

Perencanaan PLTS *Hybrid* di *Jetty* PT Lotte Chemical Indonesia: Analisis Perancangan Kapasitas Sistem dan Proteksi Kelistrikan

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hybrid pada area jetty PT Lotte Chemical Indonesia untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara andal dan berkelanjutan. Metode penelitian meliputi analisis iradiasi matahari menggunakan data NASA POWER, analisis beban listrik, serta perancangan kapasitas panel surya, inverter hybrid, baterai, dan sistem proteksi kelistrikan. Hasil penelitian menunjukkan nilai Peak Sun Hour (PSH) rata-rata sebesar 5,09 jam/hari dengan kebutuhan energi listrik sebesar 30,38 kWh/hari. Sistem dirancang menggunakan 16 modul fotovoltaik 450 Wp dengan kapasitas terpasang 7,2 kWp, inverter hybrid 6 kW, dan baterai 48 V 100 Ah. Sistem proteksi terdiri atas DC Fuse, MCB DC, DC Isolator, SPD DC, MCB AC, dan SPD AC untuk meningkatkan keamanan serta keandalan operasi sistem. Kata-kata kunci: Format makalah, Seminar Fisika, Prosiding

Kata kunci: PLTS hybrid, panel surya, inverter hybrid, proteksi kelistrikan, energi terbarukan.

Abstract

This study discusses the design of a hybrid Photovoltaic (PV) system for the jetty area of PT Lotte Chemical Indonesia to provide a reliable and sustainable electricity supply. The research method includes solar irradiation analysis using NASA POWER data, electrical load analysis, and the design of photovoltaic module capacity, hybrid inverter, battery, and electrical protection system. The results show an average Peak Sun Hour (PSH) of 5.09 h/day with an electrical energy demand of 30.38 kWh/day. The system is designed using 16 photovoltaic modules rated at 450 Wp with a total installed capacity of 7.2 kWp, a 6 kW hybrid inverter, and a 48 V 100 Ah battery. The protection system consists of DC Fuse, DC MCB, DC Isolator, DC SPD, AC MCB, and AC SPD to improve system safety and operational reliability.

Keywords: hybrid PV system, photovoltaic module, hybrid inverter, electrical protection, renewable energy.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik pada sektor industri mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai alternatif sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena memiliki biaya operasional yang relatif rendah serta dapat diintegrasikan dengan sumber energi lain melalui sistem *hybrid* untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik [1].

PT Lotte Chemical Indonesia memiliki fasilitas *jetty* dengan beban Penerangan Jalan Umum (PJU) dan *Closed Circuit Television* (CCTV) yang memerlukan suplai listrik secara kontinu. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang sistem PLTS *hybrid* beserta sistem proteksi kelistrikannya untuk meningkatkan keandalan penyediaan energi pada area tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian diawali dengan pengumpulan data radiasi matahari dan beban listrik sebagai dasar perancangan sistem PLTS *hybrid*. Selanjutnya dilakukan analisis perancangan kapasitas panel surya, inverter *hybrid*, baterai, serta sistem proteksi kelistrikan berdasarkan kebutuhan beban, spesifikasi komponen, dan standar perancangan PLTS yang berlaku [2].

Perhitungan Potensi Iradiasi Matahari

Potensi iradiasi matahari merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan sistem PLTS karena memengaruhi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh modul surya. Data iradiasi matahari pada lokasi penelitian diperoleh berdasarkan koordinat area *jetty* PT Lotte Chemical Indonesia menggunakan basis data NASA POWER dalam bentuk *Global Horizontal Irradiance* (GHI). Nilai GHI digunakan untuk menentukan *Peak Sun Hour* (PSH) yang menjadi dasar dalam perhitungan kapasitas panel surya [2]. Nilai *Peak Sun Hour* (PSH) dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Sun Hour} = \frac{\text{Global Horizontal Irradiance} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right]}{1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \times 356 \text{ hari}} \quad (1)$$

