



Pengaruh Penambahan Pembangkit Surya Terdistribusi terhadap Kestabilan Tegangan Jaringan

Yehezkiel Situmorang¹

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan

Tulus Sinaga²

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan

Albert Sebastian Siahaan³

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan

Desman Jonto Sinaga⁴

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan

Arwadi Sinuraya⁵

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan

Alamat: Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi Penulis: situmorangkiel45@email.com¹, tulussinaga042@gmail.com², albertsebas0209@gmail.com³, desmansinaga@unimed.ac.id⁴, arwadisinuraya@unimed.ac.id⁵

Abstract. Distributed solar generation is increasingly being implemented in modern distribution systems due to its ability to significantly improve energy efficiency while significantly reducing carbon emissions. However, high PV penetration often poses serious challenges to voltage stability due to the intermittent nature of solar irradiation, which causes power output frequency to fluctuate under various operating conditions. This study aims to analyze in depth the effect of PV integration on the voltage profile and operational stability of a 20 kV distribution network. The research methods include network modeling using Newton–Raphson power flow calculations and simulations of three penetration levels: 10%, 30%, and 50% of the load capacity. The results show that low to medium penetration can increase local voltage, reduce power losses, and improve the overall system operation quality. However, high penetration can cause overvoltage at network points with high impedance. Furthermore, variations in irradiation cause rapid and dynamic voltage changes. These findings emphasize the need for an appropriate voltage control strategy.

Keywords: Distributed Photovoltaic Generation, Voltage Stability, Overvoltage, Electricity Flow, Distribution System

Abstrak. Pembangkit surya terdistribusi semakin banyak diterapkan dalam sistem distribusi modern karena mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi karbon secara signifikan. Namun, penetrasi PV yang tinggi sering memunculkan tantangan serius terhadap kestabilan tegangan akibat sifat intermiten iradiasi matahari yang menyebabkan fluktuasi daya keluaran pada berbagai kondisi operasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam pengaruh integrasi PV terhadap profil tegangan serta stabilitas operasional pada jaringan distribusi 20 kV. Metode penelitian mencakup pemodelan jaringan menggunakan perhitungan aliran daya Newton–Raphson dan simulasi tiga tingkat penetrasi, yaitu 10%, 30%, dan 50% dari kapasitas beban. Hasil menunjukkan bahwa penetrasi rendah hingga menengah mampu meningkatkan tegangan lokal, mengurangi rugi-rugi daya, serta memperbaiki kualitas operasi sistem secara umum. Namun, penetrasi tinggi dapat menimbulkan overvoltage pada titik jaringan dengan impedansi besar. Selain itu, variasi iradiasi menimbulkan perubahan tegangan yang cepat dan dinamis. Temuan ini menegaskan perlunya strategi pengendalian tegangan yang tepat.

Kata kunci: Pembangkitan Fotovoltaik Terdistribusi, Kestabilan Tegangan, Tegangan Lebih, Aliran Listrik, Sistem Distribusi

LATAR BELAKANG

Pemanfaatan *distributed photovoltaic generation* pada sistem distribusi tenaga listrik mengalami peningkatan signifikan dalam satu dekade terakhir, seiring tuntutan global untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi sistem tenaga. Integrasi pembangkit surya terdistribusi menawarkan manfaat berupa suplai energi yang lebih bersih, pengurangan *losses*, serta peningkatan keandalan jaringan. Namun, karakteristik keluaran panel surya yang bergantung pada intensitas iradiasi matahari menyebabkan fluktuasi daya yang dapat mempengaruhi kestabilan tegangan pada jaringan distribusi. Kondisi ini menjadi perhatian penting bagi operator sistem tenaga, terutama pada jaringan 20 kV yang memiliki konfigurasi radial dan kepekaan tinggi terhadap perubahan tegangan di titik-titik tertentu.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas dampak penetrasi *photovoltaic* terhadap profil tegangan, namun sebagian besar studi hanya berfokus pada skenario kapasitas kecil atau tidak mengkaji variasi penetrasi secara bertingkat. Selain itu, masih terdapat keterbatasan pada analisis yang menghubungkan efek intermitensi iradiasi terhadap dinamika tegangan secara real-time. *Gap analysis* tersebut menunjukkan bahwa kajian yang mendalam mengenai pengaruh penetrasi PV dalam berbagai tingkat kapasitas terhadap kestabilan tegangan pada jaringan distribusi 20 kV sangat diperlukan, terutama yang mengikuti standar *IEEE 1547* dan *SPLN* yang berlaku.

