

Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) untuk Optimasi Beban Puncak: Solusi Cerdas Efisiensi Energi Industri

Sofyan Sofyan*^{1,2}, Ng Rong Wee², Umar Muhammad³, Herra Ramdani Hakim¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang

²Fakulti Kejuruteraan Elektrik (FKE), Universiti Teknologi Malaysia

³Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Bosowa

Jl. Perintis kemerdekaan Km.10 Tamalanrea, 90234, Makassar, Indonesia

Jalan Pontian Lama, Taman Universiti, 81300 Skudai, Johor Darul Ta'zim, Malaysia

Jl. Kapasa Raya no. 23 Tamalanrea Makassar

*Email: sofyantato@poliupg.ac.id, ngrongwee@graduate.utm.my

umar.muhammad@politeknikbosowa.ac.id, herra.hakim25@gmail.com

DOI:

Abstrak

Battery Energy storage system (BESS) telah muncul sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi energi pada sektor komersial dan industri, khususnya melalui implementasi metode Peak Shaving. Teknologi ini memungkinkan penyimpanan energi selama periode permintaan rendah dan pemanfaatannya selama permintaan puncak, sehingga mengurangi beban pada jaringan listrik. Penelitian ini mengeksplorasi integrasi BESS dalam mengelola beban listrik untuk menurunkan konsumsi energi puncak sambil meningkatkan efisiensi operasional dan stabilitas sistem tenaga. Dengan memanfaatkan data profil beban harian dan parameter BESS, sistem dikembangkan untuk mengatur proses pengisian dan pengosongan guna mencapai keseimbangan energi yang optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa implementasi BESS dapat mengurangi beban puncak hingga 50%, mendistribusikan energi lebih merata sepanjang hari, dan meningkatkan keandalan serta efisiensi jaringan listrik. Teknologi ini juga menawarkan manfaat lingkungan dengan mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil dan mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan.

Kata Kunci: Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS), Peak Shaving, efisiensi energi, manajemen beban, sektor industri, energi berkelanjutan

Abstract

Battery Energy Storage Systems (BESS) have emerged as an innovative solution to enhance energy efficiency in commercial and industrial sectors, particularly through the implementation of peak shaving methods. This technology enables energy storage during periods of low demand and its utilization during peak demand, thereby reducing the load on the power grid. This study explores the integration of BESS in managing electrical loads to lower peak energy consumption while improving operational efficiency and power system stability. By utilizing daily load profile data and BESS parameters, a system is developed to regulate charging and discharging processes to achieve optimal energy balance. Simulation results indicate that BESS implementation can reduce peak loads by up to 50%, distribute energy more evenly throughout the day, and enhance the reliability and efficiency of the power grid. This technology also offers environmental benefits by reducing dependence on fossil fuel-based power plants and supporting the transition toward a more sustainable energy system.

1. Pendahuluan

Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) telah muncul sebagai teknologi penting dalam upaya mencapai efisiensi energi dan keberlanjutan. Sistem ini menyimpan energi selama periode permintaan rendah dan melepaskannya selama waktu konsumsi puncak, sehingga mengurangi beban pada jaringan listrik [1]. Metode Peak Shaving sangat bermanfaat bagi pengguna komersial dan industri dalam mengurangi permintaan energi beban puncak [2]. Dengan mengimplementasikan BESS, sektor-

sektor ini dapat mencapai penghematan biaya yang signifikan dan meningkatkan efisiensi operasional mereka [3].

Dalam dunia industri, pengoperasian mesin seringkali menyebabkan fluktuasi besar dalam permintaan daya. Lonjakan ini dapat mengakibatkan penggunaan dan biaya energi listrik yang lebih besar [2]. BESS dapat mengatasi masalah ini dengan menyediakan pasokan energi yang stabil selama periode puncak, memastikan bahwa mesin beroperasi dengan lancar tanpa menyebabkan lonjakan beban mendadak. Selain itu, hal ini tidak hanya

Commented [1]: BESS tidak usah berulang dituliskan singkatan dari apa. akronim ini sdh disebutkan di bagian pendahuluan.
- Literatur yang digunakan sebaiknya 5 tahun terakhir
- Artikel belum menunjukkan kontribusi yang cukup signifikan terhadap bidang ilmu yang dibahas.
Disarankan menekankan kebaruan atau novelty dari penelitian/artikel ini.

mengurangi biaya energi tetapi juga memperpanjang umur peralatan dengan mencegah beban berlebih [1].

