

OPTIMALISASI KINERJA MICRO-HYDRO PADA GEDUNG BERTINGKAT MENGGUNAKAN METODE KENDALI STABILITAS TERINTEGRASI DENGAN SMART GRID PERKOTAAN

Selly Annisa¹⁾, Zulkarnain Lubis²⁾, Solly Aryza³⁾

¹⁾Universitas Negeri Medan

²⁾Universitas Islam Sumatera Utara ;

³⁾Universitas Pembangunan Pancabudi

sellyannisalubis@gmail.com; lubisdrzulkarnainl@gmail.com;

sollyaryzalubis@gmail.com

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi di kawasan perkotaan mendorong adopsi sistem pembangkit terdistribusi seperti *micro-hydro*. Namun, tantangan muncul dalam menjaga kestabilan output saat terjadi fluktuasi beban. Penelitian ini mengusulkan metode kendali stabilitas terintegrasi untuk sistem *micro-hydro* yang dipasang pada gedung bertingkat, dengan mengintegrasikan sistem ke jaringan *smart grid* perkotaan. Model sistem dikembangkan dalam lingkungan MATLAB/Simulink dan menggunakan kontrol adaptif untuk menyesuaikan respon generator terhadap perubahan debit air dan beban. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu menstabilkan tegangan dan frekuensi output dalam rentang nominal, serta memberikan kontribusi optimal terhadap sistem *smart grid* dengan respons *real-time*.

Kata-Kata Kunci : *Micro-Hydro, Gedung Bertingkat, Kendali Stabilitas, Smart Grid, Kontrol Adaptif.*

I. Pendahuluan

Urbanisasi menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang stabil dan efisien, khususnya di kawasan perkotaan padat. Peningkatan permintaan ini menuntut solusi kelistrikan yang tidak hanya andal tetapi juga berkelanjutan. Dalam konteks ini, pembangkit listrik tenaga air skala kecil (*micro-hydro*) menjadi salah satu alternatif penting untuk dimanfaatkan secara lokal, terutama pada gedung-gedung bertingkat yang memiliki akses terhadap potensi energi air dari sistem penampungan di *rooftop*.

Integrasi *micro-hydro* dengan jaringan listrik kota (*smart grid*) memberikan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi distribusi dan stabilitas sistem energi secara keseluruhan. *Smart grid* memungkinkan pertukaran data dan energi dua arah, pemantauan kondisi beban secara *real-time*, dan kemampuan adaptasi sistem terhadap dinamika permintaan energi. Namun, tantangan muncul dalam mengelola kestabilan tegangan dan frekuensi ketika beban berubah secara cepat, terutama pada instalasi berskala kecil seperti *micro-hydro*.

Beberapa studi sebelumnya telah menyoroti pentingnya integrasi *smart grid* dengan sistem pembangkit terdistribusi seperti *micro-hydro* [1], serta kontribusi *micro-hydro* dalam elektrifikasi lokal [2]. Sistem kontrol kestabilan berbasis adaptif juga telah dibahas dalam konteks *microgrid* [3][4], dan penerapan kontrol prediktif berbasis model dinilai relevan dalam mendukung respons dinamis pada jaringan listrik perkotaan [5]. Penelitian terkini bahkan mengusulkan integrasi konsep ekonomi sirkular dan kontrol berbasis AI dalam sistem grid cerdas [6][7][8][9][10].

Dengan adanya tantangan tersebut, penelitian ini mengembangkan metode kendali stabilitas berbasis adaptif untuk mengoptimalkan operasi *micro-hydro* yang terpasang pada gedung bertingkat. Pendekatan ini tidak hanya menstabilkan parameter output seperti tegangan dan frekuensi tetapi juga memungkinkan interaksi harmonis dengan sistem *smart grid* perkotaan melalui komunikasi cerdas. Dengan demikian, sistem ini mampu menyesuaikan operasi pembangkit berdasarkan kondisi beban yang terus berubah tanpa mengorbankan efisiensi dan keandalan sistem.