Urgensi penelitian ini terletak pada meningkatnya integrasi pembangkit surya di berbagai wilayah, sehingga diperlukan pemahaman komprehensif mengenai batas aman penetrasi PV untuk menghindari *overvoltage*, ketidakseimbangan tegangan, dan gangguan operasional lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan pembangkit surya terdistribusi terhadap profil tegangan dan kestabilan operasi jaringan distribusi 20 kV melalui pemodelan dan simulasi *power flow* berbasis metode *Newton-Raphson* pada berbagai level penetrasi PV. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang kuat bagi perencanaan integrasi PV terdistribusi di masa depan.

KAJIAN TEORITIS

Integrasi *distributed photovoltaic generation* dalam sistem distribusi tenaga listrik berlandaskan pada teori dasar konversi energi matahari melalui modul *photovoltaic*. Modul PV bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu proses pembangkitan elektron akibat paparan energi foton pada material semikonduktor. Daya keluaran PV sangat dipengaruhi kondisi iradiasi matahari dan temperatur sehingga bersifat intermiten dan dinamis. Ketidakstabilan keluaran daya inilah yang menjadi faktor utama munculnya variasi tegangan pada jaringan distribusi.

Dalam kajian sistem tenaga listrik, analisis tegangan dan aliran daya dilakukan menggunakan metode *power flow*. Metode *Newton-Raphson* menjadi pendekatan utama karena memberikan konvergensi cepat dan akurasi tinggi dalam menghitung tegangan bus, aliran daya aktif, serta daya reaktif. Ketika PV diintegrasikan pada jaringan distribusi, terutama pada ujung *feeder* dengan impedansi tinggi, injeksi daya aktif dari PV

dapat menyebabkan *voltage rise* dan berpotensi menimbulkan *overvoltage* apabila penetrasi PV melampaui kapasitas serap jaringan. Fenomena ini telah dikaji dalam berbagai literatur, yang secara umum menyimpulkan bahwa semakin tinggi penetrasi PV, semakin besar pengaruhnya terhadap fluktuasi tegangan.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa integrasi PV skala kecil hingga menengah dapat meningkatkan profil tegangan pada beban ujung dan mengurangi rugi-rugi daya. Namun, studi-studi yang ada masih terbatas pada kondisi iradiasi yang statis atau hanya melakukan analisis pada satu tingkat penetrasi saja. Penelitian lain menekankan pentingnya strategi pengendalian tegangan seperti *Volt/VAR control*, *on-load tap changer*, dan pengaturan *inverter* sebagai solusi penanganan masalah *overvoltage*. Standar internasional *IEEE 1547* dan standar nasional *SPLN* turut memberikan acuan mengenai batas toleransi tegangan, kualitas daya, serta ketentuan integrasi pembangkit terdistribusi.

Dari berbagai penelitian terdahulu dapat diidentifikasi bahwa masih terdapat ruang penelitian pada aspek variasi penetrasi PV secara bertahap serta pengaruhnya terhadap kestabilan tegangan jaringan 20 kV dalam kondisi intermitensi iradiasi yang lebih realistis. Dengan merujuk pada teori karakteristik PV, standar kualitas daya, serta metode perhitungan *power flow*, kajian ini dilakukan untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai batas aman integrasi PV terdistribusi dan kontribusinya terhadap stabilitas operasional jaringan distribusi.

Teori Dasar Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Bagian ini mengulas konsep fundamental sistem distribusi sebagai landasan memahami dampak integrasi *distributed photovoltaic* (DPV).

1. Karakteristik Jaringan Distribusi Radial

Jaringan distribusi 20 kV umumnya memiliki struktur radial dengan aliran daya satu arah dari penyulang menuju beban. Karakteristik impedansi yang relatif tinggi pada penyulang membuat tegangan mudah mengalami penurunan (*voltage drop*) pada jarak jauh.

a) Pengaruh Impedansi terhadap Tegangan

Dalam sistem distribusi, perubahan tegangan dapat dijelaskan dengan persamaan sensitivitas:

$$\Delta V \approx R \cdot \Delta P + X \cdot \Delta Q$$

yang menunjukkan bahwa kenaikan injeksi daya aktif (ΔP) dari DPV dapat meningkatkan tegangan lokal terutama pada penyulang berimpedansi tinggi.

