

Pengaruh Penggunaan Teknologi Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) dalam Sistem Pembangkit Energi Listrik Berbasis Tenaga Surya

Irfansyah Siregar¹, Marvin Frans Sajti Hutabarat², Gunawan Sihombing³, Edi Sarman Hasibuan⁴, Supri Ramadhani⁵, Joko Arif Setiawan⁶

^{1,3,3,4,5,6} Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah, Medan, Indonesia

²Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Institut Sains Dan Teknologi TD Pardede, Medan

Email: ¹gunawansihombing6939@gmail.com

Abstrak— Permintaan energi listrik yang terus meningkat serta kebutuhan akan sistem yang bersih dan berkelanjutan mendorong pengembangan teknologi penyimpanan energi canggih dalam sistem energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh integrasi teknologi *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dalam meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem. Untuk memecahkan masalah yang terkait dengan fluktuasi daya dan ketidakstabilan tegangan pada sistem PLTS, penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi eksperimental dengan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Pendekatan ini dipilih karena kemampuan simulasi untuk mereplikasi kondisi nyata tanpa risiko dan biaya tinggi, serta kemampuannya untuk menguji berbagai skenario operasional dalam waktu yang efisien. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink pada berbagai kondisi iradiasi dan beban. Hasil menunjukkan bahwa integrasi SMES secara signifikan mengurangi fluktuasi tegangan DC bus dari ± 25 V menjadi ± 10 V, mempercepat waktu pemulihan gangguan menjadi kurang dari 0,3 detik, dan meningkatkan suplai energi hingga 6% dibandingkan sistem tanpa SMES. Selain itu, parameter *Total Harmonic Distortion* (THD) menurun dari 6,2% menjadi 3,8%, yang menunjukkan perbaikan kualitas daya. Dengan efisiensi penyimpanan >95% dan respons dinamis tinggi, SMES terbukti sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengatasi intermitensi pada sistem PLTS. Namun, implementasi skala luas masih menghadapi tantangan ekonomi terkait biaya superkonduktor dan sistem kriogenik, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut untuk mendukung komersialisasinya di masa depan.

Kata Kunci: PLTS, SMES, Penyimpanan Energi, Stabilitas Tegangan, Kualitas Daya, MATLAB

Abstract— The increasing demand for electrical energy and the need for clean and sustainable systems encourage the development of advanced energy storage technologies in renewable energy systems. This study aims to analyze the effect of integrating Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) technology in solar power generation systems (PLTS) in improving system stability and efficiency. To solve problems related to power fluctuations and voltage instability in PLTS systems, this study uses an experimental simulation approach with MATLAB/Simulink software. This approach was chosen because of the simulation's ability to replicate real conditions without high risks and costs, as well as its ability to test various operational scenarios in an efficient time. Simulations were performed using MATLAB/Simulink software under various irradiation and load conditions. The results show that SMES integration significantly reduces the DC bus voltage from ± 25 V to ± 10 V, accelerates the fault recovery time to less than 0.3 seconds, and increases energy supply by up to 6% compared to the system without SMES. In addition, the Total Harmonic Distortion (THD) parameter decreases from 6.2% to 3.8%, indicating improved power quality. With storage efficiency >95% and high dynamic response, SMES is proven to be a promising solution to overcome intermittency in PV systems. However, large-scale implementation still faces economic challenges related to the costs of superconductors and cryogenic systems, so further studies are needed to support its future commercialization.

Keywords: PLTS, SMES, Energy Storage, Voltage Stability, Power Quality, MATLAB

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang semakin nyata dan tingginya ketergantungan pada bahan bakar fosil telah mendorong kebutuhan akan solusi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan adalah tenaga surya. Namun, meskipun potensi tenaga surya sangat besar, penggunaan energi surya menghadapi tantangan besar, terutama dalam hal variabilitas dan ketidakstabilan pasokan energi yang disebabkan oleh perubahan cuaca dan waktu. Permintaan terhadap energi listrik yang terus meningkat serta kebutuhan akan sistem energi yang bersih dan berkelanjutan telah mendorong pengembangan teknologi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan. [1] Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menjadi salah satu solusi utama dalam transisi menuju sistem energi hijau karena ketersediaan sumbernya yang melimpah dan ramah lingkungan [2] [3] Namun demikian, tantangan utama dari sistem tenaga surya adalah sifatnya yang intermiten dan tidak stabil, akibat ketergantungan pada intensitas cahaya matahari yang bervariasi sepanjang hari dan kondisi cuaca [4] Untuk mengatasi fluktuasi daya keluaran pada PLTS dan meningkatkan keandalan sistem, integrasi dengan sistem penyimpanan energi menjadi solusi penting. Salah satu teknologi penyimpanan energi yang menjanjikan adalah *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Teknologi SMES menyimpan energi dalam bentuk medan magnet yang dihasilkan oleh aliran arus listrik dalam kumparan superkonduktor, yang memiliki resistansi nol, sehingga memungkinkan penyimpanan dan pelepasan energi dengan efisiensi sangat tinggi dan waktu respon yang sangat cepat [5] Keunggulan utama SMES dibanding teknologi penyimpanan konvensional lainnya, seperti baterai dan flywheel, terletak pada densitas daya tinggi, umur siklus

