

Penerapan Metode Moving Average untuk Mengurangi Fluktuasi Daya pada Sistem Pembangkit Hibrida

Application of Moving Average Method Reducing Power Fluctuation in Hybrid Generation

Syaiful Ismail¹, Tri Desmana Rachmilda², Deny Hamdani³

^{1,2,3} Institut Teknologi Bandung; email: ¹syaifulismail91@gmail.com, ²trides@gmail.com, ³deny.hamdani@itb.ac.id

[Dikirimkan: 23 November 2023, Direvisi: 8 November 2024, Diterima: 25 November 2024]
Corresponding Author: Syaiful Ismail

INTISARI — Seiring dengan meningkatnya penggunaan teknologi panel surya fotovoltaik (PV) dalam sistem pembangkit hibrida, maka tidak terlepas dari beberapa tantangan yang harus di hadapi. Beberapa tantangan tersebut adalah fluktuasi daya PV yang akan berdampak pada operasional sistem pembangkit. Untuk mengatasi tantangan tersebut, dalam rangka penelitian ini diterapkan metode *moving average* pada sistem penyimpanan energi berupa baterai, dengan tujuan untuk menyeimbangkan fluktuasi daya yang dihasilkan oleh sel surya PV yang disalurkan ke dalam infrastruktur sistem tenaga listrik yang ada. Penerapan *moving average* dilakukan untuk perataan daya keluaran aktual PV serta dengan memanfaatkan sistem kontrol pada konverter yang terhubung pada Bus DC dan terintegrasi dengan sistem AC berupa sistem PLTMH dan beban. Penggunaan baterai bertujuan menyerap dan melepaskan daya guna menyeimbangkan keluaran daya PV dan merujuk pada daya referensi baterai yang dihasilkan oleh Metode *moving average*. Hasil simulasi menunjukkan kinerja perataan daya menggunakan metode *moving average* berdampak signifikan dibandingkan dengan kondisi sebelum penerapan teknik *moving average*. Dengan demikian, terjadi peningkatan akurasi perataan, dan daya pada bus DC mencapai stabilitas untuk disuplai ke sistem AC. Keberhasilan penerapan metode *moving average* sangat terkait dengan sistem penyimpanan energi baterai, terutama konverter dan sistem kontrol yang digunakan. Dengan mengurangi fluktuasi, tujuan sistem pembangkit hibrida untuk mengatasi ketidakpastian pasokan energi dapat tercapai.

ABSTRACT — Along with the increasing use of solar photovoltaic (PV) panel technology in hybrid generation systems, several challenges must be faced. Some of these challenges are PV power fluctuations that will impact the operation of the generating system. To overcome these challenges, in the framework of this research, the Moving Average method is applied to the energy storage system in the form of a battery to balance the power fluctuations generated by PV solar cells that are channelled into the existing power system infrastructure. The Moving Average is applied to smooth the actual output power of PV by utilizing the control system on the converter connected to the DC Bus and integrating it with the AC system in the form of the MHP system and load. Batteries aim to absorb and release power to balance the PV power output and refer to the battery reference power generated by the Moving Average Method. The simulation results show that the performance of power smoothing using the Moving Average method has a significant impact compared to the conditions before applying the Moving Average technique. Thus, there is an increase in smoothing accuracy, and the power on the DC bus achieves stability to be supplied to the AC system. The successful application of the Moving Average method is closely related to the battery energy storage system, especially the converter and control system used. By reducing fluctuations, the goal of the hybrid generation system to overcome the uncertainty of energy supply can be achieved.

KATA KUNCI — Fluktuasi Daya, *Moving Average*, Perataan Daya, Sistem Pembangkit Hibrida, Sistem Penyimpanan Energi Baterai.

I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan memegang peranan sentral dalam proses transisi menuju energi yang bersih. Laporan PLN tahun 2021 menunjukkan bahwa 421 fasilitas sumber daya energi terbarukan di Indonesia memiliki kapasitas terpasang total 4.189 megawatt (MW). Pada tahun yang sama, kapasitas terpasang pembangkit listrik nasional hanya mencapai 6,5%, mencapai 64.553 MW [1]. Pemanfaatan sumber energi terbarukan dalam konteks pembangkit listrik, menghasilkan panas untuk keperluan bangunan dan industri, serta penggunaan dalam sektor transportasi merupakan faktor penting dalam upaya menjaga agar kenaikan suhu global rata-rata di bawah batas batas 1,5°C. Laporan yang diterbitkan oleh *International Energy Agency* (IEA) menyoroti bahwa teknologi panel surya fotovoltaik (PV) menjadi satu-satunya teknologi yang mencatat pencapaian rekor penggunaan tertinggi pada tahun lalu, dengan penambahan kapasitas bersih mencapai hampir 220 gigawatt, meningkat sebesar 35% dibandingkan tahun 2021. Setelah PV surya, energi air menjadi kontributor terbesar berikutnya dalam mencatat pertumbuhan kapasitas energi terbarukan secara global, terutama berkat dimulainya beberapa proyek skala besar, terutama di kawasan Asia [2].

Sumber energi terbarukan, khususnya PV, memiliki potensi besar dalam mengurangi ketergantungan pada penggunaan bahan bakar fosil, yang tidak hanya terbatas tetapi juga menyebabkan emisi karbon yang tinggi. Oleh karena itu, pertumbuhan PV juga mencerminkan upaya global untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dari sektor energi [3]. Pemanfaatan PV

memiliki dampak yang substansial dalam sistem pembangkit hibrida, dan harus mendapatkan perhatian penuh khususnya dalam mengatasi berbagai tantangan yang sering dihadapi, seperti fluktuasi, kompleksitas proteksi, stabilitas serta kontrol [4].

