78	27.41	374.27	26.83	441.2	26.94	298	25.23	130.02	26	396	27.13	343.55	26.93	377.60	26.75
9:00	637.8	28.44	440.52	27.72	592.03	27.18	679.58	28.44	610.08	28	587.95	27.95	406.85	26	302.67	26.92	545.78	28.43	461.75	27.12	526.50	27.62
10:00	742	28.98	574.97	28.09	684.47	27.93	777.9	29.38	741.33	28.86	690.38	28.52	483.5	26.51	497.35	27.6	560.85	29.11	589.95	27.35	634.27	28.23
11:00	750.75	29.31	671.33	28.52	700.55	28.5	806.28	30.13	755.58	29.47	729.8	28.91	469.1	26.69	609.1	28.06	693.55	29.23	602.75	27.5	678.88	28.63
12:00	723.03	29.22	710.92	28.47	655.4	28.94	791.62	30.57	772.5	29.74	690.22	29.3	525.05	26.9	645.2	28.22	520.92	29.05	561.8	27.58	659.67	28.80
13:00	667.72	29.06	465.67	28.21	528.2	29.18	637.92	30.57	729.03	29.79	568.62	29.33	508.55	26.58	723.92	28.25	525.12	28.52	413.52	27.54	576.83	28.70
14:00	480.88	28.81	189.4	27.94	413.9	29.1	575.03	30.33	559.75	29.35	501.15	29.31	519.88	25.98	568.7	28.01	351.48	27.63	386.58	27.39	454.68	28.39
15:00	339.6	28.46	128.93	27.47	285.45	28.62	400.6	29.72	404.55	28.66	339.88	28.81	387	25.58	502.83	27.56	241.75	26.87	278.67	27.06	330.93	27.88
16:00	189.18	27.86	69.75	26.83	141.12	27.88	161.85	28.75	211.85	27.97	188.7	28.13	215.32	25.3	272.85	26.93	128.05	26.18	143.7	26.6	172.24	27.24
17:00	47.1	26.98	24.05	25.91	20.05	26.42	17.48	27.5	51.17	27.03	52.35	27.01	63.62	25.06	77.62	26.01	38.42	25.7	30.17	25.91	42.20	26.35
18:00	0	26.05	0	24.98	0	25.51	0	26.34	0	26	0	25.82	0	24.7	0	25.07	0	25.47	0	25.49	0.00	25.54

Sumber : (Nasa Power, 2025)

Dengan membuat pemodelan pada software Matlab Simulink antara rangkaian konvensional (Gambar 2) dan rangkaian baru yang menggunakan flywheel dan generator (Gambar 3) kemudian menjalankannya. Kumpulkan data dari kedua pemodelan tersebut setelah itu dilakukan analisa hasil yang di dapatkan.



Gambar 2: Pemodelan Solar PV konvensional



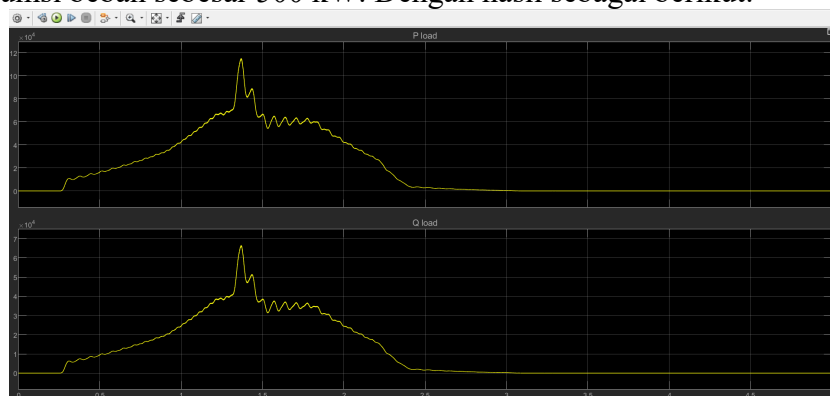
Gambar 3: Pemodelan Solar PV dan Flywheel

Dari pemodelan diatas akan menggunakan data PV di PLTS Cirata yang berkapasitas 194 MWp dan terbagi menjadi 13 blok yang terdiri dari 342.800 modul (Monocrystalline). Menggunakan 49 *Central Inverter* berkapasitas 3,4 MVA dengan tegangan 1500 Vdc dan output 600Vac (PMSE, 2025). Diperlukan data beban dengan asumsi beban tetap sebesar 500 kW, power factor 0.95, Frekuensi 50 Hz serta tegangan (rms) 600 Vac.