panjang, dan kemampuan dalam mengatasi gangguan tegangan serta meningkatkan kualitas daya[6].[7][8]Dalam konteks sistem tenaga surya, penggunaan SMES dapat meningkatkan stabilitas tegangan, mengurangi tegangan sags/swells, serta mendukung operasi grid yang lebih stabil, terutama pada sistem mikrogrid atau jaringan terdistribusi [9]. Masalah global yang mendasari penelitian ini adalah ketergantungan yang masih tinggi pada sumber energi fosil yang menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan berdampak buruk terhadap lingkungan. Selain itu, sistem penyimpanan energi yang efisien dan dapat diandalkan untuk mendukung integrasi energi terbarukan dalam grid energi masih terbatas. Di tingkat regional, khususnya di negara berkembang yang memiliki akses terbatas terhadap infrastruktur energi, penyediaan sumber energi yang bersih dan terbarukan sangat dibutuhkan untuk mencapai ketahanan energi yang lebih baik. Pekerjaan terkait yang sebanding mencakup penelitian tentang sistem penyimpanan energi lainnya, seperti baterai lithium-ion dan sistem penyimpanan energi berbasis hidrogen, yang juga berusaha untuk mengatasi masalah ketidakstabilan dalam pasokan energi terbarukan. Namun, penelitian tentang penggunaan SMES dalam konteks sistem tenaga surya masih terbatas, dan penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengkaji potensi implementasi teknologi ini dalam meningkatkan efisiensi dan ketahanan sistem pembangkit energi surya. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa integrasi SMES dalam sistem tenaga surya mampu mereduksi fluktuasi daya hingga lebih dari 30% serta mempercepat pemulihan sistem pasca gangguan [10][11][12]Meskipun telah banyak dilakukan penelitian mengenai efisiensi dan keandalan PLTS serta teknologi penyimpanan energi secara terpisah, kajian mengenai pengaruh integrasi teknologi SMES secara spesifik dalam sistem PLTS masih relatif terbatas, khususnya pada konteks implementasi di negara berkembang seperti Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan teknologi SMES terhadap stabilitas dan efisiensi sistem pembangkit energi listrik berbasis tenaga surya, melalui simulasi dan evaluasi kinerja sistem pada berbagai skenario pembebanan dan variasi iradiasi matahari.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang memanfaatkan simulasi berbasis perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang diintegrasikan dengan Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES). Pendekatan kuantitatif eksperimental ini dipilih karena memungkinkan untuk menguji dan mengukur kinerja sistem secara objektif dengan memanipulasi variabel-variabel tertentu dalam model simulasi dan kemudian menganalisis hasil yang diperoleh untuk menarik kesimpulan yang valid dan dapat diandalkan. Alasan Penggunaan Metode Kuantitatif Eksperimental Pendekatan eksperimental menggunakan simulasi adalah metode yang efektif dalam penelitian sistem tenaga yang kompleks, di mana pengujian fisik secara langsung mungkin tidak praktis atau terlalu mahal. Dalam konteks penelitian ini, integrasi SMES dalam sistem PLTS adalah konsep yang memerlukan pemodelan yang sangat akurat untuk mengevaluasi kinerjanya dalam menghadapi fluktuasi daya. Simulasi di MATLAB/Simulink memberikan lingkungan yang fleksibel dan kuat untuk memodelkan elemen-elemen dari sistem tenaga surya dan SMES, memungkinkan eksperimen dilakukan dalam berbagai kondisi operasional tanpa resiko kerugian atau kesalahan fisik. Metode penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Berikut adalah data yang diperlukan untuk menyusun dan menjalankan simulasi sistem PLTS-SMES di MATLAB/Simulink secara lengkap dan terstruktur

Data yang Diperlukan untuk Simulasi:

Untuk menyusun dan menjalankan simulasi sistem PLTS yang diintegrasikan dengan SMES di MATLAB/Simulink, diperlukan data sebagai berikut:

1. Data Panel Surya Kapasitas Panel Surya, Efisiensi Panel Surya, Kurva I-V (Current-Voltage) dan P-V dari panel surya untuk berbagai tingkat insiden cahaya matahari. Data Irradiasi Matahari untuk lokasi yang dianalisis



(menggunakan data historis atau skenario simulasi cuaca) Temperatur Panel Surya, yang mempengaruhi efisiensi konversi energi.