Sistem Pembangkit Listrik Hibrida adalah sistem yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi untuk menghasilkan listrik secara berkelanjutan. Sistem ini umumnya memadukan sumber energi terbarukan (seperti tenaga surya, angin, atau biomassa) dengan sumber energi konvensional (seperti generator berbahan bakar fosil) untuk memaksimalkan efisiensi dan keandalan pasokan listrik [5]. Salah satu tujuan utama sistem pembangkit listrik hibrida adalah untuk mengurangi ketidakpastian pasokan energi. Hal ini dapat dicapai dengan mengintegrasikan sumber energi yang dapat saling melengkapi. Oleh karena itu, penetrasi tinggi pembangkit PV harus dievaluasi dengan baik untuk mencegah kejadian yang tidak diinginkan yang mengarah ke situasi yang kompleks. Lebih penting lagi, untuk menghindari tantangan-tantangan dalam penerapan PV, persyaratan teknis yang layak harus tersedia dalam integrasi sistem PV ke dalam sistem hibrida [6].

Dalam proses mengintegrasikan PV ke dalam sistem energi, terdapat beberapa masalah yang harus diatasi. Satu diantaranya adalah masalah fluktuasi daya yang disebabkan oleh perubahan cuaca dan suhu [7]. Dampak dari fluktuasi daya PV disajikan dalam [8]-[9]. Hal ini mengakibatkan perubahan besar pada daya yang diinjeksikan dari PV surya, yang dapat memiliki konsekuensi besar untuk stabilitas jaringan [10]. Untuk mengurangi masalah tersebut, sistem Penyimpanan Energi Baterai atau *Battery Energy Storage System* (BESS) digunakan untuk berkoordinasi dengan sistem PV. BESS membantu menyalurkan lebih banyak daya yang dapat dikontrol ke dalam jaringan, meningkatkan kualitas daya dan profil frekuensi jaringan, mengurangi kehilangan daya, mengurangi riak arus, dan meningkatkan stabilitas dan efisiensi jaringan [11]. Tinjauan literatur telah menyarankan bahwa karakteristik dari daya PV surya yang dihasilkan dapat ditingkatkan dengan menggabungkan pembangkit PV dengan BESS. Mengintegrasikan BESS memungkinkan untuk mengatur tingkat fluktuasi daya dalam kisaran tertentu dan menghaluskan fluktuasi keluaran daya dalam sistem pembangkit hibrida [12].

Beberapa penelitian telah dilakukan secara aktif untuk mengatasi fluktuasi daya ini dan mengoptimalkan kinerja PV [13]. Upaya ini telah menghasilkan beberapa metode, salah satunya adalah menggunakan strategi perataan daya. Perataan daya adalah pendekatan yang digunakan untuk mengurangi fluktuasi daya PV dan membuat produksi listrik menjadi lebih stabil [14]. Metode perataan daya dari keluaran PV menarik minat penelitian pada sistem penetrasi PV yang tinggi dengan menggunakan BESS [15]. Kombinasi sistem PV dengan BESS dan metode kontrol perataan diperkenalkan untuk meningkatkan kinerja sistem PV dengan menghaluskan keluaran PV [16] serta menurunkan biaya operasional dengan beroperasi pada kondisi optimal [17].

Terdapat beberapa jenis metode perataan yaitu *Moving Average* (MA), *Low Pass Filter* (LPF), dan berbasis algoritma kontrol *Ramp-Rate* (RR) [18]. Namun, metode MA banyak digunakan oleh para peneliti untuk mengurangi masalah fluktuasi daya keluaran PV [19]. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah *moving average* dan sistem pembangkit hibrida terdiri dari PV, baterai, dan mikrohidro. Dengan penerapan metode *moving average*, diharapkan mampu meningkatkan stabilitas dan kualitas daya yang disuplai, yang berdampak positif pada efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik hibrida yang lebih kompleks.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. METODE PERATAAN DAYA

Pada penelitian ini, metode perataan daya (*Power smoothing*) yang digunakan adalah metode *moving average* (MA). Dalam literatur, metode perataan berbasis *moving average*, yang pada dasarnya telah digunakan untuk menganalisis perdagangan saham, secara konvensional diadopsi untuk meratakan data deret waktu dan menghilangkan noises [20].

Moving Average merupakan pendekatan perataan data yang mengestimasi nilai rata-rata dari serangkaian input data yang terletak dalam suatu jendela waktu yang ditentukan (*window size*) [21]. Dalam penelitian ini, data tersebut merupakan daya dari keluaran PV (daya keluaran aktual PV). Persamaan (1) merupakan persamaan dari *moving average* dimana P_{MA} merupakan daya hasil *moving average* [22], P_{PVOUT} merupakan daya keluaran aktual dari PV (daya keluaran PV sebelum penerapan MA), N merupakan jumlah dari *window size*. *Window size* berfungsi untuk mengatur berapa banyak titik data yang dipertimbangkan untuk menghasilkan nilai rata-rata yang diperhalus pada setiap langkahnya. Semakin besar *window size*, semakin banyak data yang dirata-ratakan [23]. Dalam penentuan *window size*, tidak terdapat nilai yang ideal, karena bergantung pada berbagai faktor, termasuk data yang dianalisis, frekuensi pengukuran, dan tingkat perataan (*smoothing*) yang diinginkan [23]. Untuk data input yang diberikan, titik data yang ada di dalam *window size*, N akan bernilai '1' sedangkan titik data yang berada di luar *window size* akan diberi nilai '0' karena nilainya tidak akan dipertimbangkan.

