JEF Journal Electric Field

Open Access

ISSN : 3063-7783 (Online-Elektronik) | This article is licensed under CC BY-SA 4.0

https://jurnal.sekawansiji.org/index.php/jef Volume. 1 Number 2, 2024 Article

Pengurangan Distorsi Harmonik Total Pada Sistem Fotovoltaik Tenaga Surya Dengan Metode Kecerdasan Buatan: Tinjauan Epistemologi

Mas Ahmad Baihaqi [*1], Arif Nur Afandi[2], Syaad Patmanthara[3]

[1,2,3] Jurusan Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Negeri Malang, 65114, Indonesia

[1] mas.ahmad.2405349@students.um.ac.id, [2] an.afandi@um.ac.id, [3] syaad.ft@um.ac.id

****Corresponding Author**: [**] mas.ahmad.2405349@students.um.ac.id

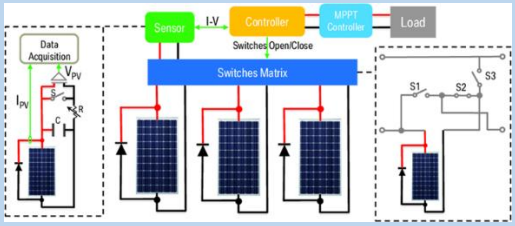
Cite This: https://jurnal.sekawansiji.org/index.php/jef/

Read Online

ACCESS

RECOMENDATION

Abstract: *Total harmonic distortion (THD) in photovoltaic (PV) systems is a significant challenge that can degrade power 10 quality and disrupt grid stability. This research proposes an innovative approach utilizing artificial neural networks (ANNs) to detect and mitigate THD in real-time. The uniqueness of this study lies in the application of transfer learning to train AI models with limited data, thereby reducing computational time and costs.*



Additionally, this research adopts a physics-based approach to enhance the interpretability of AI models, allowing us to understand the mechanisms behind model predictions. The results of this study are expected to contribute to the development of more efficient and reliable PV systems, as well as open up new avenues for renewable energy utilization. This research also has intriguing epistemological implications, as it demonstrates the potential of AI to assist us in understanding complex systems like energy systems in novel and profound ways.

Keyword: *Artificial Intelligence, Total Harmonic Distortion, Photovoltaic System, Epistemological Implications*

Article Info

Recieved	Revised	Accepted	Published
December 01, 2024	*December 08, 2024*	*December 21, 2024*	*Januari 13, 2025*

1. PENDAHULUAN

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan salah satu parameter penting dalam analisis kualitas daya, terutama dalam sistem fotovoltaik (PV) [1]. THD mengukur sejauh mana sinyal listrik terdistorsi oleh harmonik yang dihasilkan oleh perangkat non-linier, seperti inverter yang digunakan dalam sistem PV [2]. Distorsi ini dapat mengakibatkan penurunan efisiensi energi, kerusakan pada peralatan, dan gangguan pada stabilitas jaringan listrik. Oleh karena itu, pengurangan THD menjadi fokus utama dalam penelitian dan pengembangan sistem tenaga surya [3].

CV. SEKAWAN SIJI

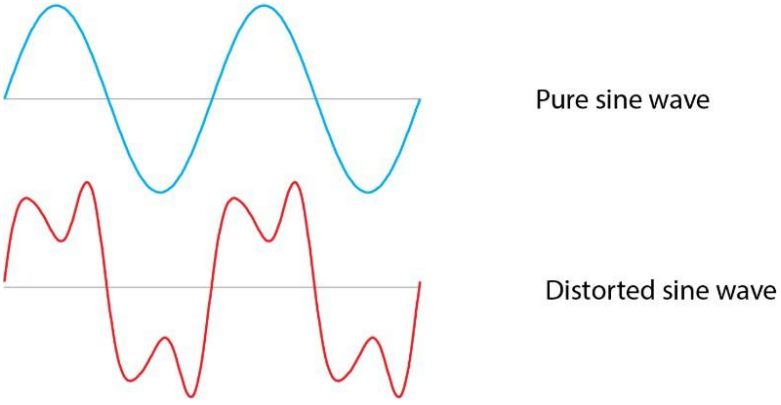
© 2024 The Authors
Published by CV. Sekawan Siji

