

INOVASI DAN TANTANGAN DALAM PENGEMBANGAN SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK BERBASIS TEKNOLOGI TINGGI ULTRA HIGH VOLTAGE UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN DAN EFISIENSI ENERGI (SEBUAH TINJAUAN LITERATUR)

Yogi Syahputra Aritonang¹, Parlin Siagian², Solly Aryza³

^{1,2,3}Universitas Pembangunan Panca Budi; Jl. Gatot Subroto No. 4, Kec. Medan Sunggal, Medan, Sumatera Utara.

Received: 1 Agustus 2024

Accepted: 5 Oktober 2024

Published: 12 Oktober 2024

Keywords:

Inovasi; Sistem Transmisi;
Tenaga Listrik; Energi; UHV

Correspondent Email:

yogisyahputra8@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini mengeksplorasi inovasi dan tantangan dalam pengembangan sistem transmisi tenaga listrik berbasis teknologi tinggi, terutama melalui penerapan teknologi Ultra High Voltage (UHV), kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT). Studi ini bertujuan untuk menjawab kebutuhan akan sistem transmisi yang lebih efisien, andal, dan mampu mendukung integrasi energi terbarukan sambil mengurangi dampak lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi UHV dapat mengurangi kehilangan daya hingga 30%, sementara kabel superkonduktor hampir menghilangkan kehilangan daya pada jarak pendek. Sistem kontrol cerdas berbasis ICT juga meningkatkan stabilitas jaringan dan respons terhadap fluktuasi beban. Namun, implementasi teknologi-teknologi ini masih menghadapi tantangan signifikan, termasuk biaya tinggi, kebutuhan infrastruktur yang kompleks, dan risiko keamanan siber. Penelitian ini menyarankan perlunya kolaborasi lebih lanjut antara industri, pemerintah, dan akademisi untuk mengatasi hambatan tersebut dan mendorong adopsi teknologi transmisi yang lebih luas dan efektif.

Abstract. This study examines advancements and difficulties in creating advanced electricity transmission systems, specifically by utilising Ultra High Voltage (UHV) technology, superconducting cables, and intelligent control systems based on information and communication technology (ICT). The research seeks to tackle the need for more effective and dependable transmission networks capable of facilitating the incorporation of renewable energy while minimising environmental consequences. The findings indicate that Ultra-High Voltage (UHV) technology has the potential to decrease power losses by a maximum of 30%, whilst superconducting cables virtually eradicate power losses when used over short distances. ICT-based intelligent control systems enhance network stability and increase response to load changes. Nevertheless, the adoption of these technologies encounters substantial obstacles, such as exorbitant costs, the need for intricate infrastructure, and the vulnerability to cybersecurity threats. This research indicates the need for more cooperation among business, government, and academics to address these obstacles and encourage the wider and more efficient use of new transmission systems.

1. PENDAHULUAN

Sistem transmisi tenaga listrik memainkan peran krusial dalam memastikan distribusi energi yang efisien dan andal, khususnya di tengah peningkatan kebutuhan energi global. Dengan perkembangan pesat dalam teknologi tinggi, inovasi dalam sistem transmisi menjadi kunci untuk mengatasi tantangan terkait keandalan, efisiensi, dan stabilitas jaringan listrik. Studi ini bertujuan untuk menjawab kebutuhan mendesak akan sistem transmisi yang mampu mendukung integrasi energi terbarukan serta mengurangi dampak lingkungan dari distribusi energi konvensional. Selain itu, penelitian ini juga didorong oleh tuntutan untuk meminimalkan kehilangan daya selama transmisi jarak jauh, yang masih menjadi isu kritis dalam infrastruktur energi saat ini.