$$P_{MA}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P_{PVOUT}(k-i) \quad (1)$$

Dalam menilai efektivitas proses perataan menggunakan metode *moving average*, parameter *ramp-rate* (RR) yang dijelaskan dalam (2), digunakan untuk membandingkan antara hasil sebelum dan setelah penerapan *moving average*. *ramp-rate* (RR) merupakan tingkat perubahan daya keluaran sebagai respon terhadap fluktuasi radiasi dan dinyatakan sebagai persentase dari daya nominal untuk setiap unit perubahan waktu pada PV [24]. sebagaimana dijelaskan dalam (3). Dalam penelitian ini, batas *ramp-rate* maksimum yang di tentukan adalah 10%/menit.

$$RR(i) = \left| \frac{dP_{PVOUT}}{dt}(i) \right| = \left| \frac{P_{PVOUT}(i) - P_{PVOUT}(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \right| \quad (2)$$

$$RR(\%/min) = \frac{RR(i)}{PV\ Capacity} \times 100\%. \quad (3)$$

Daya perataan (P_{smooth}) yang akan disuplai ke sistem AC adalah penjumlahan dari daya keluaran aktual PV (P_{PVout}) dan daya keluaran baterai (P_{BESS}) yang didefinisikan pada (4):

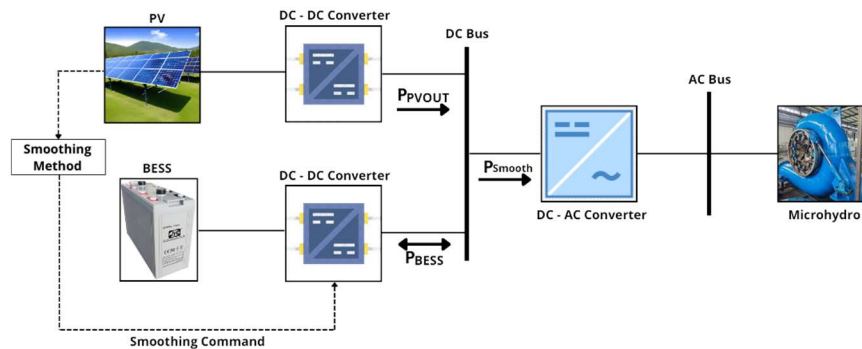
$$P_{smoo} = P_{PVout} + P_{BESS} \quad (4)$$

Perbedaan antara daya hasil dari penerapan *moving average* (P_{MA}) dengan daya keluaran aktual PV (P_{PVout}) merupakan daya referensi dari baterai (P_{BESS_ref}), seperti yang didefinisikan pada (5).

$$P_{BESS_ref} = P_{MA} - P_{PVout} \quad (5)$$

B. TOPOLOGI SISTEM PEMBANGKIT HIBRIDA

Gambaran umum pemodelan sistem pembangkit hibrida ditunjukkan pada Gambar 1. Terdiri atas 3 sistem utama yaitu PV, PLTMH, dan baterai. Sistem pembangkit hibrida dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB Simulink*. Sub-sistem DC terhubung pada bus DC yang terdiri dari sistem PV dan sistem baterai. Pada sistem PV, dan dihubungkan dengan sub-sistem AC sebagai jaringan utama melalui *AC-DC converter* untuk menginjeksikan daya aktual PV yang telah diperhalus ke sub-sistem AC yang terdiri dari sistem PLTMH sebagai sistem pembangkit utama.



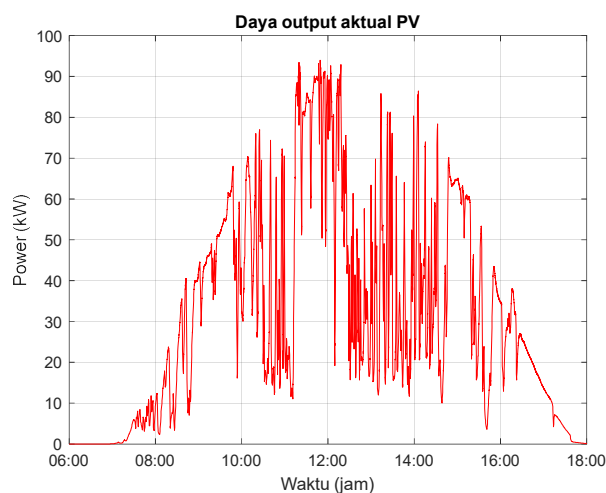
Gambar 1. Topologi sistem pembangkit hibrida dengan metode Moving Average

Modul PV dihubungkan ke konverter DC-DC boost (DC-DC boost converter), yang menggunakan Teknik *Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengontrol perangkat *switching* dalam mengekstrak titik daya maksimum. Keluaran daya yang dihasilkan oleh sistem PV didasarkan pada sifat *stokastik* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Pada sistem baterai, modul baterai dihubungkan dengan Konverter *DC-DC Buck-Boost* dua arah (*Bi-directional DC-DC Buck Boost Converter*) untuk mengatur aliran daya dua arah [25].