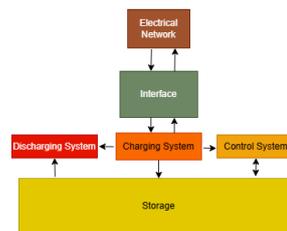
Integrasi BESS dengan metode Peak Shaving juga memiliki manfaat lingkungan yang signifikan. Dengan mengurangi ketergantungan pada pembangkitan listrik berbahan bakar fosil selama periode permintaan puncak [4], BESS dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca [1, 5]. Selain itu, integrasi sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, dengan BESS dapat lebih meningkatkan keberlanjutan sistem energi [6]. Ketika dunia bergerak menuju masa depan yang lebih hijau, peran BESS dalam mencapai efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan tidak dapat diabaikan.

Dengan demikian, implementasi BESS pada sektor komersial dan industri tidak hanya menawarkan solusi untuk mengelola permintaan energi puncak tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Dengan mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional dan memanfaatkan energi terbarukan, BESS dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih hijau dan efisien. Oleh karena itu, penelitian dan investasi lebih lanjut dalam teknologi BESS sangat penting untuk mencapai tujuan efisiensi energi dan keberlanjutan global.

Penerapan sistem penyimpanan energi (ESS) telah diidentifikasi sebagai solusi yang mungkin untuk mengkompensasi tantangan yang dihadapi oleh sistem tenaga listrik modern. ESS sangat dibutuhkan oleh industri pembangkit listrik konvensional, sumber energi terdistribusi (DER), dan sistem pasokan energi terbarukan yang intermiten karena dapat menawarkan dukungan tambahan dan fleksibilitas yang diperlukan kepada mereka. Penyimpanan energi tidak hanya berarti sumber energi tetapi juga memberikan manfaat tambahan dalam meningkatkan keandalan, stabilitas, dan kualitas pasokan daya [7].

Sistem ini cocok untuk aplikasi skala besar (GW), menengah (MW), atau mikro (kW) dari sistem tenaga listrik, tergantung pada tugas dan kebutuhan. Mereka dapat digunakan untuk keseimbangan permintaan daya, arbitrase energi, dan cadangan di sisi pembangkitan; untuk penundaan investasi dan regulasi frekuensi di

tingkat transmisi; untuk dukungan kapasitas jaringan dan kontrol tegangan di sisi distribusi; dan untuk manajemen biaya dan Peak Shaving di sisi pelanggan. Dengan demikian, ESS merupakan komponen yang diperlukan dan memainkan peran kunci dalam mengurangi berbagai tantangan operasional yang dihadapi oleh sistem tenaga listrik modern.



Gambar 1. Komponen Utama ESS

Gambar 1 menunjukkan Peluang dan Tantangan Penyimpanan Energi sebagai berikut: Media Penyimpanan, yang menyediakan sarana untuk menyimpan energi untuk digunakan kemudian; seperti baterai, *Pumped hydro energy Storage System* (PHES), *flywheel energy storage system* (FESS), *capacitive/super-capacitive energy storage* (CES/SCES), *Thermal energy Storage* (TES), *compressed air energy storage* (CAES), dan *superconducting magnetic energy storage* (SMES). Blok system kontrol, yang mengelola fungsi seluruh sistem penyimpanan energi dan bertindak sebagai otak ESS. Sementara unit pengisian memfasilitasi aliran energi dari sistem listrik ke media penyimpanan energi. Unit Pengosongan, yang memungkinkan aliran energi tersimpan dari media penyimpanan ke beban ketika diperlukan.

ESS adalah metode dan teknologi yang digunakan untuk menyimpan energi listrik. ESS membantu dalam menjaga kualitas daya, permintaan beban, stabilitas jaringan, pengurangan rugi-rugi, regulasi tegangan dan frekuensi, peningkatan efisiensi energi, pengurangan penggunaan bahan bakar fosil, dan melindungi lingkungan dari emisi gas rumah kaca dan pemanasan global [8, 9].