Berdasarkan penelitian terkini, inovasi teknologi seperti transmisi tegangan ultra-tinggi (UHV) dan sistem berbasis kabel superkonduktor telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi sistem transmisi tenaga listrik [1]. Namun, penerapan teknologi ini masih menghadapi sejumlah tantangan, termasuk biaya yang tinggi dan kompleksitas dalam implementasi [2]. Oleh karena itu, penelitian ini juga mengulas berbagai studi yang telah dilakukan terkait pengembangan dan optimasi teknologi transmisi, serta tantangan yang muncul dalam prosesnya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pemahaman mendalam tentang inovasi teknologi transmisi, tetapi juga mengidentifikasi area yang memerlukan perhatian lebih lanjut dalam pengembangan teknologi transmisi masa depan.

Meskipun terdapat berbagai kemajuan dalam pengembangan sistem transmisi tenaga listrik berbasis teknologi tinggi, masih terdapat masalah utama yang perlu diatasi untuk mencapai keandalan dan efisiensi energi yang optimal [3]. Salah satu masalah utama adalah tingginya tingkat kehilangan daya selama proses transmisi, terutama pada jarak jauh, yang berdampak langsung pada efisiensi keseluruhan sistem [4]. Selain itu, keandalan sistem transmisi sering kali terganggu oleh faktor

eksternal seperti kondisi cuaca ekstrem dan kegagalan komponen, yang dapat menyebabkan pemadaman listrik berskala besar [5]. Tantangan ini diperparah oleh meningkatnya permintaan akan integrasi sumber energi terbarukan, yang memerlukan sistem transmisi yang lebih fleksibel dan adaptif untuk menangani variabilitas produksi energi [6] [7].

Sebagai solusi umum, banyak penelitian telah menyarankan peningkatan infrastruktur transmisi melalui adopsi teknologi baru seperti kabel superkonduktor dan sistem transmisi berbasis tegangan ultra-tinggi (UHV) [8]. Teknologi-teknologi ini memiliki potensi untuk secara signifikan mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas jaringan. Namun, implementasi teknologi ini memerlukan investasi yang sangat besar dan pengembangan infrastruktur yang kompleks [9] [10]. Selain itu, meskipun teknologi tersebut menjanjikan peningkatan keandalan dan efisiensi, keberhasilan jangka panjangnya bergantung pada kemampuan untuk mengatasi tantangan teknis dan ekonomi yang terkait dengan penerapannya [11]. Oleh karena itu, solusi yang lebih komprehensif diperlukan untuk memastikan bahwa pengembangan sistem transmisi tidak hanya berfokus pada inovasi teknologi, tetapi juga pada peningkatan keandalan dan efisiensi secara menyeluruh dalam konteks operasional yang realistis.

Penelitian ini menguji hipotesis bahwa integrasi teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV), kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik. Hasil penelitian mendukung hipotesis ini, menunjukkan bahwa teknologi UHV secara efektif mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan kapasitas transmisi, sementara kabel superkonduktor hampir menghilangkan kehilangan daya terutama dalam lingkungan perkotaan. Selain itu, sistem kontrol cerdas berbasis ICT memperkuat stabilitas jaringan transmisi dengan meningkatkan respons terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal. Meskipun demikian, penelitian ini juga

mengidentifikasi tantangan utama yang harus diatasi, termasuk biaya tinggi, kebutuhan infrastruktur yang kompleks, dan risiko keamanan siber, yang semuanya merupakan faktor penting dalam keberhasilan implementasi teknologi ini. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun teknologi-teknologi ini memiliki potensi besar, keberhasilan penerapan mereka bergantung pada kemampuan untuk mengatasi hambatan-hambatan tersebut melalui penelitian lebih lanjut, pengembangan teknologi, dan dukungan kebijakan yang kuat.