Perancangan Kapasitas Panel Surya

Kapasitas panel surya pada sistem PLTS *hybrid* ditentukan berdasarkan kebutuhan energi harian beban yang dialokasikan untuk dipenuhi oleh sumber energi surya, dengan jaringan PLN sebagai sumber cadangan pertama dan baterai sebagai sumber cadangan kedua yang berfungsi menyuplai beban pada saat terjadi gangguan atau pemadaman pada jaringan PLN [3]. Penentuan kapasitas diawali dengan menghitung kebutuhan daya PLTS menggunakan Persamaan (2), kemudian jumlah panel surya dihitung menggunakan Persamaan (3) [3].

$$\text{Kebutuhan Daya PLTS (kw)} = \frac{\text{jumlah total kebutuhan energi (Wh)}}{\text{Equivalen Sun Hours (h)}} \quad (2)$$

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{\text{Kebutuhan Daya PLTS (W)}}{\text{Kapasitas Modul (Wp)}} \quad (3)$$

Perancangan Kapasitas Inverter *Hybrid*

Kapasitas inverter *hybrid* ditentukan berdasarkan kapasitas daya nominal array fotovoltaik (PV *array*) dengan mempertimbangkan DC/AC *ratio*. DC/AC *ratio* menunjukkan perbandingan antara daya nominal *array* PV terhadap daya nominal inverter dan digunakan sebagai salah satu parameter dalam menentukan kapasitas inverter yang sesuai agar sistem dapat beroperasi secara optimal [4].

$$\text{DC/AC Ratio} = \frac{P_{\text{array}}}{P_{\text{inverter}}} \quad (4)$$

Perancangan Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai ditentukan dengan mempertimbangkan jumlah hari otonom, *Depth of Discharge* (DoD), dan efisiensi baterai. Pengaturan DoD berperan penting dalam menjaga usia pakai baterai, karena semakin dalam DoD yang diberlakukan maka semakin pendek siklus hidup baterai tersebut [3]. Kapasitas baterai dihitung menggunakan Persamaan (5) [3].

$$C = \frac{N \times EL}{VS \times DoD \times \eta} \quad (5)$$

Keterangan:

C = Kapasitas baterai (Ah)

N = Jumlah hari otonom

EL = Energi rata-rata malam (kWh)

VS = Tegangan sistem (V)

DoD = *Depth of Discharge* (%)

η = Efisiensi baterai (%)

Perancangan Proteksi Kelistrikan

Perancangan proteksi kelistrikan dilakukan untuk menentukan perangkat proteksi yang diperlukan pada sistem PLTS *hybrid* agar sistem dapat beroperasi secara aman dan andal. Tahap perancangan diawali dengan mengidentifikasi konfigurasi sistem serta jalur aliran daya mulai dari panel surya, inverter *hybrid*, baterai, jaringan PLN, *Automatic Transfer Switch* (ATS), hingga panel distribusi beban. Berdasarkan konfigurasi tersebut kemudian ditentukan titik pemasangan perangkat proteksi pada sisi arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC).

Perangkat proteksi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi DC isolator, fuse, *Miniature Circuit Breaker* (MCB), dan *Surge Protective Device* (SPD). Pemilihan perangkat proteksi disesuaikan dengan karakteristik sistem PLTS *hybrid* sehingga mampu memberikan perlindungan terhadap gangguan arus lebih, hubung singkat, serta tegangan lebih yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada peralatan maupun mengganggu kontinuitas penyaluran energi listrik [5][6].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Iradiasi Matahari

Data iradiasi matahari pada penelitian ini diperoleh menggunakan NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources* (NASA POWER) berdasarkan koordinat lokasi *jetty* PT. Lotte Chemical Indonesia, yaitu pada 5°58'32,99" LS dan 105°59'01,95" BT. Data yang digunakan berupa *Global Horizontal Irradiance* (GHI) bulanan selama periode tahun 2023–2024. Selanjutnya, nilai *Peak Sun Hour* (PSH) dihitung menggunakan Persamaan (1). Penggunaan data NASA POWER sebagai sumber data iradiasi banyak digunakan dalam perencanaan sistem fotovoltaik karena menyediakan data meteorologi dan energi surya yang representatif pada wilayah yang tidak memiliki stasiun pengukuran radiasi matahari [7].