Pengembangan energi terbarukan seperti surya, angin, dan baterai telah diidentifikasi sebagai solusi. Namun, solusi ini tidak dapat diterapkan secara global, karena tidak semua tempat di dunia memiliki sinar matahari yang cukup untuk waktu dan intensitas yang memadai untuk memenuhi kebutuhan rumah, industri, atau

kota. Energi yang dihasilkan oleh sumber-sumber terbarukan dan tidak mencemari ini didistribusikan oleh jaringan secara real time [10].

Penting untuk memiliki penyimpanan karena pembangkitan energi seperti energi surya dan angin bersifat intermiten. Selama bertahun-tahun, industri telah menggunakan teknologi penyimpanan dalam peralatan elektronik, kendaraan, dan turbin. Beberapa alternatif telah dikembangkan yang meliputi baterai asam timbal dan baterai lithium-ion dan berkontribusi pada stabilisasi sistem pasokan energi [11].

Sistem penyimpanan energi listrik memberikan fleksibilitas yang lebih besar, terutama untuk industri, tetapi juga sangat diinginkan oleh konsumen non-industri, karena melalui penyimpanan dimungkinkan untuk mengurangi biaya akhir layanan. Dengan kata lain, agar penyimpanan menjadi layak dalam aplikasi di rumah, perusahaan, dan industri, perlu untuk memasukkan kebijakan yang ditujukan untuk mengurangi biaya sistem penyimpanan dan pemilihan nilai tarif yang tepat [12, 13].

Selain itu, dapat juga meratakan kurva beban harian, mengurangi permintaan Peak Shaving, dan lain-lain. Semua karakteristik ini membuat kombinasi energi bersih dan terbarukan dengan teknik penyimpanan energi menjadi yang paling kompetitif dalam hal penjualan dan implementasi [14].

Baterai adalah perangkat penyimpanan energi yang digunakan untuk emulasi inersia untuk menawarkan inersia dalam sistem tenaga dengan pangsa besar sumber energi terbarukan (RES). Mekanisme kontrol terkoordinasi dengan BESS meningkatkan stabilitas frekuensi jaringan sistem. Baterai lithium-ion umumnya digunakan dalam sistem tenaga inersia rendah yang membantu dalam meningkatkan stabilitas frekuensi. Metode kontrol regulasi frekuensi dan tegangan dalam sistem PV dengan baterai lithium-ion disajikan dalam [15].

Baterai mengalami masalah waktu pengisian yang lama dan kebutuhan satu sumber tambahan untuk pengisian, meningkatkan kompleksitas dan biayanya. Kombinasi pembangkit listrik berbasis angin/surya dengan BESS ini dapat digantikan dengan sel bahan bakar karena perangkat tunggal ini terbarukan, tidak memerlukan infrastruktur tambahan untuk pengisian dan memiliki kemampuan untuk menyimpan [16]. Ini

mengubah energi kimia menjadi energi listrik surplus untuk memenuhi permintaan pasokan daya. Selain itu, tidak memiliki bagian yang berputar, menghasilkan perawatan yang lebih sedikit dan hampir tanpa kebisingan dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis energi angin, khususnya [17, 18].

Selain keuntungan yang disebutkan di atas, sel bahan bakar berkelanjutan, fleksibel bahan bakar, emisi karbon rendah, dan murah. Akibatnya mereka secara bertahap muncul sebagai alternatif yang sangat baik dalam sistem tenaga serta dalam aplikasi domestik dan industri lainnya [19, 20]. Baterai Lithium-ion (Li-ion) dan baterai aliran redoks (RFB) tersedia di pasar sebagai teknologi saingan untuk digunakan sebagai penyimpanan cadangan dalam sistem tenaga modern. Status muatan baterai pada waktu tertentu dalam setahun harus memenuhi persyaratan persamaan berikut:

$$P_{Es,t} \geq \text{Max} |P_{L,t} - (P_{WG,t}, P_{PV,t})| \quad (1)$$

Peringkat daya baterai dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

$$P_{bat}^{max} = \frac{N_{bat} V_{bat} I_{bat}}{1000} \quad (2)$$

Pencukuran permintaan beban puncak (Peak Shaving) adalah aplikasi paling penting dari BESS. BESS diisi selama konsumsi daya rendah, harga listrik lebih rendah, dan pembangkitan daya terbarukan berlebih. Energi yang disimpan dalam BESS dikirim untuk memenuhi permintaan beban puncak untuk meredakan kemacetan dalam jaringan. Permintaan energi dan permintaan beban puncak tumbuh dengan cepat dan integrasi energi terbarukan juga meningkat sesuai dengan itu.