Inovasi dalam teknologi transmisi tenaga listrik telah menjadi fokus utama berbagai penelitian dalam upaya meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi energi. Salah satu teknologi yang menonjol adalah penggunaan sistem transmisi tegangan ultra-tinggi (UHV). UHV memungkinkan transmisi daya listrik dalam jumlah besar pada jarak jauh dengan kehilangan energi yang minimal. Teknologi ini telah diterapkan di beberapa negara, seperti Tiongkok, yang berhasil mengembangkan jaringan transmisi UHV terbesar di dunia. Menurut [12], implementasi UHV di Tiongkok telah meningkatkan efisiensi transmisi secara signifikan, mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik lokal, dan memungkinkan integrasi yang lebih besar dari sumber energi terbarukan yang tersebar di berbagai wilayah. Meskipun demikian, implementasi UHV juga memerlukan infrastruktur yang sangat kompleks dan investasi yang besar, yang menjadi tantangan utama dalam penyebaran teknologi ini di negara-negara lain.

Selain UHV, teknologi kabel superkonduktor juga telah mendapatkan perhatian sebagai solusi untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi jaringan transmisi. Kabel superkonduktor memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik dengan resistansi hampir nol, yang berarti hampir tidak ada kehilangan energi selama transmisi. Studi oleh [13] menunjukkan bahwa penggunaan kabel superkonduktor dapat menggantikan sistem kabel konvensional di area perkotaan yang padat, di mana ruang untuk infrastruktur tambahan sangat terbatas. Kabel ini tidak hanya mengurangi kehilangan daya, tetapi juga memungkinkan peningkatan kapasitas transmisi tanpa perlu memperluas jaringan fisik. Namun, seperti halnya UHV, adopsi

teknologi superkonduktor menghadapi tantangan besar, termasuk biaya tinggi dan kebutuhan akan sistem pendingin kriogenik yang kompleks untuk mempertahankan kondisi superkonduktivitas.

Selain teknologi transmisi, ada juga pengembangan di bidang kontrol sistem transmisi untuk meningkatkan keandalan dan stabilitas jaringan listrik. Sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) telah diusulkan sebagai solusi untuk mengoptimalkan operasi jaringan transmisi. Teknologi seperti Sistem Manajemen Energi (EMS) dan Pengendalian Distribusi yang Cerdas (Smart Distribution Control) memungkinkan pengelolaan beban secara real-time, yang dapat mengurangi risiko kegagalan sistem dan meningkatkan stabilitas jaringan secara keseluruhan. Penelitian oleh [14] mengungkapkan bahwa integrasi ICT dalam sistem transmisi dapat secara signifikan meningkatkan respons sistem terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal, sehingga meminimalkan risiko pemadaman listrik. Namun, integrasi teknologi ini memerlukan infrastruktur telekomunikasi yang canggih dan keamanan siber yang kuat untuk melindungi jaringan dari ancaman digital, yang menambah kompleksitas dalam penerapannya.

Dalam keseluruhan pandangan ini, meskipun ada kemajuan signifikan dalam pengembangan teknologi transmisi tenaga listrik, tantangan-tantangan dalam hal biaya, kompleksitas infrastruktur, dan keamanan masih menjadi hambatan utama. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan solusi yang tidak hanya inovatif secara teknologi, tetapi juga feasible secara ekonomi dan praktis untuk diimplementasikan di berbagai skenario operasional. Upaya kolaboratif antara industri, pemerintah, dan akademisi diperlukan untuk mengatasi tantangan ini dan memastikan bahwa teknologi transmisi masa depan dapat memberikan keandalan dan efisiensi yang diharapkan dalam skala global.

Meskipun teknologi transmisi tegangan ultra-tinggi (UHV) dan kabel superkonduktor telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik, penerapan luas dari teknologi-teknologi ini masih menghadapi beberapa kendala yang belum sepenuhnya

teratasi. Dalam literatur, berbagai studi telah menyoroti tantangan teknis dan ekonomi yang menghambat adopsi luas dari sistem UHV, seperti kebutuhan akan investasi infrastruktur yang sangat besar dan masalah terkait stabilitas sistem pada kondisi operasi tertentu [12] [15]. Selain itu, meskipun teknologi kabel superkonduktor menawarkan keunggulan dalam hal pengurangan resistansi dan peningkatan kapasitas transmisi, biaya tinggi untuk material superkonduktor dan infrastruktur pendukung, termasuk sistem pendingin kriogenik, masih menjadi hambatan utama dalam implementasinya di jaringan transmisi skala besar [16].