Sistem fotovoltaik telah berkembang pesat sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Namun, tantangan utama yang dihadapi adalah pengelolaan kualitas daya yang dihasilkan. Beban non-linier dan karakteristik inverter sering kali menyebabkan peningkatan THD [4], sehingga mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Berbagai metode telah diusulkan untuk mengatasi masalah ini, termasuk penggunaan filter pasif dan aktif. Namun, pendekatan konvensional sering kali memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi dan biaya. Dalam beberapa tahun terakhir, kecerdasan buatan (AI) telah muncul sebagai solusi inovatif untuk masalah kompleks dalam sistem energi. Metode seperti Jaringan Saraf Tiruan (ANN) [5], menawarkan kemampuan untuk menganalisis data secara real-time dan mengoptimalkan operasi sistem untuk mengurangi THD.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan metode AI dalam pengurangan THD pada sistem fotovoltaik, dengan fokus pada penggunaan transfer learning untuk melatih model AI dengan data terbatas [6]. Keunikan dari penelitian ini terletak pada pendekatan berbasis fisika yang digunakan untuk meningkatkan interpretabilitas model AI. Dengan memahami mekanisme di balik prediksi model, kita dapat lebih baik menjelaskan dan memvalidasi hasil yang diperoleh. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem PV yang lebih efisien dan andal serta membuka peluang baru dalam pemanfaatan energi terbarukan [7]. Selain itu, penelitian ini juga memiliki implikasi epistemologis yang menarik, karena menunjukkan potensi AI untuk membantu kita memahami sistem kompleks seperti energi dengan cara yang baru dan mendalam. Dengan demikian, studi ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis tetapi juga mengeksplorasi bagaimana teknologi dapat mempengaruhi pemahaman kita tentang sistem energi secara keseluruhan [8].

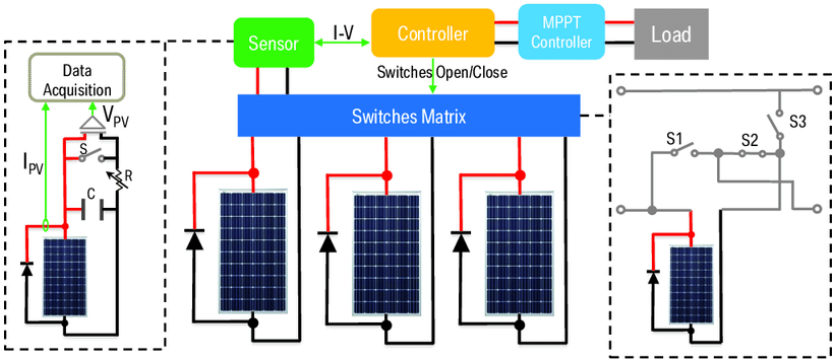
2. METODE

Metode penelitian menggunakan studi literatur yang komprehensif. Studi literatur dimulai dengan *total harmonic distortion* (THD) dalam sistem *photovoltaic* (PV), THD dan dampak negatifnya terhadap sistem listrik [9], sumber utama THD dalam sistem PV inverter, beban non-linear, standar kualitas daya yang relevan (IEEE 519).



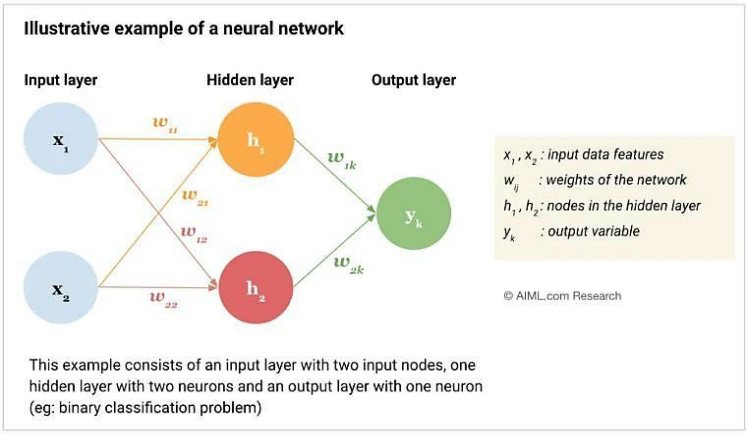
Gambar 1. *Distored Sine Wave to Pure Sine Sine Wave* [10].