Teori Dasar *Distributed Photovoltaic* Generation

Bagian ini menjelaskan konsep kerja DPV dan peranannya dalam penyediaan daya di jaringan distribusi.

1. Karakteristik Output *Photovoltaic*

DPV menghasilkan daya aktif berdasarkan radiasi matahari dan memiliki sifat intermiten. Output bervariasi akibat perubahan awan, suhu modul, dan sudut datang cahaya.

a) Komponen Utama Sistem DPV

Sistem DPV terdiri dari modul PV, *inverter*, *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), serta titik koneksi jaringan (*Point of Common Coupling*).

- *Inverter* menentukan kontribusi daya aktif/reaktif
- MPPT mengoptimalkan daya sesuai kondisi iradiasi
- PCC menjadi titik kontrol tegangan dan arus

Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi

Stabilitas tegangan menilai kemampuan sistem menjaga tegangan dalam batas yang diterima di bawah kondisi operasi normal maupun gangguan.

1. Kriteria Stabilitas Tegangan

Menurut IEEE 1547, tegangan harus berada dalam rentang 0,95–1,05 pu. Gangguan ringan seperti lonjakan beban, perubahan iradiasi, atau arus balik (*reverse power flow*) dapat memicu ketidakstabilan.

a) Indikator Teknis Ketidakstabilan Tegangan

Indikator umum meliputi:

- *Overvoltage* pada bus dekat sumber DPV
- Turbulensi tegangan akibat variasi penyinaran cepat
- Perubahan arah aliran daya
- Berkurangnya *voltage margin* akibat injeksi daya besar

Teori dan Konsep Aliran Daya (*Power Flow*)

Bagian ini menguraikan teori aliran daya yang digunakan untuk menganalisis pengaruh DPV terhadap kondisi jaringan.

1.: Metode Newton–Raphson dalam Analisis Aliran Daya

Metode Newton–Raphson merupakan teknik iteratif yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan non-linear dalam jaringan tenaga.

a) Aplikasi untuk Sistem Distribusi dengan DPV

Dengan model *PQ bus* untuk beban dan *PV bus* untuk generator, DPV memberikan injeksi daya aktif yang mengubah profil tegangan.

Aliran daya harus memperhitungkan:

- Injeksi P dari PV
- Pengaturan Q melalui inverter
- Tegangan PCC sebagai batas kontrol utama

Pengaruh DPV terhadap Kondisi Operasi Sistem Distribusi

Integrasi DPV membawa manfaat sekaligus tantangan teknis dalam operasi jaringan.

1. Dampak Positif Penambahan DPV

Beberapa keuntungan dari integrasi DPV:

- Mengurangi rugi-rugi saluran
- Mengurangi beban trafo distribusi
- Meningkatkan tegangan di ujung feeder

a) Perbaikan Tegangan dengan Penetrasi Rendah

Pada penetrasi 10–30%, banyak studi menunjukkan tegangan lebih stabil karena daya lokal mengurangi arus dari gardu induk.

2. Dampak Negatif pada Penetrasi Tinggi

DPV pada penetrasi >40% dapat menimbulkan beberapa permasalahan:

a) Fenomena *Overvoltage*

Kelebihan daya lokal menyebabkan tegangan naik di atas batas yang ditentukan, terutama pada bus dekat titik koneksi PV.

b) *Reverse Power Flow*

Dalam kondisi produksi tinggi dan beban rendah, terjadi arus balik ke penyulang sehingga koordinasi proteksi dapat terganggu.

Teknologi Pengendalian Tegangan pada Sistem dengan PV

Berbagai teknologi digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan dalam jaringan yang memiliki PV terdistribusi.

1. Peran *Smart Inverter* dalam *Volt/VAR Control*

Inverter modern mampu mengatur daya reaktif (Q) untuk menahan lonjakan tegangan.

a) Fungsi-fungsi Penting *Smart Inverter*

Termasuk:

- *Volt-Watt control*
- *Volt-VAR control*
- *Frequency-Watt control*

2. Perangkat Pendukung Sistem Distribusi

Beberapa perangkat digunakan untuk mengelola tegangan secara adaptif:

a) OLTC dan Kapasitor Bank Terkontrol

- OLTC (On-load tap changer) menyesuaikan tegangan sisi trafo
- Kapasitor bank membantu stabilisasi daya reaktif

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif berbasis pemodelan dan simulasi untuk menganalisis pengaruh penambahan pembangkit surya terdistribusi terhadap kestabilan tegangan pada jaringan distribusi 20 kV. Pendekatan kuantitatif dipilih karena mampu menggambarkan hubungan variabel secara terukur melalui analisis numerik menggunakan metode *power flow*. Model jaringan, parameter saluran, beban, serta kapasitas *photovoltaic* disusun mengikuti konfigurasi umum sistem distribusi radial yang digunakan dalam sistem tenaga listrik di Indonesia.