Penelitian lebih lanjut juga menunjukkan bahwa pengembangan teknologi sistem kontrol cerdas, meskipun menjanjikan dalam meningkatkan stabilitas dan keandalan jaringan, menghadapi tantangan dalam hal integrasi dengan infrastruktur transmisi yang sudah ada. Sistem kontrol cerdas yang berbasis pada teknologi informasi dan komunikasi (ICT) memerlukan jaringan telekomunikasi yang canggih dan infrastruktur digital yang aman untuk dapat berfungsi secara optimal [17] [18]. Selain itu, isu keamanan siber menjadi perhatian utama, mengingat potensi kerentanan yang dapat dieksploitasi oleh ancaman digital, yang pada gilirannya dapat membahayakan stabilitas dan keamanan jaringan listrik secara keseluruhan [19]. Penelitian oleh beberapa peneliti menunjukkan bahwa meskipun ada potensi besar untuk meningkatkan efisiensi operasional melalui integrasi ICT, risiko yang terkait dengan serangan siber dan gangguan digital perlu diatasi sebelum teknologi ini dapat diadopsi secara luas dalam sistem transmisi tenaga listrik [20] [21].

Lebih jauh, meskipun teknologi-teknologi ini telah berkembang pesat, studi yang lebih komprehensif diperlukan untuk memahami bagaimana interaksi antara berbagai komponen teknologi ini dapat dioptimalkan untuk mencapai kinerja sistem yang diinginkan. Misalnya, [12] mencatat bahwa sementara UHV dan kabel superkonduktor secara individu memiliki keunggulan tertentu, integrasi mereka dalam satu sistem transmisi memerlukan pemahaman yang lebih dalam tentang dinamika operasional dan potensi masalah yang mungkin muncul. Selain itu, perlu ada penilaian yang lebih mendalam tentang bagaimana teknologi-

teknologi ini dapat beradaptasi dengan kondisi pasar dan regulasi yang berbeda di berbagai negara [25] [26], mengingat variasi dalam kebutuhan energi, infrastruktur yang ada, dan kebijakan lingkungan [27] [28].

Sebagai hasil dari kajian literatur ini, terdapat beberapa celah penelitian yang masih perlu diisi. Pertama, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai metode yang lebih efektif dan ekonomis untuk mengurangi biaya produksi dan operasional kabel superkonduktor, termasuk pengembangan material yang lebih murah dan efisien. Kedua, meskipun banyak penelitian telah mengeksplorasi potensi teknologi kontrol cerdas, masih kurang studi yang mengintegrasikan aspek keamanan siber secara mendalam dalam desain dan implementasi sistem ini. Ketiga, diperlukan penelitian multidisiplin yang menyelidiki bagaimana berbagai teknologi transmisi dapat diintegrasikan dengan optimal dalam satu sistem yang komprehensif, serta bagaimana sistem ini dapat beradaptasi dengan berbagai kondisi operasional dan regulasi yang berbeda. Identifikasi celah-celah ini penting untuk mengarahkan penelitian di masa depan, yang pada akhirnya akan membantu mengatasi hambatan yang ada dan mendorong adopsi teknologi transmisi tenaga listrik berbasis teknologi tinggi secara lebih luas dan efektif.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan menguji solusi teknologi tinggi yang dapat mengatasi tantangan keandalan dan efisiensi dalam sistem transmisi tenaga listrik. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi dan batasan dari teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV), kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) dalam meningkatkan kinerja sistem transmisi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengatasi hambatan teknis, ekonomi, dan keamanan yang menghalangi adopsi luas dari teknologi-teknologi ini.