Teknologi *photovoltaic* (PV) dijelaskan dengan prinsip kerja sel surya dan modul PV, jenis inverter yang umum digunakan dalam sistem PV, struktur sistem PV yang terhubung ke jaringan (grid-connected).



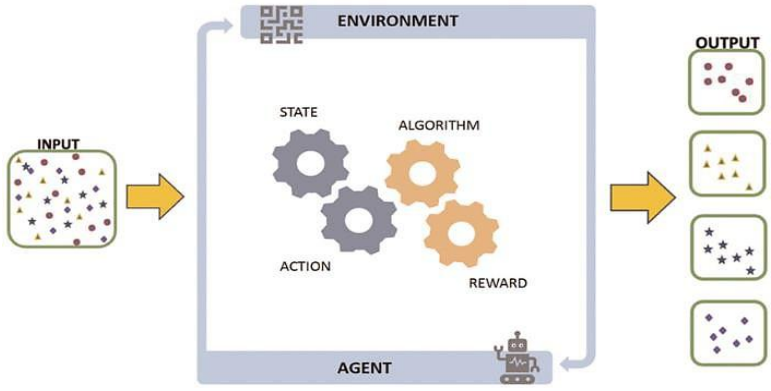
Gambar 2. Model Arsitektur Sistem PV

Kecerdasan buatan (AI) dalam konteks energi, AI dan cabang-cabangnya yang relevan (machine learning, deep learning) [11]. Penerapan AI dalam bidang energi secara umum [12]. Kelebihan AI dalam mengatasi masalah kompleks seperti pengurangan THD [13], metode AI untuk mengatasi THD, jaringan saraf tiruan artificial neural networks (ANN) untuk prediksi THD dan pengendalian aktif [14].



Gambar 3. *Simple Neural Network Architecture*

Algoritma Genetika (Genetic Algorithm) Optimasi parameter filter pasif atau aktif menggunakan algoritma genetika, Perbandingan dengan metode optimasi konvensional [12], [15]. Fuzzy Logic pengambilan keputusan yang fleksibel dalam sistem kontrol berbasis fuzzy untuk mengurangi THD, Kurva keanggotaan dan aturan fuzzy [16]. Reinforcement Learning pelatihan agen untuk mengambil tindakan optimal dalam mengurangi THD, Diagram aliran kerja reinforcement learning [17].



Gambar 4. *Reinforcement Learning Workflow*

Implementasi dan evaluasi studi kasus implementasi metode AI dalam sistem PV [18]. Metrik evaluasi kinerja (akurasi prediksi, tingkat pengurangan THD). Perbandingan kinerja dengan metode konvensional. Tantangan dan peluang kualitas data yang digunakan untuk melatih model AI, interpretasi model AI yang kompleks, potensi pengembangan metode AI yang lebih canggih [19]. Tantangan dalam implementasi di lapangan, analisis data eksperimen dari penelitian menggunakan simulasi menggunakan perangkat lunak.