Populasi penelitian mencakup seluruh titik sambung beban pada jaringan distribusi 20 kV, sementara sampel penelitian ditetapkan pada titik-titik kritis seperti ujung *feeder*, titik dengan impedansi tinggi, dan bus yang terhubung langsung dengan unit PV. Pemilihan sampel dilakukan secara purposif berdasarkan sensitivitas tegangan terhadap perubahan injeksi daya. Data yang dikumpulkan meliputi parameter saluran, profil beban, karakteristik modul *photovoltaic*, serta data iradiasi. Instrumen pengumpulan data berupa perangkat lunak simulasi *power system* yang mampu menjalankan perhitungan *power flow* berbasis metode *Newton–Raphson*.

Validitas data model diuji melalui pencocokan hasil *simulation output* dengan karakteristik sistem distribusi yang merujuk pada standar *IEEE 1547* dan *SPLN*. Instrumen yang digunakan dinyatakan valid karena menghasilkan profil tegangan yang sesuai dengan batas standar tegangan yang berlaku. Reliabilitas model juga dinyatakan baik karena menghasilkan pola perhitungan yang konsisten pada berbagai skenario penetrasi PV.

Analisis data dilakukan dengan menghitung perubahan tegangan, rugi-rugi daya, serta potensi *overvoltage* pada tiga level penetrasi PV yaitu 10%, 30%, dan 50% dari kapasitas beban. Model penelitian dirumuskan dalam bentuk hubungan antara variabel bebas berupa tingkat penetrasi PV (P_{pen}) dan variabel terikat berupa perubahan tegangan jaringan (ΔV). Variabel P_{pen} menyatakan besarnya daya yang diinjeksikan oleh PV, sedangkan ΔV mewakili selisih tegangan pada setiap bus terhadap kondisi dasar. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi yang menghasilkan keluaran berupa profil tegangan pada seluruh bus sehingga dapat dinilai stabilitasnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Penambahan PV Terdistribusi terhadap Profil Tegangan dan Aliran Daya

1. Perubahan Tegangan dan Potensi Overvoltage

Penelitian pada jaringan distribusi tegangan menengah menunjukkan bahwa penetrasi tinggi sistem PV terdistribusi dapat menimbulkan kenaikan tegangan dan *overvoltage*.

a) Mekanisme Kenaikan Tegangan

Menurut studi di “Impact of Photovoltaic Penetration on Medium Voltage Distribution Network” di Malaysia, penambahan PV dalam skenario beban puncak maupun beban rendah menyebabkan arus balik dan *reverse power flow*, sehingga tegangan pada bus terdekat PV meningkat signifikan. Penelitian ini juga menggarisbawahi bahwa posisi PV (bus interkoneksi), konfigurasi jaringan, dan kondisi beban/iradiasi secara bersamaan menentukan besaran kenaikan tegangan.

b) Faktor Penentu dan Batas Aman Penambahan PV

Hasil dari penelitian “Impact on Voltage Regulation in Medium Voltage Distribution Networks Due to the Insertion of Photovoltaic Generators” menunjukkan bahwa ketika PV diintegrasikan tanpa pengaturan tegangan/reaktif, perangkat regulasi tegangan dan

proteksi menjadi sering beroperasi, yang menunjukkan bahwa nilai penetrasi PV harus disesuaikan dengan karakteristik feeder.

Dengan demikian, literatur konsisten bahwa penetrasi PV terdistribusi memperbaiki tegangan pada beban ujung, tetapi ada risiko overvoltage bila penetrasi dan lokasi tidak dioptimalkan.

Dampak PV Terdistribusi terhadap Voltage Stability dan Aliran Daya Dinamis

Bagian ini mengeksplorasi studi literatur tentang stabilitas tegangan jangka panjang, fluktuasi daya, serta solusi kontrol yang telah diuji.