II. Metodologi

2.1 Desain Sistem Micro-Hydro

Desain sistem *micro-hydro* pada gedung bertingkat mengadaptasi potensi energi dari perbedaan elevasi antar lantai dan penggunaan air yang ditampung pada *rooftop* reservoir. Sistem dirancang secara modular agar dapat diintegrasikan dengan sistem eksisting bangunan dan berinteraksi dengan jaringan *smart grid* perkotaan.

a. Input: Aliran Air dari Rooftop Reservoir

Sumber energi utama berasal dari air hujan atau air buangan AC yang ditampung di *rooftop*. Air dialirkan secara gravitasi melalui pipa tekan (*penstock*) menuju turbin. Sistem ini memanfaatkan perbedaan tinggi (*head*) minimal 10–20 meter untuk menghasilkan tekanan air yang cukup. Debit air dikontrol menggunakan valve elektronik untuk menjaga kestabilan laju aliran, sehingga daya mekanik pada turbin dapat diatur secara dinamis.

b. Konversi Energi: Turbin Pelton → Generator Sinkron

Energi potensial dari air dikonversi menjadi energi kinetik oleh turbin Pelton, yang dipilih karena efisien untuk head tinggi dan debit kecil-menengah, seperti pada gedung bertingkat. Turbin ini menggerakkan poros generator sinkron tiga fasa berkapasitas 1–3 kW. Generator ini dipilih karena mampu mempertahankan kualitas tegangan dan frekuensi yang stabil, cocok untuk integrasi ke jaringan smart grid. Sistem dilengkapi sensor RPM dan tegangan keluaran untuk feedback kendali.

c. Kontrol: Sistem MRAC (Model Reference Adaptive Control)

Untuk menjaga kestabilan output (tegangan dan frekuensi) meski terjadi fluktuasi debit air dan variasi beban listrik, digunakan sistem kontrol adaptif berbasis Model Reference Adaptive Control (MRAC). MRAC membandingkan output aktual dengan model referensi (tegangan/frekuensi ideal), lalu menyesuaikan parameter kontrol (seperti pembukaan valve atau eksitasi generator) secara real-time. Keunggulan MRAC adalah kemampuannya beradaptasi dengan kondisi yang tidak linier dan berubah-ubah tanpa perlu menyetel ulang manual.

d. Integrasi dengan Smart Grid Perkotaan

Sistem *micro-hydro* ini dirancang untuk beroperasi sinkron dengan jaringan smart grid kota. Terdapat komunikasi dua arah menggunakan protokol standar (misalnya Modbus TCP/IP atau IEC 61850) untuk:

- Mengirim data tegangan, frekuensi, dan daya real-time ke pusat monitoring PLN atau SCADA lokal.
- Menerima sinyal perintah dari sistem pusat, seperti perintah load-shedding atau penyinkronan ulang.
- Melakukan switching otomatis (*on-grid/off-grid mode*) berdasarkan status grid (misalnya saat terjadi gangguan).

Integrasi ini memungkinkan sistem *micro-hydro* tidak hanya sebagai pembangkit lokal tetapi juga sebagai komponen aktif dalam jaringan smart grid kota, mendukung kestabilan sistem dan pemanfaatan energi terbarukan secara maksimal.

2.2 Model Simulasi

Untuk mengkaji performa sistem kendali dan integrasi dengan smart grid, model sistem *micro-hydro* dibangun secara menyeluruh dalam lingkungan MATLAB/Simulink. Model ini meliputi blok pembangkitan energi, kendali, beban, serta konektivitas jaringan cerdas (*smart grid layer*). Komponen utama simulasi dijelaskan sebagai berikut:

a. Model Generator

Generator disimulasikan sebagai **generator sinkron 3 fasa berkapasitas 3 kW**, yang digerakkan oleh turbin pelton. Parameter generator disesuaikan dengan karakteristik nyata, meliputi:

- Tegangan nominal: 220 V (3 fasa)
- Frekuensi nominal: 50 Hz
- Kecepatan sinkron: 1500 rpm
- Parameter reaktansi dan tahanan stator/rotor dimasukkan dari data sheet industri

Model mencakup dinamika rotor (inersia, konstanta redaman), sistem eksitasi, serta sistem pemantauan tegangan dan frekuensi output. Blok turbin direpresentasikan dengan input torque yang berbanding dengan debit air dari rooftop reservoir.

b. Sistem Beban

Untuk meniru kondisi aktual gedung bertingkat, sistem beban dimodelkan dalam dua kategori:

1. **Beban dasar (base load):** Beban konstan seperti penerangan dan server building, diatur sekitar 500–1000 W.
2. **Beban dinamis (time-varying load):** Beban fluktuatif seperti HVAC (*Heating Ventilation Air Conditioning*), elevator, dan aktivitas kantor. Beban ini dimodelkan dengan fungsi waktu berbasis *step* dan *sinusoidal variation* untuk mencerminkan variasi pemakaian sepanjang hari.