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan yang signifikan, karena mengintegrasikan pendekatan multidisiplin yang mencakup analisis teknis, ekonomi, dan keamanan dari teknologi transmisi tenaga listrik yang sedang berkembang. Tidak hanya fokus pada evaluasi kinerja teknologi secara individual, penelitian

ini juga mengeksplorasi bagaimana kombinasi dari berbagai teknologi ini dapat dioptimalkan untuk mencapai sistem transmisi yang lebih efisien dan andal. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada literatur dengan menyediakan wawasan baru tentang cara mengintegrasikan teknologi-teknologi canggih ini dalam konteks operasional yang realistis dan beragam, serta bagaimana teknologi ini dapat diadaptasi untuk memenuhi kebutuhan pasar dan regulasi yang berbeda di berbagai negara.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Inovasi dalam teknologi transmisi tenaga listrik telah memainkan peran penting dalam mengatasi tantangan keandalan dan efisiensi energi. Teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) misalnya, telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi transmisi daya listrik, terutama dalam transmisi jarak jauh dengan kehilangan daya yang minimal. Seperti yang dicatat oleh [12], penerapan UHV di Tiongkok telah meningkatkan efisiensi transmisi secara signifikan, memungkinkan integrasi yang lebih besar dari sumber energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik local. Selain UHV, teknologi kabel superkonduktor juga telah menjadi fokus dalam penelitian terkait peningkatan kapasitas dan efisiensi transmisi. Kabel superkonduktor memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik dengan resistansi hampir nol, yang berarti hampir tidak ada kehilangan energi selama transmisi. [22] menunjukkan bahwa penggunaan kabel superkonduktor di area perkotaan yang padat dapat menggantikan sistem kabel konvensional dan meningkatkan kapasitas transmisi tanpa perlu memperluas jaringan fisik.

Namun, meskipun teknologi ini menjanjikan, ada tantangan yang signifikan dalam penerapannya. [21] menggarisbawahi bahwa meskipun teknologi UHV dan superkonduktor menawarkan keunggulan yang jelas, hambatan seperti biaya tinggi dan kebutuhan infrastruktur yang kompleks tetap menjadi tantangan utama dalam implementasinya di berbagai negara. Selain inovasi teknologi, sistem kontrol cerdas berbasis ICT juga telah diidentifikasi sebagai solusi untuk meningkatkan stabilitas dan keandalan jaringan transmisi. Ditemukan

bahwa integrasi ICT dalam sistem transmisi dapat meningkatkan respons sistem terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal, sehingga meminimalkan risiko pemadaman listrik.

3. METODE PENELITIAN

Ruang lingkup penelitian ini mencakup analisis mendalam terhadap implementasi teknologi UHV, kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas di berbagai skenario operasional dan lingkungan geografis yang berbeda. Penelitian ini juga mencakup evaluasi terhadap biaya dan manfaat dari penerapan teknologi-teknologi ini, serta potensi risiko dan tantangan yang dihadapi dalam implementasinya. Selain itu, penelitian ini akan mengkaji implikasi dari integrasi teknologi ini terhadap stabilitas dan keamanan sistem transmisi secara keseluruhan, termasuk risiko yang terkait dengan keamanan siber. Dengan cakupan yang luas ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang komprehensif bagi pengambil kebijakan, industri, dan akademisi tentang bagaimana mengembangkan dan menerapkan teknologi transmisi tenaga listrik yang efisien, andal, dan berkelanjutan di masa depan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Peningkatan dari Penerapan teknologi tegangan ultra tinggi (UHV)

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) menunjukkan peningkatan efisiensi transmisi yang signifikan dibandingkan dengan sistem transmisi konvensional. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa pada sistem transmisi yang menggunakan teknologi UHV, terjadi penurunan kehilangan daya hingga 30% dibandingkan dengan jaringan transmisi konvensional pada jarak transmisi yang sama [12]. Sebagai contoh, dalam pengujian pada jalur transmisi sepanjang 1.000 km, kehilangan

daya pada sistem UHV tercatat sebesar 5%, sementara pada sistem konvensional mencapai 7,5%. Selain itu, teknologi UHV memungkinkan peningkatan kapasitas daya yang dapat ditransmisikan, dengan peningkatan hingga 50% dibandingkan dengan sistem tegangan tinggi biasa [22] [23].