Tabel 1. Iradiasi Matahari

Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des
2023	5,06	4,70	5,37	5,56	4,84	4,33	4,41	5,38	6,14	6,34	5,03	5,25
2024	4,74	5,20	5,16	4,64	4,47	4,22	4,86	5,31	5,63	6,14	4,86	4,44

Berdasarkan data pada Tabel 1, diperoleh nilai *Global Horizontal Irradiance* (GHI) tahunan sebesar 5,20 kWh/m²/hari pada tahun 2023 dan 4,97 kWh/m²/hari pada tahun 2024. Berdasarkan kedua nilai tersebut, diperoleh rata-rata GHI sebesar 5,09 kWh/m²/hari. Mengacu pada Persamaan (1), nilai tersebut digunakan sebagai *Peak Sun Hour* (PSH) dalam perancangan sistem PLTS *hybrid*. Hasil ini menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki potensi energi surya yang baik sehingga layak dimanfaatkan sebagai sumber energi pada sistem PLTS *hybrid* [8].

Perhitungan Beban Listrik

Analisis beban listrik dilakukan untuk mengetahui kebutuhan energi yang akan disuplai oleh sistem PLTS *hybrid*. Data beban diperoleh berdasarkan hasil survei lapangan pada area *jetty* PT. Lotte Chemical Indonesia yang meliputi beban Penerangan Jalan Umum (PJU) dan *Closed Circuit Television* (CCTV). Informasi yang dikumpulkan meliputi jumlah peralatan, daya terpasang, serta lama waktu operasi masing-masing beban. Analisis kebutuhan energi merupakan tahapan penting dalam perancangan PLTS karena menjadi dasar dalam menentukan kapasitas panel surya, inverter, dan baterai [9].

Tabel 2. Data Beban Listrik

No	Beban Listrik	Jumlah	Daya (W)	Lama Operasi (jam/hari)	Energi (Wh/hari)
1	PJU	41	60	12	29,52
2	CCTV	2	18	24	864
	Total				30,38

Berdasarkan Tabel 2, total kebutuhan energi listrik pada area *jetty* PT. Lotte Chemical Indonesia adalah 30.38 Wh/hari. Beban terbesar berasal dari sistem PJU karena memiliki jumlah armatur yang lebih banyak dibandingkan beban CCTV. Nilai kebutuhan energi harian tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas panel surya, inverter, dan baterai pada sistem PLTS *hybrid* [10].

Perhitungan Jumlah Panel Surya

Penentuan jumlah panel fotovoltaik dilakukan berdasarkan kebutuhan energi listrik harian sebesar 30,38 kWh/hari dan nilai *Peak Sun Hour* (PSH) sebesar 5,09 jam/hari yang diperoleh dari hasil analisis iradiasi matahari. Perhitungan kebutuhan daya PLTS dan jumlah panel fotovoltaik dilakukan menggunakan Persamaan (2) dan Persamaan (3). Tahap ini bertujuan untuk memperoleh kapasitas *array* fotovoltaik yang mampu memenuhi kebutuhan energi listrik pada area *jetty* PT. Lotte Chemical Indonesia secara optimal [10].

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kebutuhan daya PLTS sebesar 5,97 kWp. Pada penelitian ini digunakan modul fotovoltaik berkapasitas 450 Wp berdasarkan spesifikasi datasheet modul yang dipilih. Kapasitas tersebut dipilih karena menghasilkan daya yang lebih besar per modul sehingga jumlah panel yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit dibandingkan penggunaan modul dengan kapasitas yang lebih rendah. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kebutuhan sebanyak 14 modul. Namun, pada perancangan ini digunakan 16 modul sehingga kapasitas terpasang menjadi 7,2 kWp. Penambahan jumlah modul dilakukan agar konfigurasi *array* fotovoltaik sesuai dengan konfigurasi dua MPPT pada inverter *hybrid* yang digunakan [11].