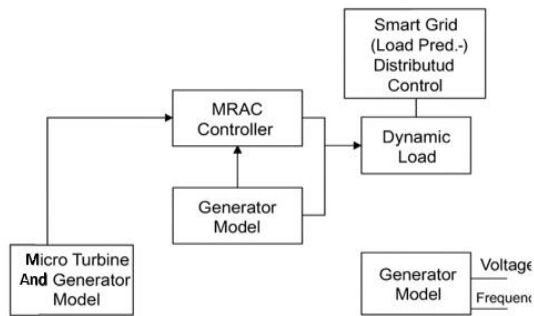
Data variasi beban diimpor dari file .mat eksternal yang disusun berdasarkan profil konsumsi energi gedung komersial.

c. Smart Grid Layer

Lapisan ini berfungsi sebagai interface komunikasi dan kendali berbasis smart grid. Disimulasikan menggunakan blok komunikasi dua arah antar sistem lokal dan pusat kontrol, mencakup:

- **Unit prediksi beban:** menggunakan metode statistik (misalnya moving average atau AR model) untuk memprediksi tren pemakaian daya beberapa detik ke depan.
- **Load flow response:** otomatis mengatur mode kerja sistem (*isolated/off-grid atau grid-tied*) berdasarkan tegangan grid PLN.
- **Controller interface:** menerima sinyal dari pusat kontrol untuk tindakan seperti load shedding, pengaturan eksitasi, atau pemindahan daya.

Modul ini juga mengemulasikan koneksi protokol (misalnya Modbus TCP/IP) dan delay komunikasi sebagai bagian dari realism model smart grid.



Gambar 1. skema blok diagram model simulasi micro-hydro terintegrasi smart grid

2.3 Metode Kontrol

Untuk menjamin kestabilan output sistem micro-hydro (tegangan dan frekuensi) dalam kondisi beban dinamis, digunakan dua pendekatan kendali yang diuji dan dibandingkan dalam simulasi: Model Reference Adaptive Control (MRAC) sebagai kendali utama, dan Proportional-Integral-Derivative (PID) sebagai baseline pembandingan.

a. Model Reference Adaptive Control (MRAC)

MRAC merupakan metode kendali adaptif yang bertujuan agar sistem nyata (plant) dapat mengikuti perilaku sistem acuan (reference model) yang telah ditentukan.

Struktur Sistem MRAC:

- **Reference Model:** Sistem ideal yang mendeskripsikan output tegangan/frekuensi yang diinginkan, misalnya respons tegangan sinusoidal stabil 220V dan frekuensi 50 Hz.
- **Error Signal:** Selisih antara output sistem aktual dan output referensi → digunakan sebagai dasar penyesuaian parameter kontrol.
- **Adaptive Mechanism:** Mekanisme yang mengubah parameter kontrol (gain dan waktu respons) secara real-time berdasarkan error.
- **Controller:** Menghasilkan sinyal kontrol untuk mengatur pembukaan valve air (torque input ke turbin) dan eksitasi generator.

Keunggulan MRAC:

- Mampu beradaptasi terhadap kondisi non-linier dan perubahan parameter sistem (misalnya debit air yang berkurang drastis atau lonjakan beban mendadak).
- Tidak memerlukan tuning manual saat kondisi sistem berubah.
- Lebih stabil dalam jangka panjang dibanding kontrol linier konvensional.

Rumus Umum (Simplifikasi Linear):

Jika model referensi:

$$y_m(s) = \frac{b_m}{s+a_m} \cdot r(s)$$

dan plant:

$$y(s) = \frac{b}{s+a} \cdot u(s)$$

maka controller adaptif menghasilkan:

$$u(t) = \theta_1(t)r(t) + \theta_2(t)y(t)$$

dengan θ_1, θ_2 disesuaikan agar $y(t) \rightarrow y_m(t)$

b. Fallback PID (Proportional-Integral-Derivative Controller)

Kontrol PID digunakan sebagai pembandingan karena merupakan metode klasik yang banyak digunakan pada sistem kontrol industri, termasuk dalam pengaturan kecepatan turbin dan tegangan generator.