Di samping itu, penerapan kabel superkonduktor dalam sistem transmisi juga menghasilkan kinerja yang mengesankan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kabel superkonduktor berhasil mengurangi resistansi hampir sepenuhnya, sehingga mengeliminasi kehilangan daya yang biasanya terjadi pada kabel konvensional [24] [25]. Pengujian pada sistem ini menunjukkan bahwa penggunaan kabel superkonduktor pada jalur transmisi perkotaan sepanjang 50 km berhasil menurunkan kehilangan daya hingga di bawah 1%, yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan kabel konvensional yang memiliki kehilangan daya sekitar 4-6% pada panjang transmisi yang sama [26] [27]. Hasil ini mengindikasikan potensi besar kabel superkonduktor dalam meningkatkan efisiensi sistem transmisi, terutama di wilayah dengan keterbatasan ruang dan kebutuhan daya yang tinggi.

Selain peningkatan efisiensi, integrasi sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) ke dalam jaringan transmisi juga memberikan hasil yang positif. Data yang diambil dari simulasi jaringan listrik yang menggunakan sistem kontrol cerdas menunjukkan peningkatan stabilitas dan respons sistem terhadap fluktuasi beban. Dalam kondisi simulasi dengan beban yang bervariasi secara signifikan, sistem kontrol cerdas berhasil menstabilkan jaringan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional. Misalnya, waktu pemulihan sistem setelah terjadi gangguan berkurang dari 10 detik pada sistem konvensional menjadi hanya 4 detik pada sistem yang menggunakan kontrol cerdas [28] [29]. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi kontrol cerdas memiliki potensi besar untuk meningkatkan keandalan jaringan transmisi, terutama dalam menghadapi fluktuasi beban yang tidak terduga dan kondisi operasi yang ekstrem.

4.2 Keunggulan transmisi ultra high voltage (UHV)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) menawarkan keunggulan signifikan dalam mengurangi kehilangan daya selama transmisi, namun perbandingan dengan literatur yang ada mengungkapkan tantangan dalam penerapannya di luar lingkungan tertentu [30] [31] melaporkan bahwa meskipun UHV berhasil diimplementasikan di beberapa negara seperti Tiongkok, penerapannya di negara lain menghadapi hambatan teknis dan ekonomi yang lebih besar. Misalnya, infrastruktur yang diperlukan untuk mendukung UHV sering kali tidak tersedia di negara-negara berkembang, sehingga membatasi potensi penerapannya. Selain itu, biaya awal yang tinggi untuk instalasi UHV menjadi penghalang utama, terutama di negara-negara dengan anggaran terbatas. Dibandingkan dengan sistem transmisi tegangan tinggi biasa, UHV membutuhkan investasi yang jauh lebih besar, meskipun dalam jangka panjang dapat menawarkan penghematan operasional melalui pengurangan kehilangan daya [32].

Dalam konteks kabel superkonduktor, meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi ini secara signifikan dapat mengurangi kehilangan daya hingga di bawah 1%, studi perbandingan dengan literatur lain menunjukkan bahwa biaya dan kompleksitas teknis masih menjadi tantangan utama [33] [34]. Dalam aplikasinya bahwa meskipun kabel superkonduktor efektif dalam meningkatkan efisiensi, penerapannya di wilayah perkotaan yang padat menghadapi kendala, termasuk kebutuhan akan sistem pendingin kriogenik yang mahal dan sulit dipelihara [35]. Selain itu, meskipun potensi penghematan energi melalui pengurangan resistansi sangat menarik, investasi awal untuk pengembangan dan instalasi kabel superkonduktor jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kabel konvensional. Hal ini menjadikan adopsi teknologi ini lebih lambat, terutama di negara-negara yang memiliki infrastruktur energi yang sudah mapan dan enggan berinvestasi dalam teknologi yang masih dianggap baru [32].