Beban yang dapat dikontrol dalam mikro-grid dapat berpartisipasi dalam respons permintaan, yang dapat berkontribusi pada Peak Shaving selama masa permintaan puncak dengan mengurangi konsumsi mereka sendiri melalui pelepasan beban non-kritis dan mengirimkan lebih banyak daya ke utilitas jaringan utama. Mikro-grid dapat menurunkan kerugian sistem distribusi keseluruhan dan manajemen tegangan dengan mengimplementasikan pembangkitan terdistribusi yang terletak di lokasi permintaan, menghilangkan kebutuhan untuk saluran transmisi dan menunda pembangunan saluran transmisi baru ke waktu yang lebih lanjut. Oleh karena itu, pendapatan yang cukup besar dapat

dihasilkan untuk operator jaringan MG dengan RES dan BESS [21, 22].

2. Metode

Metode Peak Shaving dengan Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) bertujuan untuk mengurangi konsumsi daya puncak dalam jaringan listrik. BESS menyimpan energi ketika permintaan rendah dan menggunakannya ketika permintaan meningkat, sehingga mengurangi beban jaringan. Manajemen daya ini dimulai dengan pengumpulan data, termasuk profil beban harian dan parameter BESS seperti kapasitas penyimpanan dan batas Status Muatan/State of Charge (SoC) minimum. Data ini digunakan untuk mengatur waktu penyimpanan dan pelepasan daya untuk mengoptimalkan konsumsi energi.

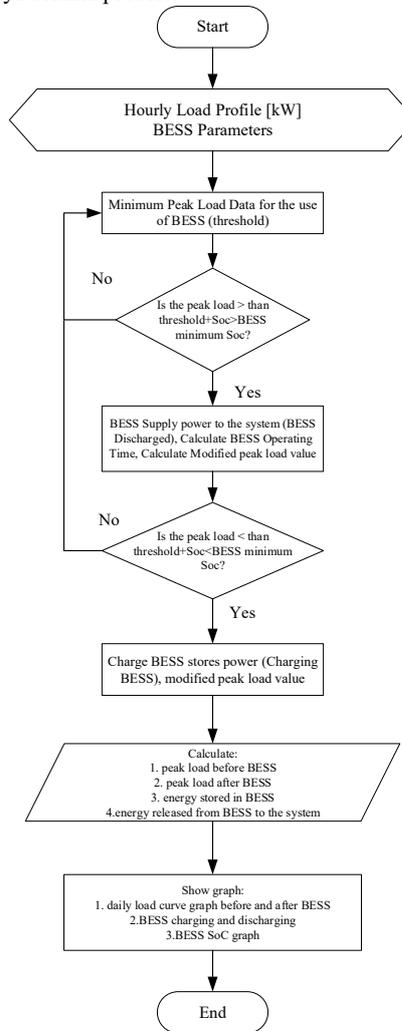
Setelah data dikumpulkan, sistem menerima input berupa ambang batas beban puncak (*Peak load Threshold*). Jika beban melebihi ambang batas dan SoC BESS mencukupi, BESS akan melakukan pengosongan untuk mengurangi beban puncak. Jika beban masih dalam batas aman atau SoC tidak mencukupi, sistem terus berjalan tanpa intervensi. Selain itu, sistem juga menghitung waktu operasi BESS dan menyesuaikan beban puncak setelah pengosongan (*discharged*) dilakukan.

Setelah pengosongan, sistem mengevaluasi kembali beban dan SoC BESS. Jika beban di bawah ambang batas dan kapasitas BESS memungkinkan, sistem mengaktifkan mode pengisian menggunakan energi dari sumber terbarukan atau jaringan. Sistem juga menyesuaikan nilai beban puncak setelah proses pengisian.

Sistem menghitung efisiensi dengan membandingkan beban puncak sebelum dan sesudah penggunaan BESS. Selain itu, total energi yang disimpan dan dilepaskan dihitung untuk mengevaluasi efektivitas BESS dalam mengurangi beban puncak.

Setelah semua perhitungan selesai, hasilnya divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memberikan gambaran yang lebih jelas tentang kinerja BESS dalam sistem. Grafik yang ditampilkan meliputi kurva beban harian sebelum dan sesudah penggunaan BESS, grafik yang menunjukkan proses pengisian dan pengosongan BESS, dan grafik SoC BESS yang

menunjukkan perubahan kapasitas penyimpanan daya selama proses.