Perhitungan Inverter *Hybrid*

Pemilihan inverter *hybrid* dilakukan berdasarkan hasil perancangan sistem PLTS serta karakteristik *array* fotovoltaik yang digunakan. Inverter yang dipilih memiliki kapasitas nominal 6 kW dan dilengkapi dengan dua *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Pemilihan kapasitas inverter tersebut disesuaikan dengan kebutuhan sistem serta spesifikasi *array* fotovoltaik agar proses konversi energi dari sisi DC ke AC dapat berlangsung secara optimal [4].

Array fotovoltaik pada penelitian ini terdiri atas 16 modul berkapasitas 450 Wp yang dibagi menjadi dua *string*, dengan masing-masing *string* terhubung pada satu MPPT inverter. Setiap MPPT menerima masukan dari 8 modul yang disusun secara seri, sehingga tegangan dan arus keluaran setiap *string* masih berada dalam rentang kerja MPPT inverter. Konfigurasi tersebut memungkinkan inverter melakukan pelacakan *Maximum Power Point* (MPP) secara independen pada masing-masing *string*, sehingga kinerja sistem tetap optimal apabila terjadi perbedaan kondisi iradiasi atau temperatur antar *string* [11].

Perhitungan Baterai

Penentuan kapasitas baterai dilakukan berdasarkan kebutuhan energi listrik selama waktu *backup* selama 1 jam menggunakan Persamaan (5). Perhitungan kapasitas baterai mempertimbangkan energi beban, tegangan sistem, *Depth of Discharge* (DoD), dan efisiensi baterai untuk memperoleh kapasitas penyimpanan energi yang mampu menjaga kontinuitas suplai listrik pada sistem PLTS *hybrid* [12].

Berdasarkan hasil analisis beban, total daya listrik yang disuplai oleh baterai adalah sebesar 2.496 W. Dengan waktu *backup* selama 1 jam, kebutuhan energi cadangan sebesar 2,496 kWh. Selanjutnya, berdasarkan Persamaan (5), kapasitas baterai dihitung sebagai berikut.

$$C = \frac{1 \times 2.496 \times 1000}{48 \times 0,8 \times 0,9}$$

$$C = 72,22 \text{ Ah}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dipilih baterai berkapasitas 100 Ah pada tegangan 48 V. Pemilihan kapasitas tersebut dilakukan karena merupakan salah satu kapasitas standar yang tersedia di pasaran serta memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan hasil perhitungan, sehingga mampu memenuhi kebutuhan energi cadangan selama waktu *backup* yang telah ditentukan dan meningkatkan keandalan sistem PLTS *hybrid* [13].

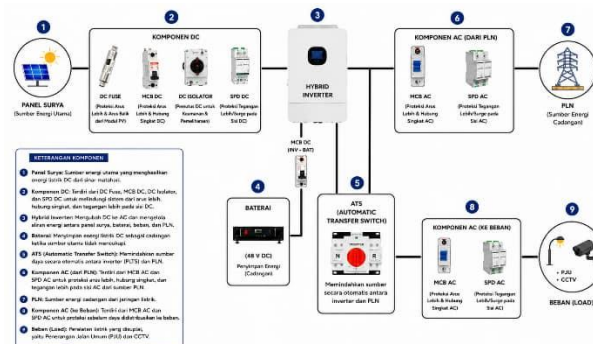
Proteksi Kelistrikan

Perancangan sistem proteksi kelistrikan bertujuan untuk menjamin keamanan dan keandalan operasi sistem PLTS *hybrid* dengan melindungi setiap komponen dari gangguan arus lebih, hubung singkat, maupun tegangan lebih (*overvoltage*). Pemilihan perangkat proteksi dilakukan berdasarkan karakteristik modul fotovoltaik, inverter *hybrid*, baterai, dan beban sehingga setiap bagian sistem memperoleh perlindungan yang sesuai dengan kondisi operasinya [5].