Adapun sistem kontrol cerdas berbasis ICT, meskipun menunjukkan peningkatan stabilitas dan respons jaringan, literatur lain mengungkapkan bahwa sistem ini menghadapi

tantangan besar terkait keamanan siber dan integrasi dengan infrastruktur yang ada. Menurut [13], meskipun sistem kontrol cerdas dapat mengurangi waktu pemulihan sistem setelah gangguan, ancaman keamanan siber tetap menjadi masalah kritis yang belum sepenuhnya teratasi. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa sistem kontrol cerdas memerlukan infrastruktur telekomunikasi yang canggih, yang tidak selalu tersedia di semua negara atau wilayah [36]. Sebagai perbandingan, sistem kontrol konvensional, meskipun kurang responsif, memiliki keunggulan dalam hal kestabilan dan keandalan karena telah teruji selama beberapa dekade. Oleh karena itu, meskipun teknologi kontrol cerdas menawarkan banyak keuntungan, penerapannya memerlukan perhatian khusus terhadap isu keamanan dan integrasi yang kompleks, yang belum sepenuhnya dipecahkan oleh teknologi saat ini [37] [38].

4.3 Hasil penelitian

Hasil dari penelitian ini memiliki implikasi penting baik secara ilmiah maupun praktis dalam konteks pengembangan sistem transmisi tenaga listrik yang lebih efisien dan andal. Penerapan teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) tidak hanya mengurangi kehilangan daya selama transmisi jarak jauh tetapi juga memungkinkan peningkatan kapasitas daya yang signifikan, yang esensial untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat. Dalam jangka panjang, teknologi ini dapat membantu negara-negara dengan jaringan listrik yang berkembang untuk meningkatkan efisiensi sistem mereka dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya energi yang tidak terbarukan. Meskipun demikian, keberhasilan penerapan UHV sangat bergantung pada investasi infrastruktur awal yang besar, yang perlu dipertimbangkan dalam kebijakan energi di tingkat nasional dan internasional [39].

Pada sisi lain, meskipun kabel superkonduktor menunjukkan pengurangan hampir total dalam kehilangan daya, penelitian ini mengungkapkan bahwa tantangan teknis dan ekonomi terkait dengan teknologi ini masih perlu diatasi sebelum dapat diadopsi secara luas. Keberhasilan implementasi kabel superkonduktor sangat bergantung pada pengembangan lebih lanjut dalam teknologi pendinginan kriogenik yang lebih efisien dan

murah, serta penurunan biaya material superkonduktor itu sendiri. Dalam jangka panjang, kabel superkonduktor dapat menjadi solusi ideal untuk daerah perkotaan yang padat di mana ruang untuk infrastruktur baru terbatas, dan kebutuhan akan efisiensi energi sangat tinggi. Implikasi praktisnya adalah bahwa penelitian dan pengembangan lebih lanjut perlu difokuskan pada peningkatan keberlanjutan teknologi ini agar dapat diimplementasikan dalam skala yang lebih besar dan lebih ekonomis.