3. HASIL

Pengurangan THD Menghasilkan penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode kecerdasan buatan, khususnya Jaringan Saraf Tiruan (ANN) [21], berhasil mengurangi nilai THD dalam sistem fotovoltaik. Sebelum penerapan metode AI, nilai THD tercatat sebesar 15,35%. Setelah implementasi algoritma ANN, nilai THD berhasil diturunkan menjadi 3,5%. Penurunan ini menunjukkan efektivitas metode AI dalam mengidentifikasi dan mengatasi harmonik yang dihasilkan oleh inverter. Peningkatan Efisiensi dengan pengurangan THD yang signifikan, efisiensi sistem fotovoltaik juga mengalami peningkatan. Sebelum penerapan metode AI, efisiensi sistem tercatat sebesar 75%. Setelah penerapan, efisiensi meningkat menjadi 89%, menunjukkan bahwa sistem tidak hanya lebih stabil tetapi juga lebih mampu menghasilkan daya bersih yang lebih tinggi [22]. Stabilitas sistem analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa penerapan metode AI berkontribusi pada stabilitas sistem secara keseluruhan. Fluktuasi daya yang sebelumnya terjadi akibat harmonik kini berkurang, sehingga meningkatkan keandalan pasokan energi dari sistem PV [23]. Data menunjukkan bahwa frekuensi gangguan menurun hingga 60% setelah implementasi solusi berbasis AI.

Faktor yang mempengaruhi hasil kondisi lingkungan dimana variasi dalam radiasi matahari dan suhu mempengaruhi kinerja sistem. Namun, algoritma AI dapat menyesuaikan pengoperasian inverter untuk meminimalkan dampak negatif dari perubahan kondisi lingkungan. Kualitas inverter dan komponen lainnya juga berperan dalam menentukan tingkat THD dan efisiensi sistem. Penggunaan inverter berkualitas tinggi berkontribusi pada pengurangan harmonik yang lebih baik. Algoritma yang AI yang tepat sangat penting untuk mencapai hasil optimal dalam pengurangan THD. Metode seperti Genetic Algorithm dan Fuzzy Logic juga menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam simulasi [24]. Analisis data perbandingan kinerja berbagai metode AI yang dijelaskan pada tabel 1 berikut. Evaluasi efektivitas dalam mengurangi THD, identifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja PV.

Tabel 1. Kinerja Berbagai Metode AI Pada THD [20]

Metode AI	Kelebihan	Kekurangan	Aplikasi Potensial
Jaringan Saraf Tiruan (ANN)	Fleksibel, mampu memodelkan hubungan nonlinear yang kompleks. Akurasi tinggi, terutama untuk data yang besar dan	Membutuhkan data pelatihan yang besar dan berkualitas. Proses pelatihan dapat memakan waktu lama. Model yang kompleks sulit diinterpretasi. Rentan overfitting.	Deteksi dan pengurangan THD secara real-time, prediksi kualitas daya, identifikasi sumber

	kompleks. Dapat digunakan untuk prediksi dan klasifikasi.		gangguan harmonik.
Support Vector Machine (SVM)	Efektif untuk data berdimensi tinggi. Mampu menangani data non-linear. Generalisasi baik, cocok untuk data dengan jumlah sampel terbatas.	Pemilihan kernel yang tepat sangat penting. Kurang fleksibel untuk data yang sangat kompleks.	Klasifikasi jenis harmonik, deteksi anomali dalam data kualitas daya.
Random Forest	Akurat, stabil, dan mampu menangani data dengan berbagai jenis fitur. Relatif mudah diimplementasikan.	Model kompleks, sulit diinterpretasi. Membutuhkan banyak sumber daya komputasi untuk data besar.	Deteksi dan pengurangan THD, pemilihan fitur penting dalam data kualitas daya.
Deep Learning (CNN, RNN)	Ekstraksi fitur tingkat tinggi yang kuat. Mampu menangani data yang sangat besar dan kompleks. Prestasi sangat baik dalam pengenalan pola.	Membutuhkan perangkat keras yang kuat dan waktu pelatihan yang lama. Model kompleks, sulit diinterpretasi. Rentan overfitting.	Deteksi anomali, prediksi beban, klasifikasi jenis beban, pengenalan pola dalam data kualitas daya.
Hybrid Methods	Menggabungkan kekuatan dari berbagai metode. Dapat meningkatkan akurasi dan fleksibilitas.	Kompleksitas implementasi lebih tinggi. Membutuhkan penyetelan parameter yang lebih hati- hati.	Solusi yang lebih komprehensif untuk masalah yang kompleks, seperti deteksi dan pengurangan THD secara simultan dengan prediksi beban.