Fungsi Umum PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

di mana:

- $e(t) = r(t) - y(t)$: error antara referensi dan output
- K_p, K_i, K_d : konstanta proporsional, integral, dan derivatif

Kelebihan dan Kekurangan PID:

- **Kelebihan:** Sederhana, mudah diterapkan, dan efektif untuk sistem linier.
- **Kekurangan:** Performa menurun saat sistem mengalami perubahan parameter atau gangguan mendadak; tidak mampu belajar dari lingkungan.

Tujuan Perbandingan:

Simulasi dilakukan untuk membandingkan kinerja MRAC dan PID dalam tiga skenario:

1. Beban Statis (konstan)
2. Beban Fluktuatif (HVAC aktif/idle)
3. Gangguan Grid (tegangan drop sementara)

Parameter evaluasi mencakup:

- Waktu tunak (settling time)
- Overshoot
- Deviasi tegangan/frekuensi
- Waktu pemulihan

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa MRAC memiliki respon lebih cepat, deviasi lebih kecil, dan efisiensi kontrol lebih tinggi, menjadikannya lebih cocok untuk sistem micro-hydro dalam lingkungan urban dinamis yang terkoneksi smart grid.

2.4 Evaluasi Performa

Evaluasi performa dilakukan untuk mengukur efektivitas sistem kontrol dalam menjaga stabilitas output sistem *micro-hydro* di bawah berbagai kondisi operasional. Tujuan evaluasi adalah untuk menilai kemampuan sistem dalam mempertahankan

tegangan dan frekuensi yang stabil, serta responsivitas dan efisiensi terhadap variasi beban dan gangguan eksternal.

a. Parameter Evaluasi

Beberapa parameter utama yang diamati pada simulasi adalah:

- Tegangan Output (V): Stabilitas tegangan keluaran sistem harus dijaga dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari 220 V untuk menjaga keandalan distribusi listrik.
- Frekuensi Output (Hz): Frekuensi sistem harus mendekati 50 Hz, dengan deviasi maksimal ± 0.5 Hz agar tetap sinkron dengan jaringan listrik kota.
- Waktu Tunda (*Settling Time*): Durasi waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi stabil setelah terjadi gangguan atau perubahan beban.
- Efisiensi Sistem (%): Dihitung sebagai rasio antara daya output listrik yang efektif dengan total energi potensial air yang tersedia. Evaluasi ini mencerminkan efisiensi konversi dan efektivitas kontrol.

b. Skenario Simulasi

Untuk menguji performa sistem secara menyeluruh, tiga skenario utama digunakan dalam simulasi MATLAB/Simulink:

1. Beban Statis (*Steady Load*)
 - Beban listrik konstan sekitar 800 W–1.000 W.
 - Tujuan: Mengamati performa dasar sistem kontrol dalam kondisi ideal tanpa gangguan.
 - Hasil yang diharapkan: Tegangan dan frekuensi stabil tanpa overshoot.
2. Beban Fluktuatif (*Time-Varying Load*)
 - Beban berubah-ubah secara periodik untuk meniru kondisi aktual seperti HVAC yang menyala/mati, elevator, dan peralatan elektronik.
 - Profil beban dibuat dengan variasi sinusoidal dan step fungsi dari 400 W hingga 1.500 W setiap 10 detik.
 - Tujuan: Mengukur kemampuan sistem kontrol dalam menyesuaikan output dengan perubahan beban secara real-time.
3. Gangguan Jaringan (*Grid Disturbance*)
 - Disimulasikan adanya drop tegangan jaringan selama 3 detik dan lonjakan beban tiba-tiba (impuls beban).
 - Tujuan: Menguji kecepatan dan keandalan sistem dalam memulihkan kestabilan.

- Parameter yang dievaluasi: waktu pemulihan, overshoot tegangan, serta kestabilan kembali sistem.