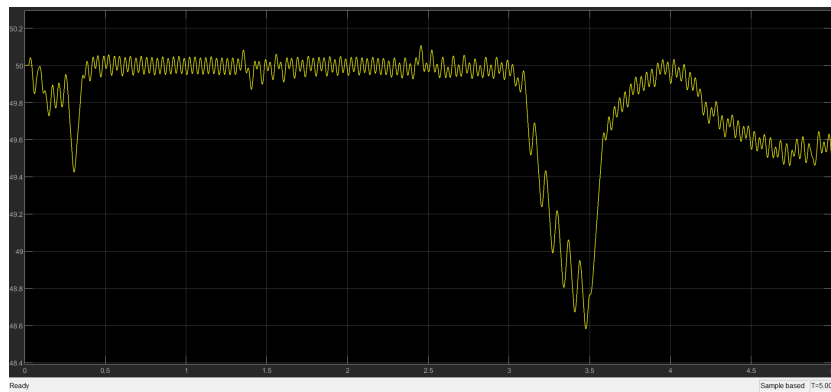
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil percobaan dari kedua pemodelan menggunakan software MATLAB Simulink dapat berjalan dengan hasil mempunyai perbedaan yang signifikan. Dari 10 item sampel data Irradiasi matahari (Tabel 1) akan ditampilkan dalam jurnal ini hanya 5 item sampel, serta gambar yang akan ditampilkan 1 sampel pada data Irradiasi 9 sesuai Tabel 1.

Percobaan pertama dilakukan dengan pemodelan konvensional Dimana dengan menggunakan asumsi beban sebesar 500 kW. Dengan hasil sebagai berikut:

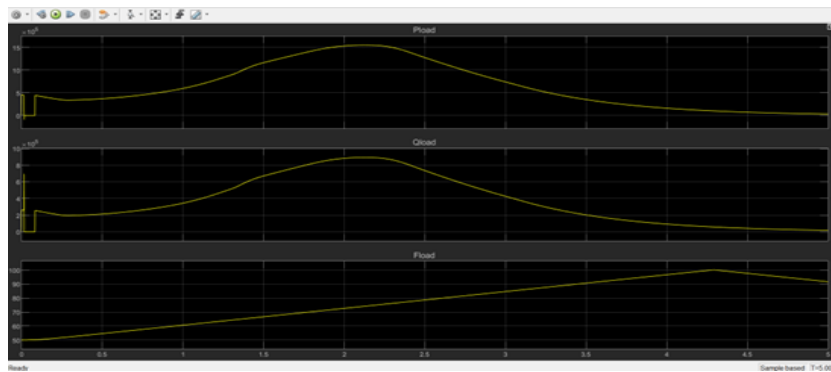


Gambar 4: Grafik Daya (Konvensional)

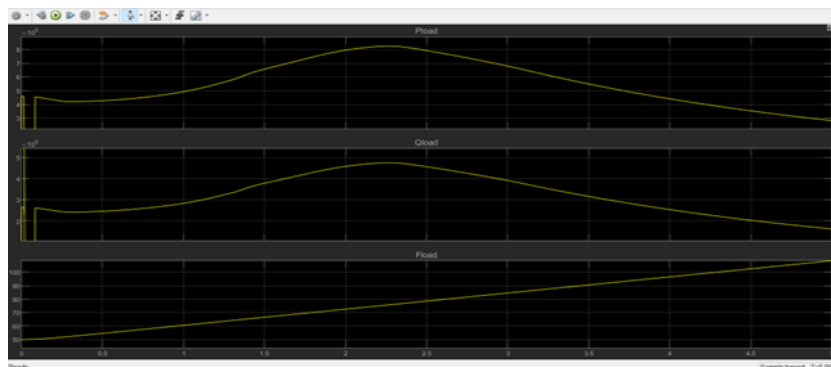


Gambar 5: Grafik Frekuensi (Konvensional)