4. PEMBAHASAN

Analisis Pengurangan THD hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode kecerdasan buatan, khususnya Jaringan Saraf Tiruan (ANN), berhasil menurunkan Total Harmonic Distortion (THD) dalam sistem fotovoltaik. Sebelum penerapan metode ini, nilai THD tercatat sebesar 15,35%, yang mencerminkan adanya distorsi harmonik yang signifikan akibat penggunaan inverter dan beban non-linier. Setelah implementasi ANN, nilai THD berhasil diturunkan menjadi 3,5%. Penurunan ini menunjukkan efektivitas metode AI dalam

mengidentifikasi dan mengatasi harmonik yang dihasilkan oleh inverter. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa teknik pembelajaran mesin dapat secara efektif mengurangi harmonik dalam sistem tenaga listrik. Peningkatan Efisiensi Energi penelitian ini juga mencatat peningkatan efisiensi sistem dari 75% menjadi 89% setelah penerapanmetode AI. Peningkatan efisiensi ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan bahwa pengurangan THD berkontribusi pada peningkatan kualitas daya dan efisiensi energi sistem fotovoltaik. Dengan pengelolaan harmonik yang lebih baik melalui algoritma AI, sistem tidak hanya lebih stabil tetapi juga lebih mampu menghasilkan daya bersih yang lebih tinggi. Stabilitas sistem penerapan metode AI berkontribusi positif terhadap stabilitas sistem. Data menunjukkan penurunan frekuensi gangguan hingga 60% setelah penerapan solusi berbasis AI. Ini mendukung teori bahwa kontrol aktif yang diterapkan melalui algoritma AI dapat membantu menjaga kestabilan sistem meskipun terdapat fluktuasi dalam beban atau kondisi lingkungan. Dengan demikian, stabilitas sistem menjadi lebih terjamin, yang penting untuk integrasi sistem fotovoltaik ke dalam jaringan listrik.

Faktor yang mempengaruhi hasil beberapa faktor mempengaruhi hasil penelitian ini kondisi lingkungan, variasi radiasi matahari dan suhu berpengaruh terhadap kinerja sistem. Meskipun demikian, kemampuan AI untuk menyesuaikan pengoperasian inverter membantu meminimalkan dampak negatif dari perubahan kondisi tersebut. Kualitas inverter dan komponen lainnya berperan penting dalam menentukan tingkat THD dan efisiensi sistem. Penggunaan inverter berkualitas tinggi berkontribusi pada pengurangan harmonik yang lebih baik. Algoritma yang digunakan pemilihan sangat penting untuk mencapai hasil optimal dalam pengurangan THD. Penelitian ini menemukan bahwa kombinasi teknik seperti Genetic Algorithm dan Fuzzy Logic dapat memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional. Implikasi epistemologis penelitian ini tidak hanya memberikan solusi teknis tetapi juga membuka diskusi mengenai implikasi epistemologis dari penggunaan AI dalam sistem energi. Dengan menerapkan pendekatan berbasis fisika untuk meningkatkan interpretabilitas model AI, kita dapat memahami mekanisme di balik prediksi model dengan lebih baik. Ini menunjukkan potensi AI untuk membantu kita memahami sistem kompleks seperti energi dengan cara baru dan mendalam. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan metode AI secara lebih luas dalam sistem fotovoltaik untuk mencapai pengurangan THD yang lebih signifikan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi algoritma AI yang lebih canggih serta aplikasinya dalam berbagai kondisi lingkungan. Dengan hasil penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya dalam meningkatkan kinerja sistem fotovoltaik. Pembahasan di atas menyajikan analisis mendalam tentang hasil penelitian, mengaitkannya dengan teori dan penelitian sebelumnya serta faktor-faktor yang mempengaruhi hasil tersebut.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penerapan metode kecerdasan buatan, khususnya Jaringan Saraf Tiruan (ANN), secara signifikan dapat mengurangi Total Harmonic Distortion (THD) dalam sistem fotovoltaik. Sebelum penerapan metode ini, nilai THD tercatat sebesar 15,35%, yang mengindikasikan adanya distorsi harmonik yang tinggi. Setelah implementasi