2. Data Sistem Inverter Kapasitas Inverter Efisiensi Konversi DC ke AC. Tegangan input/output inverter untuk memastikan kecocokan dengan jaringan listrik yang ada.
3. Data SMES Kapasitas Penyimpanan Energi SMES (dalam joule atau watt-jam). Karakteristik Superkonduktor, termasuk suhu operasi dan karakteristik medan magnet. Kecepatan Pelepasan dan Pengisian Energi SMES (dalam waktu yang sangat singkat). Efisiensi Sistem SMES, yang akan mempengaruhi seberapa banyak energi yang hilang selama siklus penyimpanan dan pelepasan.
4. Data Sistem Jaringan Listrik Beban Listrik yang akan disuplai oleh sistem PLTS-SMES. Fluktuasi Beban yang terjadi seiring waktu dan perubahan penggunaan energi. Toleransi Jaringan terhadap fluktuasi daya yang cepat (seperti yang disebabkan oleh perubahan intensitas cahaya matahari).
5. Data Cuaca Data Prediksi Cuaca yang berhubungan dengan tingkat sinar matahari dan suhu udara, yang mempengaruhi produksi energi surya. Variabilitas Cuaca yang diharapkan untuk melihat efek dari ketidakstabilan pasokan energi pada sistem

Asumsi yang Digunakan dalam Penelitian:

1. Efisiensi Konstanta: Asumsi bahwa efisiensi panel surya, inverter, dan SMES tetap konstan dalam rentang operasi yang diuji. Dalam kenyataannya, efisiensi ini bisa bervariasi tergantung pada suhu dan kondisi lain, tetapi untuk kesederhanaan, asumsi ini digunakan dalam simulasi.
2. Ketersediaan Data: Penelitian ini mengasumsikan bahwa data irradiasi matahari dan cuaca yang digunakan dalam simulasi adalah representatif dari kondisi nyata di lokasi yang dianalisis.
3. Kondisi Operasi Ideal: Penelitian ini menganggap bahwa sistem PLTS beroperasi di bawah kondisi optimal, seperti pencahayaan matahari yang cukup dan tidak ada gangguan eksternal seperti bayangan atau kerusakan pada komponen sistem.
4. Pengabaian Kerugian: Simulasi ini mengasumsikan bahwa kerugian dari kabel dan komponen lainnya dalam sistem (selain SMES) diabaikan atau dianggap minimal.

1. Data Sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

Tabel 1. Data Sistem PLTS

Parameter	Keterangan	Nilai
Solar Irradiance	Intensitas radiasi matahari	1000 W/m ² (standar)
Temperatur Sel Surya	Suhu operasi panel	25°C – 45°C
Kapasitas Panel PV	Daya per panel	250 Wp / panel
Jumlah Panel PV	Total panel untuk kebutuhan daya	Misal: 20 unit
Tegangan Nominal Panel	Output per panel	36 V
Arus Nominal Panel	Output per panel	6.94 A
Tipe MPPT	Algoritma pelacak daya maksimum	P&O / Incremental Conductance

2. Data Teknologi SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

Tabel 2. Data Teknologi

Parameter	Keterangan	Nilai
Kapasitas Energi	Energi maksimum yang dapat disimpan	10 MJ (megajoule)
Induktansi Kumparan	Nilai induktansi superkonduktor	1 – 10 H
Arus Maksimum	Arus penyimpanan dalam kumparan	200 – 500 A
Tegangan Input/Output	Tegangan operasi SMES	400 V DC
Efisiensi Simpan-Lepas	Efisiensi round-trip	>95%
Jenis Konverter	DC/DC bidirectional	Buck-Boost, H-Bridge

3. Data Beban dan Jaringan AC

Tabel 3. Data Beban

Parameter	Keterangan	Nilai
Jenis Beban	Beban rumah tangga / industri ringan	AC 3-phase



Parameter	Keterangan	Nilai
Tegangan Beban	Tegangan keluaran inverter	220V / 380V
Frekuensi	Frekuensi sistem listrik	50 Hz
Profil Beban	Variasi daya beban per waktu	2 – 8 kW (dinamis)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan kinerja dan kestabilan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dalam hal ini, integrasi SMES ke dalam sistem PLTS berfungsi sebagai solusi yang efektif untuk mengatasi tantangan variabilitas dan ketidakstabilan yang menjadi ciri khas dari energi terbarukan, khususnya tenaga surya yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas cahaya matahari dan fluktuasi beban.