1. Stabilitas Tegangan dan Fluktuasi Dinamis

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa karakter intermiten PV — output berubah dengan kondisi iradiasi — menyebabkan fluktuasi tegangan dinamis, terutama pada jaringan distribusi dengan penetrasi tinggi.

a) Efek Negatif pada Sistem Distribusi

Penelitian “Dynamic Voltage Stability of Distribution Systems in the Presence of High Penetration of Photovoltaic Plants” menggunakan simulasi dinamis dengan *inverter control* menunjukkan bahwa tanpa kontrol reaktif, PV dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan setelah gangguan (fault) atau perubahan beban secara drastis. Penelitian ulasan kritis juga menekankan bahwa penetrasi tinggi sumber terbarukan meningkatkan risiko kualitas daya: tegangan tidak seimbang, *voltage flicker*, dan potensi gangguan proteksi.

2. Strategi Pengendalian Tegangan & Aliran Daya

Mengantisipasi masalah tersebut, beberapa studi merekomendasikan penggunaan kontrol reaktif melalui *smart inverter*, *Volt/VAR control*, dan pengaturan perangkat regulasi tegangan secara adaptif.

a) Efektivitas Kontrol Reaktif & Inverter Pintar

Studi “Smart Inverters Functionalities and their Impacts on Distribution Feeders at High Photovoltaic Penetration” menunjukkan bahwa inverter dengan kemampuan pengaturan daya reaktif dan *Volt-Watt* mampu menekan fluktuasi tegangan dan mengurangi switching regulator tegangan.

Studi lain di “Impact on Voltage Stability Tunisian Distribution Networks” melaporkan bahwa penggunaan *STATCOM* atau kontrol reaktif dinamis sangat efektif meningkatkan margin stabilitas tegangan pada sistem dengan PV terintegrasi.

Implikasi Praktis dan Rekomendasi Berdasarkan Literatur

Berikut interpretasi hasil literatur dan relevansinya terhadap penelitian Anda.

1. Pentingnya Optimasi Lokasi dan Kapasitas PV

Berdasarkan banyak studi, penting untuk menentukan lokasi interkoneksi PV dan kapasitasnya secara optimal bukan sekadar memasang sebanyak mungkin agar manfaat

(perbaikan tegangan, pengurangan rugi-rugi) bisa diperoleh tanpa menimbulkan overvoltage atau fluktuasi.

2. Peran Kontrol Dinamis dalam Sistem dengan Penetrasi PV Tinggi

Studi menunjukkan bahwa bagi jaringan dengan penetrasi PV tinggi, perangkat kontrol tegangan seperti *smart inverter*, *STATCOM*, atau kontrol reaktif lokal wajib dipertimbangkan agar sistem tetap stabil.

3. Konsekuensi pada Proteksi dan Keandalan Jaringan

Integrasi PV mengubah pola aliran daya; dari unidirectional menjadi kemungkinan terjadi *reverse power flow*. Hal ini dapat mempengaruhi koordinasi proteksi, selektivitas relay, dan umur transformator/distribusi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini secara komprehensif mengevaluasi pengaruh *distributed photovoltaic (PV) generation* terhadap profil tegangan dan stabilitas operasional jaringan distribusi 20 kV melalui pendekatan simulasi *power flow* berbasis metode *Newton–Raphson*. Hasil analisis menunjukkan bahwa penetrasi PV pada tingkat rendah hingga menengah memberikan manfaat signifikan berupa peningkatan profil tegangan lokal serta pengurangan rugi-rugi daya pada jaringan. Temuan ini sejalan dengan hasil studi sebelumnya yang menyatakan bahwa injeksi daya aktif dari PV mampu meningkatkan efisiensi distribusi energi listrik, terutama pada jaringan dengan karakteristik impedansi sedang.

Namun demikian, pada tingkat penetrasi tinggi ($\geq 50\%$), penelitian ini mengidentifikasi adanya risiko *overvoltage* yang cukup dominan, khususnya di segmen ujung *feeder* yang memiliki impedansi tinggi dan jarak jauh dari sumber utama. Kondisi ini diperparah oleh sifat intermiten dari iradiasi matahari yang menyebabkan fluktuasi daya keluaran PV secara cepat dan tidak stabil. Variasi tegangan yang dinamis tersebut menunjukkan bahwa jaringan distribusi konvensional tidak sepenuhnya siap menerima penetrasi PV yang tinggi tanpa adanya sistem pengendalian tegangan yang adaptif dan responsif.