Gambar 2. Diagram Alir Peak Shaving

Pemrosesan data dengan variabel Ambang Batas Puncak dalam sistem BESS bertujuan pada optimasi energi dan Peak Shaving. Proses dimulai dengan analisis data profil beban harian untuk menentukan pola konsumsi dan menetapkan nilai ambang batas puncak sesuai dengan tujuan manajemen beban. Selanjutnya, simulasi penggunaan BESS untuk mengurangi beban puncak dan menghitung energi yang

disimpan dan dilepaskan dilakukan. Hasil simulasi kemudian dievaluasi dengan membandingkan beban sebelum dan sesudah BESS untuk menilai efektivitas pengurangan beban puncak dan meningkatkan efisiensi sistem energi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Beban Sebelum dan Sesudah Intergrasi BESS

Tabel 1 menunjukkan pola konsumsi listrik sepanjang hari, dengan beban yang bervariasi tergantung pada waktu hari dan aktivitas yang berlangsung.

Tabel 1. Data Load Profile System Uji

Waktu [Jam Ke:]	Beban Sistem [kW]
1	80
2	100
3	120
4	140
5	160
6	180
7	500
8	600
9	700
10	750
11	800
12	700
13	600
14	400
15	300
16	200
17	180
18	160
19	140
20	120
21	100
22	90
23	80
24	70

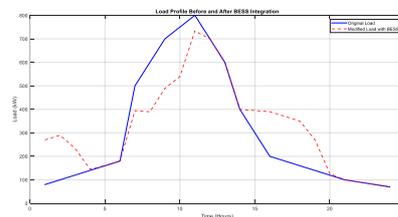
Total konsumsi energi dalam 24 jam mencapai 7270 kW, dengan beban puncak tertinggi 800 kW pada pukul 11:00. Untuk mengurangi tekanan pada sistem, dilakukan pengurangan beban puncak sebesar 50%, sehingga beban pada pukul 11:00 turun menjadi 400 kW.

Dengan implementasi BESS, beban dapat didistribusikan lebih merata sepanjang hari. Simulasi menunjukkan perbedaan antara profil beban sebelum dan sesudah penggunaan BESS, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Akibatnya, sistem menjadi lebih stabil dan efisien, mengurangi lonjakan daya selama beban puncak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Gambar 3.1 menunjukkan grafik profil beban sebelum dan sesudah integrasi BESS ke dalam sistem listrik. Sumbu horizontal mewakili waktu dalam jam, mencakup periode 24 jam, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan beban dalam kilowatt (kW). Terdapat dua kurva dalam grafik: garis biru mewakili beban asli tanpa BESS, sedangkan garis putus-putus merah menunjukkan beban yang dimodifikasi dengan BESS.

Dari grafik, terlihat jelas bahwa tanpa BESS, sistem mengalami beban puncak yang signifikan selama siang hari, dengan nilai maksimum sekitar tengah hari, mencapai hampir 800 kW. Namun, setelah implementasi BESS, puncak ini berkurang secara signifikan, menunjukkan bahwa sistem penyimpanan energi berfungsi dengan menyerap energi ketika beban rendah (seperti selama malam hari) dan melepaskannya ketika beban tinggi (selama siang hari). Proses ini membantu meratakan distribusi beban, mengurangi permintaan puncak, dan meningkatkan efisiensi sistem.

Secara keseluruhan, integrasi BESS berkontribusi pada perataan beban, yang tidak hanya mengurangi beban puncak tetapi juga meningkatkan stabilitas dan keandalan jaringan listrik. Dengan profil beban yang lebih seimbang, sistem dapat beroperasi lebih efisien, mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik konvensional, menurunkan biaya operasional, dan meminimalkan risiko gangguan akibat lonjakan permintaan daya yang berlebihan.



Gambar 3.1 Kurva profil beban sebelum dan sesudah integrasi BESS

Commented [2]: Cukup disebutkan sj BESS, karena akronim ini sdh disebutkan di bab pendahuluan.