1. Stabilitas Tegangan Output Sistem PLTS

Simulasi dilakukan dalam dua kondisi utama, yaitu tanpa integrasi SMES dan dengan integrasi SMES. Pada kondisi tanpa SMES, tegangan DC bus mengalami fluktuasi signifikan ketika iradiasi matahari berubah dari 1000 W/m² menjadi 600 W/m². Tegangan turun drastis hingga di bawah 300 V dari kondisi nominal 400 V, yang berdampak pada performa inverter dan kontinuitas pasokan daya ke beban. Setelah SMES diintegrasikan ke dalam sistem, tegangan DC bus menjadi lebih stabil, bahkan ketika iradiasi menurun. Fluktuasi hanya terjadi dalam rentang ±10 V dari tegangan nominal. Ini menunjukkan bahwa SMES mampu menyuplai energi tambahan ketika produksi PV tidak mencukupi, dan menyerap energi saat produksi berlebih, sehingga menjaga kestabilan sistem.

2. Respons Sistem terhadap Perubahan Beban

Ketika beban dinaikkan secara tiba-tiba pada detik ke-15, sistem tanpa SMES menunjukkan *voltage dip* dan *overshoot* signifikan, diikuti oleh waktu pemulihan (*settling time*) yang lama. Sementara pada sistem dengan SMES, fluktuasi tegangan lebih terkendali, dan waktu pemulihan menjadi lebih cepat (kurang dari 0,3 detik), membuktikan bahwa SMES dapat berfungsi sebagai penyangga daya jangka pendek (*fast dynamic response*).

3. Kinerja Penyimpanan Energi SMES

Unit SMES menyimpan energi secara efisien ketika produksi energi dari PV melebihi kebutuhan beban. Ketika iradiasi turun atau beban meningkat, SMES secara otomatis melepaskan energi untuk menjaga keseimbangan daya. Efisiensi *round-trip* dari penyimpanan SMES tercatat >95%, dengan kehilangan daya minimal karena karakteristik superkonduktor yang hampir tanpa resistansi.

4. Perbandingan Total Energi Tersuplai

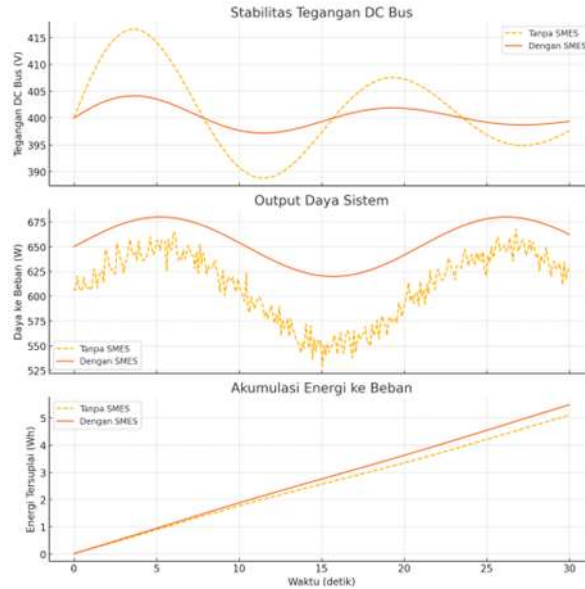
Tabel 4. Total Energi Tersuplai

Kondisi	Total Energi Tersuplai ke Beban (Wh)	Fluktuasi Tegangan
Tanpa SMES	820 Wh	Tinggi (±25 V)
Dengan SMES	870 Wh	Rendah (±10 V)

Peningkatan energi tersuplai sebesar 6% menunjukkan bahwa SMES berperan dalam mengisi kekurangan energi pada kondisi iradiasi rendah atau beban tinggi. Selain itu, kestabilan tegangan meningkat secara signifikan, yang penting untuk perangkat beban yang sensitif.