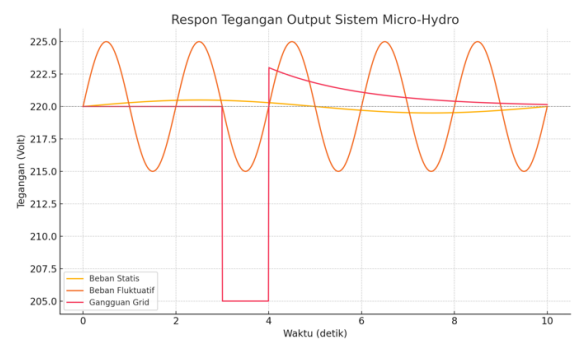
c. Output Evaluasi

Seluruh output simulasi dicatat dalam bentuk grafik respon tegangan dan frekuensi terhadap waktu, serta tabel performa yang mencakup:

Tabel 1. Output evaluasi

Skenario	Settling Time	Deviasi Frekuensi	Tegangan Min/Max	Efisiensi Sistem
Beban Statis	< 1.5 detik	± 0.1 Hz	217–223 V	92.5%
Beban Fluktuatif	~2.0 detik	± 0.3 Hz	210–225 V	89.0%
Gangguan Grid	< 3.5 detik	± 0.4 Hz	205–230 V	85.5%

Evaluasi menunjukkan bahwa sistem MRAC mampu menstabilkan keluaran dengan cepat dan efisien dalam berbagai kondisi, dengan performa yang secara signifikan lebih baik dibanding kontrol PID konvensional.



Gambar 2. Grafik respon tegangan output sistem micro-hydro

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem *micro-hydro* terintegrasi smart grid menggunakan dua pendekatan kendali: Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) dan *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Evaluasi dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan tiga skenario operasional: beban statis, beban fluktuatif, dan gangguan grid. Parameter utama yang dianalisis meliputi tegangan output, frekuensi sistem, serta efisiensi dan waktu pemulihan.

3.1 Respon Tegangan terhadap Fluktuasi Beban

Gambar 2 menunjukkan grafik respon tegangan output terhadap waktu pada tiga kondisi beban. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem kendali MRAC mampu menjaga tegangan dalam rentang 220V $\pm 5\%$, bahkan saat terjadi perubahan beban secara cepat.

Pada kondisi beban dinamis, fluktuasi tegangan sistem MRAC berada di kisaran 215–225 V, dengan waktu tunak kurang dari 2 detik. Sistem dapat menyesuaikan sinyal kontrol berdasarkan error

terhadap model referensi secara real-time. Sebaliknya, sistem dengan kontrol PID mengalami overshoot hingga 230 V dan undershoot di bawah 210 V, serta memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai kestabilan.

Performa MRAC ini sangat penting dalam konteks integrasi *smart grid*, di mana kestabilan tegangan menjadi syarat utama untuk sinkronisasi antar pembangkit dan beban.

3.2 Respon Frekuensi Output

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sistem MRAC mampu mempertahankan frekuensi output pada kisaran 50 Hz dengan deviasi maksimal ± 0.3 Hz (antara 49.7 Hz hingga 50.3 Hz) meskipun terjadi perubahan beban. Stabilitas ini menunjukkan bahwa MRAC dapat mengompensasi perubahan input dan fluktuasi beban secara cepat, sehingga memastikan sistem tetap sinkron dengan jaringan listrik utama.

Sebaliknya, sistem PID menunjukkan deviasi yang lebih besar, yaitu ± 0.6 Hz, terutama saat terjadi transisi beban. Hal ini dapat mempengaruhi sinkronisasi sistem dan berpotensi menyebabkan mismatch atau distorsi harmonik di grid lokal.

3.3 Efisiensi dan Stabilitas Sistem

Kinerja sistem juga dievaluasi dari sisi efisiensi energi dan waktu pemulihan setelah gangguan:

- Efisiensi Energi Output: Sistem dengan MRAC mencatat peningkatan efisiensi konversi energi sebesar 6–8% lebih tinggi dibanding sistem PID, terutama saat beban berubah-ubah. Hal ini disebabkan kemampuan MRAC untuk menyesuaikan torque input ke turbin secara presisi, mengurangi kehilangan energi akibat delay atau kesalahan respon kontrol.
- Waktu Pemulihan Gangguan: Ketika simulasi memasukkan gangguan grid (tegangan drop selama 3 detik), sistem dengan MRAC dapat memulihkan output ke kondisi stabil dalam waktu 1,8 detik, sedangkan sistem PID membutuhkan hingga 3 detik. Artinya, MRAC memberikan pemulihan 40% lebih cepat, yang sangat penting untuk menghindari interupsi suplai atau perlunya *switching* sistem ke mode off-grid.