Berdasarkan topologi sistem pada gambar 1. Spesifikasi sistem pembangkit hibrida yang dimodelkan adalah sebagai berikut:

TABEL I
SPESIFIKASI SISTEM PEMBANGKIT HIBRIDA

Parameter	Specification
Sistem PV	86 kW
Sistem baterai	538 kWh
Sistem PLTMH	21 kW
DC Bus	800 V
AC Bus	380 V



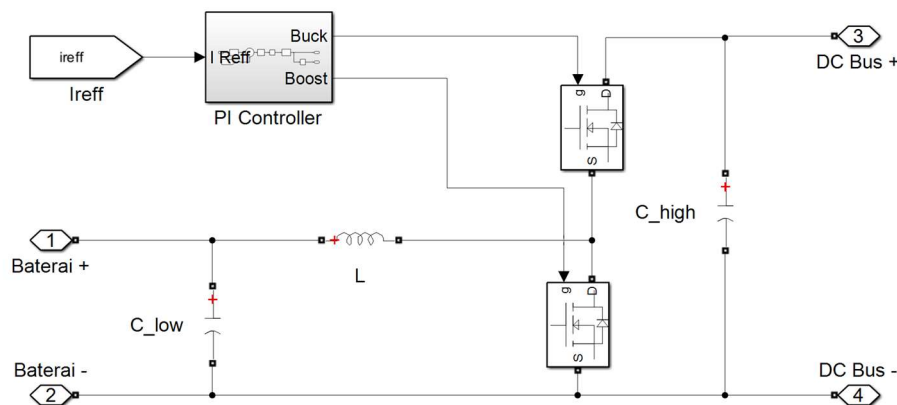
Gambar 2. Daya keluaran aktual PV selama 12 jam

C. SISTEM PENYIMPANAN ENERGI BATERAI

Sistem penyimpanan energi baterai terdiri atas penyimpanan baterai dan *Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter*. Penyimpanan baterai disesuaikan dengan tegangan sistem DC yang digunakan. Dalam penelitian ini, tegangan sistem baterai yang digunakan adalah sebesar 650 V dengan memperhitungkan rentang tegangan sistem pada inverter. *Initial State of Charge (SOC)* diatur pada 60% dengan maksimum SoC 80% dan minimum SoC 20%, hal ini bertujuan agar menjaga umur baterai tetap optimal [26]. Jenis baterai yang digunakan dalam sistem pembangkit hibrida ini adalah jenis *Deep Cycle – VRLA* dengan kapasitas sebesar 1000 Ah dan tegangan nominal 2 V.

Gambar 3. menunjukkan jenis konverter yang digunakan untuk mengontrol aliran daya pada sistem penyimpanan energi baterai yaitu *Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter*. Konverter ini menjadi salah satu komponen penting dalam penerapan Metode *moving average* yang dikontrol dengan menggunakan metode kontrol arus (*PI Controller*).

Dalam desain, *pulse width modulation (PWM)* dihasilkan dengan menggunakan pengontrol PI yang mengontrol arus untuk operasi *buck-boost*. Oleh karena itu, penting bagi pengontrol dalam mengidentifikasi kondisi operasi mode *buck* dan *boost* untuk menghasilkan pulsa yang sesuai ke perangkat saklar. Dalam hal ini, operasi *buck* ditentukan oleh referensi arus positif dan operasi *boost* oleh referensi arus negatif. Perbedaan antara arus referensi dan arus aktual baterai diumpungkan ke pengontrol PI, di mana sinyal error ini diubah menjadi *duty cycle* yang sesuai. Pengontrol PI akan menghasilkan sinyal antara nol dan satu untuk mengontrol pulsa saklar [27].



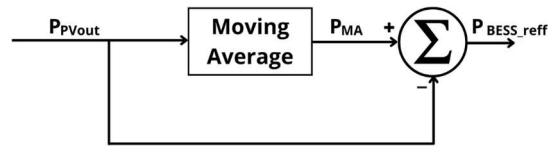
Gambar 3. Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter

TABEL II
SPESIFIKASI BATERAI DAN BIDIRECTIONAL DC-DC BUCK-BOOST CONVERTER

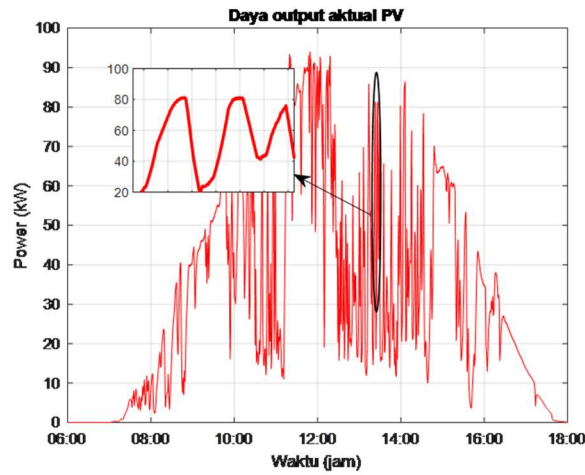
<i>Parameter</i>	<i>Specification</i>
<i>Baterai</i>	
Tipe Baterai	Deep Cycle – VRLA (JYC)
Sistem baterai	12 V
Kapasitas	1000 Ah
Arus Pelepasan Maksimum	4000 A (5s)
<i>Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter</i>	
Low Capacitance	0.166 mF
High Capacitance	1000 μF
Inductance (L)	0.0798 mH

D. IMPLEMENTASI METODE MOVING AVERAGE

Implementasi dari metode *moving average* ditunjukkan pada gambar 4. yang menggambarkan cara kerja *moving average*. Pada Gambar 4. Blok *moving average* berfungsi menghitung rata-rata dari sejumlah nilai data dalam rentang waktu tertentu atau dalam jumlah titik data tertentu berdasarkan pada (1). Input yang terhubung dengan blok *moving average* menunjukkan serangkaian nilai data yang akan dihitung rata-ratanya yaitu berupa data daya keluaran aktual PV (P_{PVout}) sedangkan keluaran dari blok menunjukkan hasil keluaran dari proses *moving average*, yaitu nilai rata-rata yang dihasilkan dari data yang masuk. P_{BESS_reff} menunjukkan selisih antara daya hasil perataan (P_{MA}) dan daya keluaran aktual PV (P_{PVout}) berdasarkan pada (5).