3.2 Pembahasan

Profil Pengisian dan Pengosongan BESS

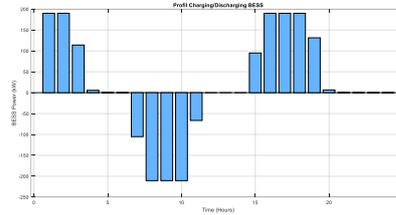
Bedasarkan kurva profil beban setelah integrasi BESS yang ditunjukkan pada Gambar 3, dapat diketahui karakteristik BESS yang digunakan untuk Aplikasi *Peak Shaving*. Karakteristik BESS ini ditunjukkan pada table 2, dari sini dapat diketahui bahwa untuk beban puncak 800 kW diperlukan BESS dengan kapasitas 1000 kWh untuk efisiensi 0.95%

Tabel 2. Parameter BESS

Peak Load	800 kW
BESS Capacity	1000 kWh
BESS Maxcharge	200 kW
BESS MaxDischarge	200 kW
BESS Efficiency	0.95 %
BESS StateOfCharge	500 kW
BESS MinSoC	200 kW
BESS MaxSoC	1000 kW

Dari Parameter inilah dapat diketahui profil Pengisian/Pengosongan (Cahrnging/discharging), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Grafik mengilustrasikan profil pengisian dan pengosongan Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) selama periode 24 jam. Sumbu-x mewakili waktu dalam jam, sedangkan sumbu-y menunjukkan daya BESS dalam kilowatt (kW). Nilai positif menunjukkan periode pengisian, di mana BESS menyimpan energi, sedangkan nilai negatif mewakili periode pengosongan, di mana BESS memasok daya ke sistem.

Dari grafik, dapat dilihat pada Gambar 3.2 bahwa pengisian terjadi terutama pada jam-jam awal dan malam hari, ketika BESS menyerap energi berlebih dari jaringan. Daya pengisian mencapai batas maksimum 200 kW, sesuai dengan parameter sistem. Di sisi lain, pengosongan terjadi terutama selama jam beban puncak, sekitar tengah hari, ketika permintaan energi mencapai tingkat tertinggi. BESS melepaskan energi tersimpan dengan daya hingga -200 kW, membantu mengurangi beban puncak dan menstabilkan sistem.

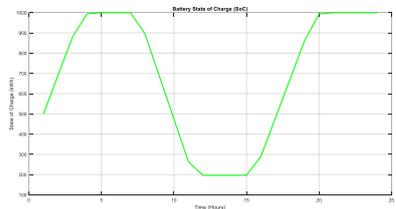


Gambar 3.2 Kurva profil pengisian/pengosongan BESS

Siklus pengisian dan pengosongan ini mendemonstrasikan peran BESS dalam perataan beban, memastikan bahwa energi disimpan ketika permintaan rendah dan digunakan ketika permintaan tinggi.

Dengan mengimplementasikan strategi ini, sistem dapat meningkatkan efisiensi, mengurangi tekanan pada jaringan, dan mengoptimalkan penggunaan energi sambil meminimalkan biaya permintaan puncak.

Dari Gambar 3.3, dapat diamati bahwa pengisian daya baterai dimulai dengan tingkat muatan sekitar 500 kWh, kemudian meningkat ke kapasitas maksimumnya 1000 kWh pada jam-jam awal. Ini menunjukkan bahwa BESS sedang mengisi selama periode permintaan rendah, ketika energi berlebih tersedia dalam jaringan.



Gambar 3.3 Kurva State of Charge (SoC)

Setelah mencapai kapasitas penuh, baterai mulai melakukan pengosongan secara signifikan sekitar 6-7 jam, dengan SoC turun tajam ke batas minimumnya sekitar 200 kWh selama tengah hari, bertepatan dengan periode beban puncak. Ini menunjukkan bahwa BESS memasok energi ke jaringan untuk membantu memenuhi permintaan daya tinggi.

Setelah periode tengah hari, baterai secara bertahap mengisi kembali hingga mencapai kapasitas penuh (1000 kWh) lagi pada malam hari. Siklus ini mendemonstrasikan bahwa BESS berfungsi sebagai sistem penyimpanan energi yang mengisi selama permintaan rendah dan mengeluarkan selama permintaan tinggi,

membantu menyeimbangkan beban (perataan beban) dan meningkatkan efisiensi sistem energi.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Implementasi Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) berhasil mengurangi beban puncak hingga 50%, mendistribusikan energi lebih merata sepanjang hari, dan meningkatkan stabilitas serta efisiensi sistem tenaga.