Konfigurasi sistem proteksi kelistrikan yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem proteksi terdiri atas perangkat proteksi pada sisi arus searah (*Direct Current* atau DC) dan sisi arus bolak-balik (*Alternating Current* atau AC). Pada sisi DC digunakan sekering DC (DC Fuse), pemutus sirkuit mini DC (*Miniature Circuit Breaker*/DC MCB), sakelar pemisah DC (DC Isolator), dan perangkat pelindung surja DC (*Surge Protective Device*/DC SPD). Sekering DC dipilih untuk melindungi modul fotovoltaik dari arus balik (*reverse current*) dan arus hubung singkat yang dapat menyebabkan kerusakan pada modul maupun penghantar. Pemutus sirkuit mini DC dipasang pada jalur antara inverter dan baterai untuk melindungi rangkaian dari arus lebih selama proses pengisian maupun pelepasan energi baterai. Sakelar pemisah DC digunakan untuk memutus hubungan antara inverter dan sumber DC secara aman ketika dilakukan inspeksi, pemeliharaan, maupun kondisi darurat. Sementara itu, perangkat pelindung surja DC dipasang untuk membatasi tegangan lebih transien akibat induksi sambaran petir sehingga inverter tetap terlindungi [5].

Pada sisi AC digunakan MCB AC dan SPD AC yang dipasang pada jalur antara jaringan PLN dengan inverter serta pada jalur keluaran inverter menuju beban. Pemutus sirkuit mini AC dipilih karena mampu memutus rangkaian secara otomatis ketika terjadi arus lebih maupun hubung singkat sehingga dapat melindungi inverter dan peralatan beban. Perangkat SPD AC berfungsi membatasi tegangan lebih transien yang berasal dari jaringan PLN sehingga risiko kerusakan pada inverter maupun peralatan listrik dapat diminimalkan. Selain itu, sistem dilengkapi dengan *Automatic Transfer Switch* atau ATS yang berfungsi mengalihkan sumber suplai listrik secara otomatis antara inverter dan jaringan PLN sehingga kontinuitas penyaluran energi ke beban tetap terjaga [14].

Dengan konfigurasi tersebut, sistem PLTS *hybrid* yang dirancang memiliki sistem proteksi pada setiap jalur utama, mulai dari sisi pembangkit, penyimpanan energi, hingga distribusi daya ke beban. Penerapan perangkat proteksi yang sesuai diharapkan dapat meningkatkan keandalan sistem, mengurangi risiko kerusakan peralatan akibat gangguan kelistrikan, serta mendukung pengoperasian sistem yang aman dan berkesinambungan.