Gambar 4. Implementasi Moving Average



Gambar 5. Sampel penelitian berdasarkan daya output aktual PV

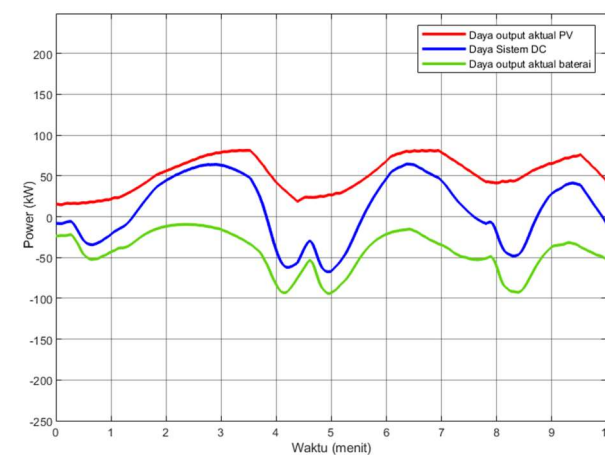
Simulasi penerapan *moving average* dilakukan dengan input irradiansi bersifat *intermitten* dengan variabilitas tinggi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Untuk menghasilkan keluaran daya yang stabil, maka nilai dari *window size* sangat mempengaruhi. Nilai *window size* yang digunakan dalam simulasi ini dapat bervariasi sesuai kebutuhan dan karakteristik fluktuasi daya yang hendak dihaluskan, sehingga angka tersebut dapat disesuaikan guna mencapai tingkat perataan daya yang diinginkan. Dengan mengacu pada daya keluaran PV yang optimal, nilai *window size* yang digunakan yaitu 50 dan 150.

Gambar 5. menunjukkan sampel daya aktual dari keluaran PV. Hasil keluaran tersebut menunjukkan fluktuasi daya yang dipengaruhi oleh Input irradiansi. Berdasarkan daya keluaran aktual dari PV, penelitian ini menggunakan sampel data sebanyak 10 data, yang diambil dengan interval satu menit. Rentang waktu pengambilan sampel dimulai dari menit ke-439 hingga menit ke-449 dalam ukuran 840 data dari daya keluaran aktual PV. Seleksi sampel dilakukan dengan mempertimbangkan fluktuasi dan variasi nilai keluaran daya aktif sistem PV yang berubah-ubah pada setiap detik.

III. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

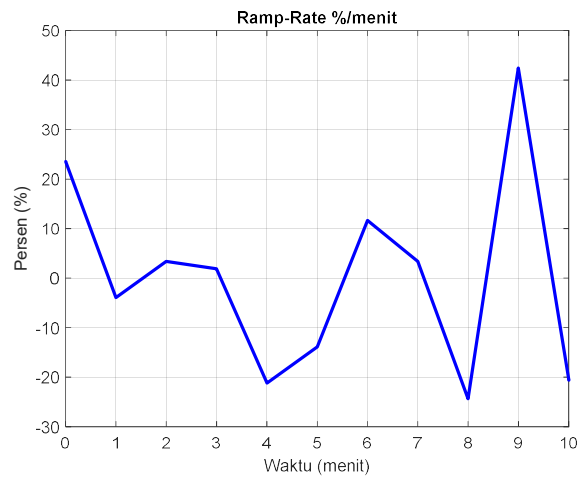
A. DAYA BUS DC SEBELUM PENERAPAN MOVING AVERAGE

Gambar 6 menunjukkan daya keluaran aktual PV dan daya sistem DC (daya pada bus DC) sebelum penerapan metode *moving average*. Fluktuasi yang tinggi dari daya PV mengakibatkan ketidakstabilan pada daya sistem DC. Garis merah menunjukkan daya keluaran aktual PV, garis biru menunjukkan daya pada bus DC yang akan disuplai ke sistem AC, dan garis hijau menunjukkan daya aktual baterai. Pada beberapa rentang waktu seperti menit ke 0-1, menit ke 3-5, menit ke 8-9, daya pada bus DC berada di bawah 0, artinya suplai daya ke sistem AC belum terpenuhi akibat fluktuasi daya pada PV. Daya pada bus DC cenderung mengikuti pola dari daya PV. Daya baterai juga berada dalam posisi pengisian atau menyerap daya (dibawah 0) sehingga tidak memberikan pengaruh terhadap daya pada bus DC.



Gambar 6. Daya output PV dan daya pada bus DC sebelum penerapan MA

Tingkat fluktuasi daya PV tersebut juga ditunjukkan dengan nilai *ramp-rate* di atas 10% pada gambar 7. Nilai *ramp-rate* maksimum yaitu 42.42 %/menit.

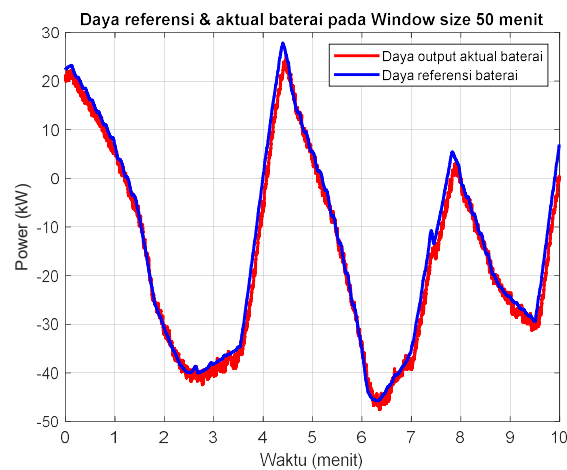


Gambar 7. Nilai Ramp-rate sebelum penerapan MA.