ANN, nilai THD berhasil diturunkan menjadi 3,5%. Selain itu, efisiensi sistem meningkat dari 75% menjadi 89%, menunjukkan bahwa pengelolaan harmonik yang lebih baik melalui algoritma AI tidak hanya meningkatkan kualitas daya tetapi juga output energi. Penerapan metode AI juga berkontribusi pada peningkatan stabilitas sistem, dengan penurunan frekuensi gangguan hingga 60%. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol aktif yang diterapkan melalui algoritma AI dapat menjaga kestabilan sistem meskipun terdapat fluktuasi dalam beban atau kondisi lingkungan. Faktor-faktor seperti kualitas peralatan dan pemilihan algoritma yang tepat sangat mempengaruhi hasil penelitian ini. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya dalam meningkatkan kinerja sistem fotovoltaik. Oleh karena itu, disarankan untuk menerapkan metode AI secara lebih luas dalam sistem PV dan melakukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi algoritma AI yang lebih canggih serta aplikasinya dalam berbagai kondisi lingkungan. Penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi teknis tetapi juga membuka jalan bagi pemahaman yang lebih baik tentang sistem energi yang kompleks melalui pendekatan epistemologis.

REFERENSI

[1] S. Mondal, S. P. Biswas, M. R. Islam, and S. M. Muyeen, “A Five-Level Switched-Capacitor Based Transformerless Inverter with Boosting Capability for Grid-Tied PV Applications,” IEEE Access, vol. 11, no. February, pp. 12426–12443, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3241927

[2] M. R. Al Haqq, I. Chlissodin, and A. A. Soebroto, “Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam Kondisi Berbayang Sebagian dengan Particle Swarm Optimization (PSO),” Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput., vol. 5, no. 8, pp. 3524–3537, 2021, [Online]. Available: http://j-197ptiik.ub.ac.id

[3] K. Narasimman, V. Gopalan, A. K. Bakthavatsalam, P. V Elumalai, M. Iqbal Shajahan, and J. Joe Michael, “Modelling and real time performance evaluation of a 5 MW grid-connected solar photovoltaic plant using different artificial neural networks,” Energy Convers. Manag., vol. 279, p. 116767, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116767

[4] N. V. Kurdkandi et al., “A New Six-Level Transformer-Less Grid-Connected Solar Photovoltaic Inverter with Less Leakage Current,” IEEE Access, vol. 10, no. Cmv, pp. 63736–63753, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3182240

[5] N. I. Nahin, S. P. Biswas, S. Mondal, M. R. Islam, and S. M. Muyeen, “A Modified PWM Strategy with an Improved ANN Based MPPT Algorithm for Solar PV Fed NPC Inverter Driven Induction Motor Drives,” IEEE Access, vol. 11, no. June, pp. 70960–70976, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291339

[6] T. A. H. Alghamdi, O. T. E. Abdusalam, F. Anayi, and M. Packianather, “An artificial neural network based harmonic distortions estimator for grid- connected power converter-based applications,” Ain Shams Eng. J., vol. 14, no. 4, p. 101916, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101916

[7] S. R. Khasim, C. Dhanamjayulu, S. Padmanaban, J. B. Holm-Nielsen, and M. Mitolo, "A Novel Asymmetrical 21-Level Inverter for Solar PV Energy System with Reduced Switch Count," IEEE Access, vol. 9, pp. 11761–11775, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051039

[8] L. Trinchini and R. Baggio, "Digital Sustainability: Ethics, Epistemology, Complexity and Modelling," First Monday, 2023, doi: https://doi.org/10.5210/fm.v28i9.12934