Selanjutnya dilakukan percobaan dengan menggunakan pemodelan solar PV yang dihubungkan ke Flywheel dan Generator pada sampel Irradiasi 9, Dimana beban flywheel dibuat bervariasi dari mulai 1 kg/m², 2 kg/m², 3.5 kg/m², 4.5 kg/m², 5 kg/m². Serta beban daya Listrik dibuat sama dengan pemodelan konvensional diatas. Dengan hasil sebagai berikut:



Gambar 6: Grafik Daya & Frekuensi (with Flywheel 1 kg/m²)



Gambar 7: Grafik Daya & Frekuensi (with Flywheel 3.5 kg/m²)

Dengan menggunakan metode pemodelan yang sama diantara keduanya beserta parameter-parameter yang sama, dibawah ini adalah hasil rekapitulasi percobaan melalui software *MATLAB Simulink* dari 4 sampel.

Tabel 2: Rekapitulasi Percobaan

Percobaan	Inverter				Flywheel			
	Power (W)				Beban FW (kg)	Power (W)		
	Peak (W)	Ir0	End time			Peak	Ir0	End time
Sampel 2	Ir	639,5	-	0	1	1.392.000	450.100	227.700
					2	946.100	549.200	124.400
	P	115.600	1,42	0	3,5	739.700	546.300	235.400
					4,5	677.500	536.500	278.800
	t	1,510	3,100	5	5	655.700	532.200	295.000
Sampel 5	Ir	772,5	-	0	1	2.433.000	1.200.000	65.880
					2	1.525.000	1.083.000	257.800
	P	134.200	5,22	0	3,5	1.073.000	890.600	392.200
					4,5	935.200	812.600	428.100
	t	1,510	3,100	5	5	886.700	782.600	439.500
Sampel 7	Ir	525	-	0	1	1.447.000	756.500	39.440
					2	991.300	730.700	168.700
	P	62.550	9,93	0	3,5	767.800	653.000	282.800
					4,5	699.500	619.100	322.700
	t	1,536	3,100	5	5	675.500	606.000	337.500
Sampel 9	Ir	693,5	-	0	1	1.555.200	949.900	33.600
					2	1.074.000	704.200	162.200
	P	115.400	3,64	0	3,5	824.000	653.100	283.100
					4,5	745.300	623.300	325.600
	t	1,369	3,100	5	5	717.300	611.400	340.400

Sumber: *MATLAB Simulink*

KESIMPULAN

Flywheel dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kestabilan tegangan dan frekuensi. Respon cepat flywheel dalam hitungan milidetik dapat memberikan keandalan yang lebih baik.

Integrasi Flywheel dengan Solar PV secara signifikan (40%-60%) meredam fluktuasi daya yang disebabkan oleh perubahan intensitas radiasi matahari, jauh lebih baik daripada sebelumnya (lebih dari 95%). Flywheel berfungsi sebagai penyimpan energi jangka pendek (short-term buffer) yang menstabilkan penyerapan dan pelepasan energi saat terjadi perubahan radiasi mendadak, efektif mengurangi efek intermitensi.

Berat beban flywheel adalah penentu utama kestabilan tegangan. Flywheel yang lebih ringan menghasilkan fluktuasi tegangan yang lebih cepat, sementara flywheel yang lebih berat memberikan kestabilan tegangan yang lebih baik, meskipun membutuhkan putaran awal yang lebih berat. Berdasarkan tegangan, daya, dan berat beban yang dihasilkan, sistem ini cocok diterapkan pada sistem tegangan menengah (6,3 – 20 kV), disesuaikan dengan kapasitas Solar PV dan generator yang digunakan.

REFERENSI

DEN. (2023). *Outlook Energi Indonesia*. Jakarta: ESDM.
 Karisma, G. (2013, 11 27). Diambil kembali dari
<https://gautamakarisma.wordpress.com/2013/11/27/plts-daya-dan-energi/>

PMSE. (2025). Diambil kembali dari Cirata Floating Solar Power Plant: <https://pmse.solar>
Power, N. (2025). Diambil kembali dari <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
PT PLN (Persero). (2021-2030). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL).
ESDM.