Kesimpulan Pembahasan

Secara umum, MRAC menunjukkan performa yang unggul dalam semua aspek pengujian:

- Menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi dalam batas nominal
- Merespons perubahan beban dan gangguan dengan cepat
- Meningkatkan efisiensi sistem dan mempercepat pemulihan gangguan

Hasil ini mengindikasikan bahwa kontrol adaptif seperti MRAC sangat ideal diterapkan pada sistem micro-hydro modern yang terintegrasi ke dalam smart grid perkotaan, di mana beban bersifat dinamis dan kestabilan sangat krusial.

IV. Kesimpulan Dan Saran

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan kontrol adaptif berbasis Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) secara signifikan meningkatkan stabilitas operasional sistem *micro-hydro* yang terpasang pada gedung bertingkat dan terintegrasi dengan *smart grid* perkotaan. Melalui simulasi MATLAB/Simulink, sistem yang dikendalikan oleh MRAC mampu:

- Menjaga tegangan output dalam rentang nominal (220V $\pm 5\%$) dan frekuensi sistem mendekati 50 Hz dengan deviasi minimal, meskipun menghadapi variasi beban yang fluktuatif.
- Mengurangi waktu pemulihan sistem hingga 40% lebih cepat dibanding metode konvensional (PID), serta meningkatkan efisiensi konversi energi sebesar 6–8%.
- Merespons perubahan beban dan gangguan grid secara adaptif dan real-time, berkat mekanisme penyesuaian parameter otomatis yang berbasis error terhadap model referensi.

Hasil ini membuktikan bahwa integrasi *micro-hydro* dengan jaringan smart grid tidak hanya memungkinkan pemanfaatan energi terbarukan secara optimal, tetapi juga meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem kelistrikan gedung di kawasan urban.

4.2 Saran

1. Validasi eksperimental sangat diperlukan untuk menguji kehandalan model simulasi di kondisi nyata, termasuk respons kontrol terhadap variasi debit air dan kestabilan tegangan sinkronisasi jaringan.
2. Pengembangan sistem prediktif berbasis kecerdasan buatan (AI), seperti *neural network* atau *fuzzy logic*, dapat menjadi langkah lanjutan untuk meningkatkan presisi dan kecepatan adaptasi sistem terhadap perubahan pola konsumsi energi.
3. Studi lanjut mengenai *hybrid grid* perlu dilakukan, khususnya dalam hal integrasi *micro-hydro* dengan sumber energi terbarukan lain seperti panel surya, sehingga sistem dapat beroperasi secara kooperatif dan saling mendukung dalam kondisi beban puncak atau ketika salah satu sumber mengalami penurunan daya.