Integrasi BESS memungkinkan pengisian selama periode permintaan rendah dan pengosongan selama periode permintaan tinggi, yang tidak hanya mengoptimalkan konsumsi energi tetapi juga mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada tim riset Laboratorium Deman Side Management, Center of Electrical energy system (CEES), Fakultas kejuruteraan Elektrik, UTM Johor.

Referensi

- [1] A. Saldarini, M. Longo, M. Brenna, and D. Zaninelli, "Battery Electric Storage Systems: Advances, Challenges, and Market Trends," *Energies*, vol. 16, no. 22, doi: 10.3390/en16227566.
- [2] K. Prakash *et al.*, "A review of battery energy storage systems for ancillary services in distribution grids: Current status, challenges and future directions," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, p. 971704, 2022.
- [3] W. Zhang and S. Wang, "Optimal Allocation of BESS in Distribution Network Based on Improved Equilibrium Optimizer," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.936592.
- [4] M. A. Hoque, M. K. Hassan, A. Hajjo, and T. A. Taha, "Investigation of Battery Energy Storage System (BESS) during Loading Variation," *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 110, no. 1, pp. 86-96, 2023.
- [5] R. Colucci, I. Mahgoub, H. Yousefizadeh, and H. Al-Najada, "Survey of Strategies to Optimize Battery Operation to Minimize the Electricity Cost in a Microgrid With Renewable Energy Sources and Electric Vehicles," *Ieee Access*, vol. 12, pp. 8246-8261, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3352018.
- [6] S. A. Assery, X.-P. Zhang, and N. Chen, "Large-Scale BESS for Damping Frequency Oscillations of Power Systems with High Wind Power Penetration," *Inventions*, vol. 9, no. 1, doi: 10.3390/inventions9010003.
- [7] A. Shahmohammadi, R. Siohansi, A. J. Conejo, and S. Afsharnia, "The role of energy storage in mitigating ramping inefficiencies caused by variable renewable generation," *Energy Conversion and Management*, vol. 162, pp. 307-320, 2018.
- [8] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154-2171, 2022.
- [9] S. Koochi-Kamali, V. V. Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, and H. Mokhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 135-165, 2023.
- [10] P. B. L. Neto, O. R. Saavedra, and L. A. de Souza Ribeiro, "A dual-battery storage bank configuration for isolated microgrids based on renewable sources," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1618-1626, 2018.
- [11] N. Belmonte *et al.*, "A comparison of energy storage from renewable sources through batteries and fuel cells: A case study in Turin, Italy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 46, pp. 21427-21438, 2021.
- [12] M. Rostami and S. Lotfifard, "Scalable coordinated control of energy storage systems for enhancing power system

- angle stability," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 763-770, 2022.
- [13] O. M. Babatunde, J. L. Munda, and Y. Hamam, "Power system flexibility: A review," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 101-106, 2020.
- [14] M. Moazzami, J. Moradi, H. Shahinzadeh, G. B. Gharehpetian, and H. Mogoei, "Optimal economic operation of microgrids integrating wind farms and advanced rail energy storage system," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 8, no. 2, pp. 1155-1164, 2018.
- [15] R. Bhatt and B. Chowdhury, "Grid frequency and voltage support using PV systems with energy storage," 2021: IEEE, pp. 1-6.
- [16] T. Wilberforce, A. Alaswad, A. Palumbo, M. Dassisti, and A.-G. Olabi, "Advances in stationary and portable fuel cell applications," *International journal of hydrogen energy*, vol. 41, no. 37, pp. 16509-16522, 2021.
- [17] S. Srinivasan, *Fuel cells: from fundamentals to applications*. Springer Science & Business media, 2023.
- [18] M. Alhassan and M. U. Garba, "Design of an alkaline fuel cell," *Leonardo Electron. J. Pract. Technol*, vol. 5, pp. 99-106, 2016.
- [19] G. Kaur, "Solid oxide fuel cell components," *Switzerland: Springer*, 2016.
- [20] N. H. Behling, *Fuel cells: current technology challenges and future research needs*. Newnes, 2012.
- [21] D. W. Gao, *Energy storage for sustainable microgrid*. Academic Press, 2015.
- [22] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, 2021.