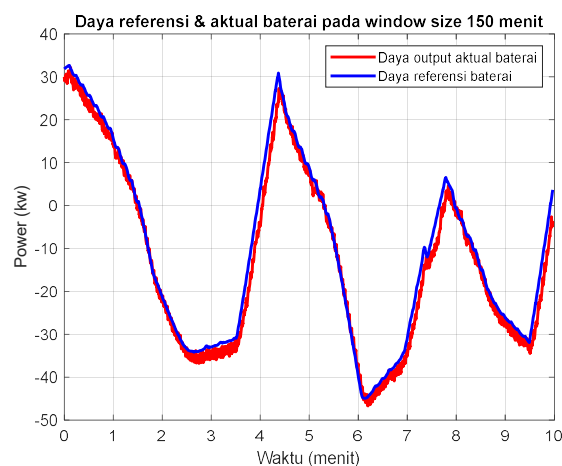
B. DAYA KELUARAN AKTUAL BATERAI SETELAH PENERAPAN MOVING AVERAGE

Gambar 8. merupakan perbandingan antara daya referensi dan daya aktual baterai setelah penerapan MA dengan *window size* 50. Garis biru menunjukkan daya referensi baterai sedangkan garis merah menunjukkan daya aktual baterai. Gambar 9. merupakan perbandingan antara daya referensi dan daya aktual baterai setelah penerapan MA dengan *window size* 150. Garis biru menunjukkan daya referensi baterai sedangkan garis merah menunjukkan daya keluaran aktual baterai.

Daya referensi baterai (P_{BESS_ref}) merupakan Perbedaan antara daya hasil dari penerapan *moving average* (P_{MA}) dengan daya aktual PV (P_{PVout}). Semakin tinggi tingkat kesamaan antara P_{BESS_ref} dan P_{BESS} maka akan semakin kecil sinyal eror pada pengontrol PI.

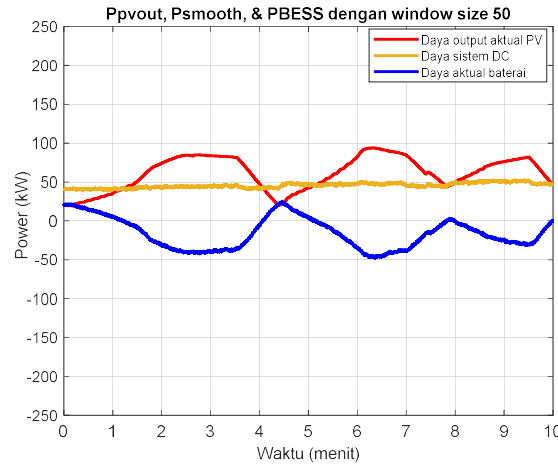


Gambar 8. Perbandingan daya referensi dan daya aktual baterai setelah penerapan MA dengan window size 50

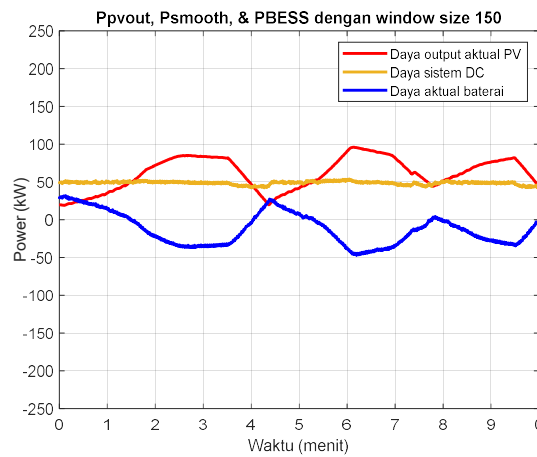


Gambar 9. Perbandingan daya referensi dan daya aktual baterai setelah penerapan MA dengan window size 150

C. **DAYA PADA BUS DC SETELAH PENERAPAN MOVING AVERAGE**

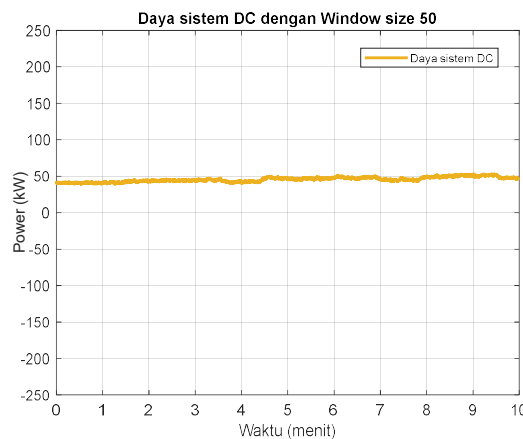


Gambar 10. Perbandingan Daya Output Aktual PV, Daya Bus DC, dan Daya Aktual Baterai dengan Window Size 50