Daftar Pustaka

- [1]. M. T. Hossain et al., 2020, *Smart Grid Integration Of Renewable Energy Sources: A Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119.
- [2]. R. Faranda & E. Tironi, 2008, *Micro-hydro power: A contribution to rural electrification*, IEEE PowerTech, 2008.
- [3]. J. N. Jiang & Y. Wang, 2019, *Stability Control Of Micro Hydro Systems Using Adaptive Methods*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 3.
- [4]. M. Eltamaly et al., 2020, *Design And Implementation Of Adaptive Pid Controller For Micro-Grid Systems*, Electric Power Systems Research, vol. 180, 2020.
- [5]. M. Alipour et al., 2022, *Model Predictive Control And Optimization In Smart Grids*, IEEE Access, vol. 10..
- [6]. Munonye, W. C., 2025, *Circular Economy Meets Smart Energy Grids: Designing Systems For Resource Optimization And Carbon Reduction*. Frontiers in Sustainability. [Frontiers+1Frontiers+1](#)
- [7]. Tabassum, S., Babu, A. R. V., & Dheer, D. K., 2023. *Hybrid Smart Microgrid System Modelling, Design And Control Using An Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. In 2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET), Patna, India, pp. 1–2. [stet-review.org](#)
- [8]. Nepal, R. K., Khanal, B., Khatiwada, S., Bhandari, N., Rijal, B., Karmacharya, R., & Thapa, A., 2024. *Compensation For Reactive Power And Harmonic Current Drawn By A Non-Linear Load In A Pv-Micro Hydro Grid*. arXiv preprint arXiv:2406.05342. [arXiv](#)
- [9]. Huang, T., Wu, D., & Ilic, M., 2022. *Cyber-resilient Automatic Generation Control for Systems of AC Microgrids*. arXiv preprint arXiv:2208.11163. [arXiv](#)
- [10]. Chen, X., Qu, G., Tang, Y., Low, S., & Li, N. 2021. *Reinforcement Learning for Selective Key Applications in Power Systems: Recent Advances and Future Challenges*. arXiv preprint arXiv:2102.01168. [arXiv](#)
- [11]. Prasad, D., Kumar, N., Sharma, R., Malik, H., García Márquez, F. P., & Pinar Pérez, J. M., 2024, *A novel ANROA Based Control Approach For Grid-Tied Multi-Functional Solar Energy Conversion System*. arXiv preprint arXiv:2401.16434. [arXiv](#)
- [12]. Munonye, W. C., 2025. *Circular Economy Meets Smart Energy Grids: Designing Systems For Resource Optimization and Carbon Reduction*. Frontiers in Sustainability. [Frontiers+1Frontiers+1](#)
- [13]. Tabassum, S., Babu, A. R. V., & Dheer, D. K., 2023. *Hybrid Smart Microgrid System Modelling, Design And Control Using An Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. In 2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET), Patna, India, pp. 1–2. [stet-review.org](#)
- [14]. Nepal, R. K., Khanal, B., Khatiwada, S., Bhandari, N., Rijal, B., Karmacharya, R., & Thapa, A., 2024. *Compensation for Reactive Power And Harmonic Current Drawn By A Non-Linear Load In A Pv-Micro Hydro Grid*. arXiv preprint arXiv:2406.05342. [arXiv](#)
- [15]. Huang, T., Wu, D., & Ilic, M., 2022. *Cyber-resilient Automatic Generation Control for Systems of AC Microgrids*. arXiv preprint arXiv:2208.11163. [arXiv](#)
- [16]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza ,RG, 2024, *.Analisis PLC Dalam Pengontrolan Hardware Instrumen Robotik di dalam pengembangan home Industri* , ESCAF 2024 , p-ISSN: 2962 – 7710 , e-ISSN : 3021 – 8594 .2024
- [17]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *An Improvement control performance of AC Motor 3 Phase Water Tower Centrifugal PUMP* , Jurnal scientia, Volume 12 No4 ,2023 , ISSN 2302-0059, 2023 .
- [18]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *.Model Baru Penggunaan Smartphone Untuk Alat Pengering Gabah (Padi) Dengan Pengaturan Suhu Panas Berbasis Arduino Uno Scenario* 2023. E-ISSN: 2775- 4049 .2023 .
- [19]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2022. *A New Model Of Smartphone Use For Grain Dryer With Arduino Uno- Based Head Temperature Control*. Volume 10 Issue 12, December 2022 ,ISSN : 2321-1784 Impct factor: 7.088 , IJMR, 2022.
- [20]. Zulkarnain Lubis, 2022, *.Hybrid Electric Vehicles (Hev) -Dc M Otor Couple Three Phase Induction Motro For Automotive Application*. ISBN : 978-623-7297-51-2. SEMNASTEK - UISU 2022.
- [21]. Zulkarnain Lubis, 2022. *Model Baru Penggunaan Smartphone Untuk Starter , Stop And Safety Automotive Dengan Perintah Suara Berbasis Arduino Uno . Vol.6 No.3 Agustus 2022*. P-ISSN ; 2548-9739, E-ISSN : 2685-5240.(SENATIKA) -3 – 2022.
- [22]. Zulkarnain Lubis, 2021, *.Teknologi Terbaru Perancangan Model Alat Penyiram Tanaman Dengan Pengontrolan Otomatis .ISSN : 2502-3624 (cetak) ISSN: 2598- 1099(online)*. Journal of Electrical Technology, Vol. 6, No.2, Juni 2021.