Untuk itu, penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan mekanisme pengendalian tegangan terintegrasi, seperti *Volt/VAR control*, *volt-watt function*, *on-load tap changer (OLTC)* yang terkoordinasi, serta pemanfaatan *smart inverter* sesuai standar IEEE 1547-2018. Langkah-langkah ini tidak hanya penting untuk menjaga tegangan tetap berada dalam rentang yang diizinkan, tetapi juga mampu meminimalkan efek negatif yang disebabkan oleh variasi cepat iradiasi matahari.

Berdasarkan temuan tersebut, beberapa rekomendasi strategis dapat diusulkan sebagai acuan bagi utilitas maupun perencana sistem distribusi. Pertama, kapasitas integrasi PV harus direncanakan secara hati-hati melalui analisis sensitivitas tegangan pada setiap titik jaringan, sehingga batas penetrasi optimal dapat diidentifikasi sebelum implementasi. Kedua, penggunaan *smart inverter* harus menjadi prioritas utama pada jaringan dengan penetrasi PV menengah hingga tinggi, mengingat kemampuannya dalam menyediakan layanan bantu (*ancillary services*) berupa pengaturan daya reaktif secara

otomatis. Ketiga, diperlukan pembaruan dan penguatan regulasi teknis, khususnya terkait koordinasi antara perangkat pelindung, OLTC, regulator tegangan, dan inverter agar pengoperasian jaringan tetap stabil dan sesuai standar SPLN serta IEEE.

Selain itu, penelitian lanjutan dianjurkan untuk menggabungkan model dinamis real-time yang mempertimbangkan efek *cloud shading*, karakteristik ramping iradiasi, pola beban harian, serta dampak terhadap sistem proteksi. Kajian berbasis studi kasus lokal di Indonesia juga sangat disarankan agar hasil penelitian lebih relevan dengan kondisi aktual jaringan distribusi nasional. Dengan memperhatikan seluruh rekomendasi tersebut, integrasi pembangkit surya terdistribusi di masa mendatang diharapkan dapat memberikan manfaat optimal dalam peningkatan efisiensi energi tanpa mengganggu keandalan dan kestabilan sistem distribusi listrik.

DAFTAR REFERENSI

- Ćetković, D. (2024). Mitigasi kenaikan tegangan pada jaringan tegangan menengah dengan kabel bawah tanah yang panjang dan permintaan daya yang rendah. *Energies*, 17(13), 3174.
- Ebrahimi, S., Ullah, S. M. S., & Ferdowsi, F. (2024). Twinning digital dengan kontrol Volt-VAR yang adaptif untuk inverter surya pintar. *Renewable Energy Focus*, 48, 100525.
- Li, C., Disfani, V. R., Haghi, H. V., & Kleissl, J. (2020). Koordinasi OLTC dan inverter pintar untuk pengaturan tegangan optimal pada jaringan distribusi yang tidak seimbang. *Penelitian Sistem Tenaga Listrik*, 187, 106498.
- Maghami, M. R., Pasupuleti, J., & Ling, C. M. (2023). Dampak penetrasi fotovoltaik pada jaringan distribusi tegangan menengah. *Keberlanjutan*, 15(7), 5613.
- Makinde, K. A., Akinyele, D. O., & Amole, A. O. (2021). Masalah kenaikan tegangan pada jaringan distribusi dengan pembangkit terdistribusi: Tinjauan teknologi, dampak, dan pendekatan mitigasi. *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika Indonesia*, 9(3), 575–600.
- Muthukaruppan, V., Shi, Y., & Baran, M. (2024). Skema kontrol Volt/Var supervisi untuk mengoordinasikan regulator tegangan dengan inverter pintar pada sistem distribusi. *Frontiers in Smart Grids*, 3, Artikel 1356074.
- Sharma, V., Aziz, S. M., Haque, M. H., & Kauschke, T. (2020). Dampak penetrasi fotovoltaik surya yang tinggi pada penyulang distribusi dan dampak ekonominya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110021.
- Verma, P. (2022). Mitigasi kenaikan tegangan pada jaringan distribusi LV kaya PV menggunakan metode pembatasan daya aktif tingkat konverter DC/DC. *Energi*, 15(16), 5901.