Gambar 1. Desain Sistem PLTS Hybrid

Strategi Investasi Keberlanjutan

Sistem PLTS *hybrid* yang dirancang mempertimbangkan aspek keberlanjutan melalui pemilihan komponen yang memiliki keandalan tinggi dan mendukung pengoperasian dalam jangka panjang. Konfigurasi sistem yang terdiri atas panel fotovoltaik, inverter *hybrid*, baterai, dan sistem proteksi kelistrikan dirancang agar mampu memenuhi kebutuhan energi pada kondisi operasi saat ini serta memberikan fleksibilitas terhadap pengembangan sistem di masa mendatang sesuai dengan peningkatan kebutuhan energi dan spesifikasi teknis komponen yang digunakan. Dengan demikian, investasi yang dilakukan tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan energi saat ini, tetapi juga mendukung keberlanjutan operasional sistem dalam jangka panjang [15].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, sistem PLTS *hybrid* pada area *jetty* PT Lotte Chemical Indonesia dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi listrik sebesar 30,38 kWh/hari dengan memanfaatkan potensi energi surya yang memiliki nilai *Peak Sun Hour* (PSH) sebesar 5,09 jam/hari. Sistem menggunakan 16 modul fotovoltaik berkapasitas 450 Wp, inverter *hybrid* 6 kW, dan baterai 48 V 100 Ah sebagai penyimpanan energi cadangan kedua. Selain itu, sistem dilengkapi dengan perangkat proteksi berupa DC Fuse, MCB DC, DC Isolator, SPD DC, MCB AC, dan SPD AC untuk meningkatkan keamanan dan keandalan operasi. Dengan konfigurasi tersebut, sistem PLTS *hybrid* yang dirancang diharapkan mampu memenuhi kebutuhan energi listrik pada area *jetty* serta menjadi solusi penyediaan energi yang lebih andal dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] S. Sharma, J. Waldman, S. Afshari, and B. Fekete, "Status, trends and significance of American hydropower in the changing energy landscape," Mar. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2018.10.028.
- [2] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, and M. A. Mikofski, "pvlib python: a python package for modeling solar energy systems," *J. Open Source Softw.*, vol. 3, no. 29, p. 884, Sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [3] I. Akbar and M. Aswar, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," 2023.
- [4] M. F. Beyoğlu and M. Demirtaş, "Determination of Optimal DC/AC Ratio for Grid-connected Photovoltaic Systems," *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 19–29, Mar. 2023, doi: 10.18466/cbayarfbe.1200284.
- [5] M. Mitolo, "Protection Against Fault Currents in Photovoltaic Arrays: A Comprehensive Review," *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 637–654, Sep. 2025, doi: 10.13052/dgaej2156-3306.4041.
- [6] D. E. Sari, Rusdianasari, and A. Taqwa, "View of Supply Stability and Battery Protection in Rooftop Solar Pv System_ A Hybrid Energy Approach", doi: 10.53893.
- [7] A. Aprilia, A. Faruq Abdurrahman, and A. Ananda, "Indonesian Journal of Science Education and Applied Science (IJSEAS) Analysis of Daily and Annual Variations of Solar Radiation, Air Temperature, Precipitation, Wind Speed, Humidity, Aand Air Pressure in Lampung As Indicators of Renewable Energy," 2024. doi: <https://doi.org/10.20527/i.v4i2.14286>.
- [8] A. P. Harsarapama, D. R. Aryani, and D. Rachmansyah, "Open-Source Satellite-Derived Solar Resource Databases Comparison and Validation for Indonesia," *Journal of Renewable Energy*, vol. 2020, pp. 1–14, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/2134271.
- [9] R. Syahputra, K. Purwanto, and I. Soesanti, "Performance investigation of standalone wind power system equipped with sinusoidal PWM power inverter for household consumer in rural areas of Indonesia," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4553–4569, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.145.
- [10] K. N. Ukoima, O. I. Okoro, P. I. Obi, U. B. Akuru, and I. E. Davidson, "Optimal Sizing, Energy Balance, Load Management and Performance Analysis of a Hybrid Renewable Energy System," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 21, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17215275.
- [11] S. Zhao, H. Liu, E. Jiang, N. Zhao, C. Guo, and B. Bai, "Study on Apparent Permeability Model for Gas Transport in Shale Inorganic Nanopores," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15176301.
- [12] A. Gonçalves *et al.*, "Optimal Sizing of a Photovoltaic/Battery Energy Storage System to Supply Electric Substation Auxiliary Systems under Contingency," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16135165.
- [13] C. Rus-Casas, C. Gilabert-Torres, and J. I. Fernández-Carrasco, "Optimizing Energy Management and Sizing of Photovoltaic Batteries for a Household in Granada, Spain: A Novel Approach Considering Time Resolution," *Batteries*, vol. 10, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/batteries10100358.
- [14] Z. Wenping, X. Linyan, W. Yiming, X. Po, and C. Hui, "Reverse Polarity Protection in Photovoltaic Systems: A Review," *Smart Energy System Research*, vol. 2, no. 1, pp. 10003–10003, 2026, doi: 10.70322/sesr.2026.10003.
- [15] A. Giedraityte, S. Rimkevicius, M. Marciukaitis, V. Radziukynas, and R. Bakas, "Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges," Feb. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app15041744.