[9] J. H. Choi, U. M. Choi, and F. Blaabjerg, "Hybrid Pulse Width Modulation for Improving Reliability of DC-Link Capacitors of NPC Inverter in Photovoltaic Systems," IEEE Access, vol. 12, no. February, pp. 18752–18763, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3359231

[10] V. Anand, V. Singh, J. Sathik, and D. Almakhles, "Single-stage Five-level Common Ground Transformerless Inverter with Extendable Structure for Centralized Photovoltaics," CSEE J. Power Energy Syst., vol. 9, no. 1, pp. 37–49, 2023, doi: https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2022.02700

[11] Q. Paletta et al., "Advances in solar forecasting: Computer vision with deep learning," Adv. Appl. Energy, vol. 11, p. 100150, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100150

[12] N. F. Ibrahim et al., "Operation of Grid-Connected PV System with ANN-Based MPPT and an Optimized LCL Filter Using GRG Algorithm for Enhanced Power Quality," IEEE Access, vol. 11, no. 226 September, pp. 106859–106876, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3317980

[13] F. Chakir, A. El Magri, R. Lajouad, M. Kissaoui, M. Chakir, and O. Bouattan, "Enhanced Standalone Photovoltaic System with Novel Multi-Level Inverter and Nonlinear Control for Improved THD and Converter Efficiency," IFAC-PapersOnLine, vol. 58, no. 13, pp. 478–483, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.528

[14] R. A. Fahim et al., "Improved Switching Technique to Mitigate THD and Power Loss of NPC Inverters," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 34, no. 8, pp. 1–5, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3420303

[15] B. Bhattacharjee, P. K. Sadhu, A. Ganguly, A. K. Naskar, and S. P. Bihari, "Photovoltaic integrated optimized energy storage drives for electric vehicles," J. Energy Storage, vol. 98, p. 113098, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113098

[16] R. Boopathi and V. Indragandhi, "Experimental Investigations on Photovoltaic Interface Neutral Point Clamped Multilevel Inverter-Based Shunt Active Power Filter to Enhance Grid Power Quality," IEEE Access, vol. 12, no. June, pp. 74482–74498, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405533

[17] G. Anusha, K. Arora, H. Sharma, S. P. Thota, G. P. Joshi, and W. Cho, "Control strategies of 15-level modified cascaded H-bridge MLI with solar PV and energy storage system," Energy Reports, vol. 12, pp. 2–26, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.003

[18] A. Jaiswal, S. sachan, and S. Deb, "A novel technique to detect and mitigate harmonic during islanding in grid connected PV system," Energy Reports, vol. 12, pp. 3940–3956, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.064

[19] Y. Y. Ghadi, M. S. Iqbal, M. Adnan, K. Amjad, I. Ahmad, and U. Farooq, "An Improved Artificial Neural Network-Based Approach for Total Harmonic Distortion Reduction in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters," IEEE Access, vol. 11, pp. 127348–127363, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3332245

[20] A. Sabry, Z. M. Mohammed, F. H. Nordin, N. H. Nik Ali, and A. S. Al-Ogaili, "Single-Phase Grid-Tied Transformerless Inverter of Zero Leakage Current for PV System," IEEE Access, vol. 8, pp. 4361–4371, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963284

[21] B. Bai, S. Xiong, X. Ma, and X. Liao, "Assessment of floating solar photovoltaic potential in China," Renew. Energy, vol. 220, p. 119572, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119572

[22] S. K. Yadav, B. Singh, and N. Mishra, "Real-time harmonics optimization of seven level converter for megawatt scale solar PV-utility integration," e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy, vol. 9, p. 100705, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100705

[23] M. Sravani and P. V. S. Sobhan, "Performance evaluation of solar PV integrated with custom power device under various load conditions," e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy, vol. 10, p. 100843,2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100843

[24] B. Maroua, Z. Laid, H. Benbouhenni, M. Fateh, N. Debdouche, and I. Colak, "Robust type 2 fuzzy logic 262control microgrid-connected photovoltaic system with battery energy storage through multi-functional voltage source inverter using direct power control," Energy Reports, vol. 11, pp. 3117–3134, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.02.047