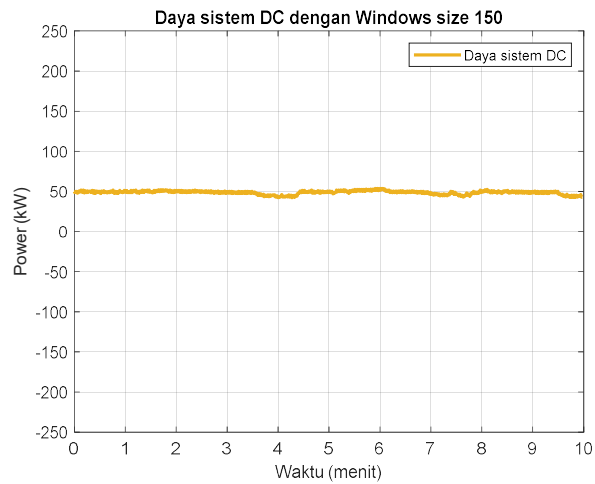


Gambar 11. Perbandingan Daya Keluaran Aktual PV, Daya Bus DC, dan Daya Aktual Baterai dengan Window Size 150

Dari hasil simulasi dengan penerapan MA menunjukkan bahwa fluktuasi daya semakin menurun secara signifikan jika dibandingkan dengan sebelum penerapan MA. Daya pada bus DC juga cenderung lebih rata. Penerapan nilai *window size* juga memiliki dampak terhadap tingkat kestabilan daya. Pada Gambar 10 dan gambar 11, garis merah menunjukkan daya keluaran aktual PV (P_{PVout}) atau daya keluaran PV sebelum penerapan MA, garis kuning menunjukkan daya perataan (P_{smooth}) dan garis biru menunjukkan daya keluaran aktual baterai (P_{BESS}). Daya pada bus DC mewakili P_{smooth} yang merupakan penjumlahan antara P_{PVout} dan P_{BESS} berdasarkan persamaan 4. Jika dilihat pada gambar 12. Dengan penerapan *window size* 50, daya pada bus DC berada pada kisaran 40 kW kemudian mengalami perubahan ke 50 kW. Sedangkan pada gambar 13, dengan penerapan *window size* 150 kW, kurva daya menjadi rata pada 50 kW walaupun mengalami penurunan pada menit ke 3.5 hingga 4.5, karena terjadi penurunan daya PV yang signifikan. Dengan penambahan nilai dari *window size* yaitu 150, maka daya pada bus DC cenderung lebih rata dibandingkan dengan nilai *window size* 50.

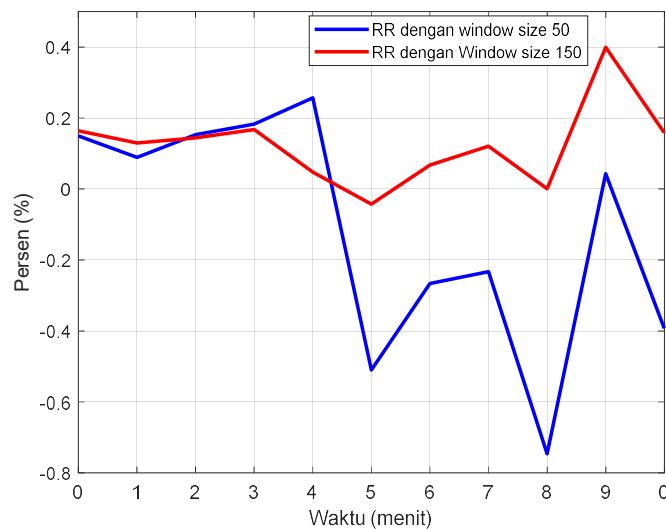


Gambar 12. Daya pada Bus DC dengan Window Size 50



Gambar 13. Daya pada Bus DC dengan Window Size 150

Nilai *ramp-rate* pada gambar 14 juga menunjukkan penurunan yang signifikan. Pada penerapan *window size* 50, nilai *ramp-rate* maksimum adalah 0.26%/menit dan *ramp-rate* minimum adalah -0.75%/menit, sedangkan pada penerapan *window size* 150, nilai *ramp-rate* maksimum adalah 0.4%/menit dan *ramp-rate* minimum adalah -0.043%/menit.



Gambar 14. Perbandingan Nilai Ramp-Rate Window Size 50 dan 100

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi membuktikan bahwa metode *moving average* efektif dalam mengurangi fluktuasi daya keluaran PV secara signifikan, memberikan stabilitas yang diperlukan pada bus DC. Penggunaan *window size* yang lebih besar meningkatkan efektivitas metode ini dalam meredam fluktuasi, menurunkan *ramp-rate*, dan menghasilkan daya yang lebih halus. Efektivitas metode ini sangat bergantung pada koordinasi yang baik antara baterai, konverter, dan sistem kontrol. Integrasi komponen-komponen ini memastikan bahwa metode *moving average* tidak hanya mengatasi variabilitas daya PV tetapi juga memaksimalkan stabilitas sistem hibrida secara keseluruhan..

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa dalam naskah penelitian ini, tidak terdapat konflik kepentingan dengan pihak manapun terkait data yang dipublikasikan. Apabila di kemudian ditemukan adanya konflik kepentingan, maka penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas hal tersebut.

REFERENSI

- [1] Ahdiat, Adi, "Ini Pertumbuhan Energi Terbarukan di Indonesia sampai 2021," Katadata. Diakses: 15 November 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/27/pembangkit-energi-terbarukan-indonesia-didominasi-tenaga-air>
- [2] I. International Energy Agency, "Renewable Energy Market Update - June 2023," 2023. [Daring]. Tersedia pada: www.iea.org/t&c/
- [3] J. L. Holechek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, dan R. Valdez, "A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 8, Apr 2022, doi: 10.3390/su14084792.
- [4] K. Basaran, N. S. Cetin, dan S. Borekci, "Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 5, hlm. 642-649, Apr 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0545.