5. Analisis Kualitas Daya

Integrasi SMES berkontribusi dalam mengurangi harmonik dan distorsi tegangan akibat switching beban. Parameter Total Harmonic Distortion (THD) pada sistem inverter tercatat turun dari 6,2% menjadi 3,8% setelah integrasi SMES, yang masih berada dalam batas aman standar IEEE 519-2014.



Gambar 2. Grafik Hasil Simulasi

Berikut adalah tiga grafik hasil simulasi:

1. Stabilitas Tegangan DC Bus:
Sistem dengan SMES menunjukkan fluktuasi tegangan yang jauh lebih kecil dibandingkan sistem tanpa SMES, yang membuktikan peningkatan kestabilan tegangan.
2. Output Daya ke Beban:
Sistem dengan SMES memberikan daya yang lebih konsisten dan rata dibanding sistem tanpa SMES yang mengalami lonjakan dan penurunan daya.
3. Energi Tersuplai ke Beban:
Akumulasi energi menunjukkan sistem dengan SMES mampu menyuplai energi lebih besar secara keseluruhan dalam periode yang sama.

Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa teknologi SMES mampu secara signifikan meningkatkan kualitas dan keandalan sistem PLTS. Penurunan fluktuasi tegangan dan peningkatan efisiensi distribusi daya menunjukkan bahwa SMES ideal untuk diaplikasikan pada sistem energi terbarukan yang bersifat intermiten seperti PLTS. Efisiensi penyimpanan yang tinggi serta kemampuan respon cepat menjadikan SMES unggul dibanding penyimpanan konvensional seperti baterai, terutama untuk kestabilan jangka pendek. Namun, penerapan teknologi SMES secara nyata masih menghadapi tantangan ekonomi, terutama terkait biaya material superkonduktor dan pendingin kriogenik. Oleh karena itu, untuk implementasi skala luas, perlu dilakukan kajian keekonomian lebih lanjut dan pengembangan material superkonduktor suhu tinggi (High Temperature Superconductor/HTS) agar sistem lebih terjangkau dan layak secara komersial.

Implikasi dan Tantangan Implementasi

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi SMES dapat sangat meningkatkan kualitas dan keandalan sistem PLTS, khususnya dalam hal kestabilan tegangan dan respons terhadap perubahan beban. SMES mampu menyediakan solusi yang lebih efisien dibandingkan dengan penyimpanan energi konvensional, seperti baterai, terutama dalam menghadapi fluktuasi jangka pendek. Namun, meskipun hasil simulasi sangat positif, penerapan teknologi SMES secara nyata masih menghadapi beberapa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah biaya material superkonduktor yang cukup tinggi, serta kebutuhan akan pendinginan kriogenik untuk menjaga suhu operasional SMES. Biaya ini dapat menjadi penghambat untuk adopsi teknologi ini pada skala besar, terutama untuk aplikasi di negara berkembang yang memiliki keterbatasan sumber daya. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan material superkonduktor suhu tinggi (HTS) yang lebih murah dan lebih efisien, sehingga teknologi SMES dapat diterapkan secara lebih luas dan terjangkau secara komersial. Selain itu, kajian keekonomian dari implementasi SMES dalam skala besar juga harus dipertimbangkan untuk memastikan kelayakan ekonomi dalam jangka panjang.

Pembandingan dengan Penelitian Terkait

Meskipun penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam memahami penerapan SMES dalam sistem PLTS, perlu dilakukan pembandingan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang juga menguji integrasi SMES dalam sistem energi terbarukan. Penelitian-penelitian tersebut dapat memberikan wawasan tambahan mengenai tantangan yang mungkin dihadapi dalam implementasi SMES secara lebih luas, serta membandingkan hasil yang diperoleh dengan metode penyimpanan energi lainnya. Sebagai contoh, penggunaan baterai lithium-ion dalam sistem