- [5] M. Kastela, B. Widodo, dan R. Purba, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTS Dan PLTMH-GRID) Di Desa Tiworiwu I Dan Desa Bea Pawe, Kabupaten Ngada, Nusa Tenggara Timur (NTT) 1," *Jurnal Ilmiah Program Studi Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, 2023.
- [6] J. Jiang *dkk.*, "Hybrid generation of renewables increases the energy system's robustness in a changing climate," *J Clean Prod*, vol. 324, Nov 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129205.
- [7] M. Mustafa, G. Anandhakumar, A. A. Jacob, N. P. Singh, S. Asha, dan S. A. Jayadhas, "Hybrid Renewable Power Generation for Modeling and Controlling the Battery Storage Photovoltaic System," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9491808.
- [8] Y. Wang, V. Silva, dan M. Lopez-Botet-zulueta, "Impact of high penetration of variable renewable generation on frequency dynamics in the continental Europe interconnected system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 1, hlm. 10-16, Jan 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0141.
- [9] P. G. Bueno, J. C. Hernández, dan F. J. Ruiz-Rodríguez, "Stability assessment for transmission systems with large utility-scale photovoltaic units," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 5, hlm. 584-597, Mei 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0331.
- [10] M. B. Hossain, M. R. Islam, K. M. Muttaqi, D. Sutanto, dan A. P. Agalgaonkar, "A Novel Strategy for Fast Fluctuations Compensation of PV Powered Grid-Interactive Microgrid," dalam *2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies, GlobConET 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, hlm. 810-816. doi: 10.1109/GlobConET53749.2022.9872366.
- [11] L. Deotti, W. Guedes, B. Dias, dan T. Soares, "Technical and economic analysis of battery storage for residential solar photovoltaic systems in the Brazilian regulatory context," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 24, Des 2020, doi: 10.3390/en13246517.
- [12] X. Li, D. Hui, dan X. Lai, "Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 4, no. 2, hlm. 464-473, 2013, doi: 10.1109/TSTE.2013.2247428.
- [13] Y. Zhang, S. Shi, Q. Yang, C. Fang, Q. Xu, dan Y. Wang, "Design of output fluctuation smoothing strategy in photovoltaic power station," dalam *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Okt 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202019403021.
- [14] N. S. Jayalakshmi, D. N. Gaonkar, R. P. Karthik, dan P. Prasanna, "Intermittent power smoothing control for grid connected hybrid wind/PV system using battery-EDLC storage devices," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 69, no. 2, hlm. 433-453, 2020, doi: 10.24425/ae.2020.133036.
- [15] E. Pantaleon dan D. Sal Y Rosas, "Grid-connected photovoltaic system with power smoothing," dalam *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Feb 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2180/1/012007.
- [16] H. A. Li dan R. H. G. Tan, "Performance Evaluation of BESS Moving Average Control for 1MW PV Plant," dalam *3rd IEEE International Virtual Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/i-PACT52855.2021.9696827.
- [17] M. A. Syed, A. A. Abdalla, A. Al-Hamdi, dan M. Khalid, "Double Moving Average Methodology for Smoothing of Solar Power Fluctuations with Battery Energy Storage," dalam *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, Perth: IEEE, Mar 2021, hlm. 291-296.
- [18] A. Atif dan M. Khalid, "Savitzky-Golay Filtering for Solar Power Smoothing and Ramp Rate Reduction Based on Controlled Battery Energy Storage," *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 33806-33817, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973036.
- [19] R. Kini, D. Raker, T. Stuart, R. Ellingson, M. Heben, dan R. Khanna, "Mitigation of PV Variability Using Adaptive Moving Average Control," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 4, hlm. 2252-2262, Okt 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2953643.
- [20] P. J. KAUFMAN, *Trading Systems and Methods*, 5 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] A. L. Pinheiro, F. O. Ramos, M. M. B. Neto, R. N. Lima, L. G. S. Bezerra, dan A. Washington, "A review and comparison of smoothing methods for solar photovoltaic power fluctuation using battery energy storage systems," dalam *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep 2021. doi: 10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543078.
- [22] R. I. Yuskar, T. D. Rachmildha, dan D. Hamdani, "The Implementation of Moving Average to Reduce the Photovoltaic System Active Power Fluctuations," dalam *Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, hlm. 636-641. doi: 10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257431.
- [23] K. Shibata dan T. Amemiya, "How to Decide Window-Sizes of Smoothing Methods: A Goodness of Fit Criterion for Smoothing Oscillation Data," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E102-C, hlm. 143-146, Feb 2019, doi: 10.1587/transele.2018OMS0003.
- [24] J. Martins, S. Spataru, D. Sera, D. I. Stroe, dan A. Lashab, "Comparative study of ramp-rate control algorithms for PV with energy storage systems," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/en12071342.
- [25] C. Jamroen, E. Usaratniwart, dan S. Sirisukprasert, "PV power smoothing strategy based on HELES using energy storage system application: A simulation analysis in microgrids," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 13, hlm. 2298-2308, Okt 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6165.
- [26] Yosua Sahat Halomoan, "Perancangan, Pemodelan dan Analisis Sistem Off-Grid Hibrida PV-Baterai-Genset Untuk Beban Komunal Dan Beban Administratif Menggunakan Strategi Kontrol Load Following Di Desa Tomor, Asmat, Papua," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2020.
- [27] S. G. Solanki, V. K. Ramachandaramurthy, N. Y. K. Shing, R. H. G. Tan, M. Tariq, dan S. B. Thanikanti, "Power smoothing techniques to mitigate solar intermittency," dalam *Proceedings - 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov 2019. doi: 10.1109/UPCON47278.2019.8980080.