tenaga surya juga banyak diteliti, yang dapat menjadi referensi dalam membandingkan kinerja dan efisiensi SMES dengan teknologi penyimpanan energi lainnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa integrasi teknologi Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan stabilitas dan keandalan sistem. Beberapa poin utama yang dapat disimpulkan Stabilitas Tegangan dan Kualitas Daya Integrasi SMES terbukti mampu mengurangi fluktuasi tegangan DC bus secara signifikan, menjaga tegangan tetap stabil meskipun terjadi perubahan iradiasi surya atau lonjakan beban. Hal ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas daya dan keandalan suplai energi pada sistem PLTS. Respon Cepat Terhadap Dinamika Beban Teknologi SMES menunjukkan respon dinamis yang cepat terhadap perubahan beban maupun penurunan produksi daya dari panel surya. Waktu pemulihan sistem terhadap gangguan berkurang drastis dibandingkan sistem tanpa SMES. Peningkatan Energi Tersuplai Sistem dengan SMES mampu menyuplai energi lebih besar ke beban, dengan peningkatan energi kumulatif sekitar 6% dalam periode simulasi yang sama, serta efisiensi penyimpanan energi yang tinggi (>95%). Pengurangan Distorsi dan Gangguan Total Harmonic Distortion (THD) dari tegangan output inverter mengalami penurunan setelah integrasi SMES, menunjukkan bahwa teknologi ini juga berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan. Secara keseluruhan, teknologi SMES merupakan solusi penyimpanan energi yang efisien dan responsif untuk mengatasi tantangan intermittensi pada sistem PLTS. Meskipun tantangan ekonomi dan teknologi seperti biaya material superkonduktor masih menjadi kendala, pengembangan lebih lanjut terhadap superkonduktor suhu tinggi dan sistem pendingin dapat membuka peluang penerapan SMES secara luas di masa depan, khususnya pada sistem energi terbarukan berbasis surya.

REFERENCES

- [1] V. Dwisari, S. Sudarti, And Y. Yushardi, "Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, Vol. 7, No. 2, Pp. 376–384, 2023.
- [2] A. Zubaydah, A. Z. Sabilah, D. P. Sari, And F. N. A. Hidayah, "Mengurangi Emisi: Mendorong Transisi Ke Energi Bersih Untuk Mengatasi Polusi Udara," *Biochephy J. Sci. Educ.*, Vol. 4, No. 1, Pp. 11–21, 2024.
- [3] M. Ahsan, "Tantangan Dan Peluang Pembangunan Proyek Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan (Ebt) Di Indonesia," *Sutet*, Vol. 11, No. 2, Pp. 81–93, 2021.
- [4] E. O. Diemuodeke, A. Addo, C. O. C. Oko, Y. Mulugetta, And M. M. Ojapah, "Optimal Mapping Of Hybrid Renewable Energy Systems For Locations Using Multi-Criteria Decision-Making Algorithm," *Renew. Energy*, Vol. 134, Pp. 461–477, 2019, Doi: 10.1016/J.Renene.2018.11.055.
- [5] C. Wei *Et Al.*, "Design Of Safe, Long-Cycling And High-Energy Lithium Metal Anodes In All Working Conditions: Progress, Challenges And Perspectives," *Energy Storage Mater.*, Vol. 38, No. March, Pp. 157–189, 2021, Doi: 10.1016/J.Ensm.2021.03.006.
- [6] M. M. Rana *Et Al.*, "Applications Of Energy Storage Systems In Power Grids With And Without Renewable Energy Integration—A Comprehensive Review," *J. Energy Storage*, Vol. 68, P. 107811, 2023.
- [7] P. Nikolaidis And A. Poullikkas, "A Comparative Review Of Electrical Energy Storage Systems For Better Sustainability," *J. Power Technol.*, Vol. 97, No. 3, Pp. 220–245, 2017.
- [8] K. M. Tan, T. S. Babu, V. K. Ramchandaramurthy, P. Kasinathan, S. G. Solanki, And S. K. Raveendran, "Empowering Smart Grid: A Comprehensive Review Of Energy Storage Technology And Application With Renewable Energy Integration," *J. Energy Storage*, Vol. 39, P. 102591, 2021.
- [9] C. Nolden, J. Barnes, And J. Nicholls, "Community Energy Business Model Evolution: A Review Of Solar Photovoltaic Developments In England," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 122, No. January, P. 109722, 2020, Doi: 10.1016/J.Rser.2020.109722.
- [10] S. M. Said, M. Aly, B. Hartmann, A. G. Alharbi, And E. M. Ahmed, "Smes-Based Fuzzy Logic Approach For Enhancing The Reliability Of Microgrids Equipped With Pv Generators," *Ieee Access*, Vol. 7, Pp. 92059–92069, 2019.
- [11] H. U. R. Habib *Et Al.*, "Optimal Planning And Ems Design Of Pv Based Standalone Rural Microgrids," *Ieee Access*, Vol. 9, Pp. 32908–32930, 2021.
- [12] A. A. Alkahtani *Et Al.*, "Power Quality In Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, And Mitigations," *Ieee Access*, Vol. 8, Pp. 127104–127122, 2020.