Integrasi sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) ke dalam jaringan transmisi menawarkan peluang signifikan untuk meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem, terutama dalam kondisi operasi yang tidak terduga. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi kontrol cerdas mampu meningkatkan respons sistem terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal, yang sangat penting dalam mempertahankan stabilitas jaringan listrik. Namun, tantangan dalam hal keamanan siber dan kebutuhan akan infrastruktur telekomunikasi yang canggih mengindikasikan bahwa adopsi teknologi ini memerlukan pendekatan yang lebih holistik. Pengembangan kebijakan keamanan siber yang lebih kuat serta investasi dalam infrastruktur telekomunikasi yang lebih baik akan menjadi kunci untuk memastikan bahwa sistem kontrol cerdas dapat diimplementasikan secara aman dan efektif di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi teknologi yang inovatif, tetapi juga memberikan panduan bagi pengambil kebijakan dan industri untuk mengatasi tantangan yang ada dalam rangka meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem transmisi tenaga listrik secara keseluruhan.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa penggunaan teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) berhasil meningkatkan efisiensi transmisi tenaga listrik, terutama dalam konteks jaringan transmisi jarak jauh. Data menunjukkan bahwa penerapan teknologi UHV pada jalur transmisi sepanjang 1.000 km menghasilkan penurunan kehilangan daya sebesar 30% dibandingkan dengan sistem tegangan tinggi biasa, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi keseluruhan jaringan [40]. Selain itu, teknologi ini memungkinkan peningkatan kapasitas daya yang dapat

ditransmisikan, sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi yang lebih besar tanpa harus membangun jaringan baru secara signifikan [41].

Di sisi lain, penerapan kabel superkonduktor dalam lingkungan perkotaan yang padat juga menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan. Hasil uji coba menunjukkan bahwa kabel superkonduktor dapat mengurangi kehilangan daya hingga di bawah 1% pada jalur transmisi sepanjang 50 km, yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan kabel konvensional yang kehilangan daya sekitar 4-6% pada panjang yang sama [42] [43]. Hasil ini menunjukkan bahwa kabel superkonduktor memiliki potensi besar untuk digunakan di daerah perkotaan di mana efisiensi energi sangat penting dan ruang untuk pengembangan infrastruktur baru sangat terbatas.

Selain itu, sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) yang diterapkan dalam jaringan transmisi juga menunjukkan peningkatan signifikan dalam stabilitas dan respons sistem terhadap fluktuasi beban. Data dari simulasi menunjukkan bahwa sistem kontrol cerdas dapat menstabilkan jaringan lebih cepat setelah terjadinya gangguan, dengan waktu pemulihan yang berkurang dari 10 detik pada sistem konvensional menjadi hanya 4 detik [44] [45] [46]. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi kontrol cerdas tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memperkuat keandalan jaringan transmisi dalam menghadapi kondisi operasi yang berubah-ubah dan tidak terduga.

Hasil penelitian ini, ketika dibandingkan dengan literatur yang ada, menunjukkan keunggulan yang signifikan dari teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) dalam hal efisiensi transmisi daya, namun juga menyoroti tantangan yang mirip dengan yang dilaporkan dalam studi sebelumnya. [21] mencatat bahwa meskipun UHV secara substansial mengurangi kehilangan daya pada jarak transmisi jauh, teknologi ini masih dihadapkan pada tantangan operasional dan investasi awal yang besar [41] [47]. Hal ini sejalan dengan temuan [13], yang menunjukkan bahwa meskipun UHV menawarkan peningkatan kapasitas dan efisiensi, hambatan seperti biaya instalasi yang tinggi dan kebutuhan akan infrastruktur yang mendukung tetap menjadi penghalang utama

bagi penerapan teknologi ini di banyak negara berkembang [48] [49]. Oleh karena itu, meskipun hasil penelitian ini mendukung literatur yang ada mengenai manfaat UHV, tantangan yang dihadapi tetap relevan dan memerlukan perhatian lebih lanjut [14] [50] [51].

Ketika membandingkan hasil penggunaan kabel superkonduktor dengan studi lain, temuan ini juga sejalan dengan literatur yang mengakui efisiensi tinggi dari teknologi ini, tetapi juga menekankan tantangan yang signifikan dalam penerapannya. Misalnya, [14] menemukan bahwa meskipun kabel superkonduktor secara drastis mengurangi kehilangan daya, penerapannya dibatasi oleh biaya material yang tinggi dan kebutuhan akan sistem pendingin kriogenik yang rumit [52] [53]. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan pengurangan kehilangan daya hingga di bawah 1%, tetapi juga mengonfirmasi bahwa teknologi ini masih membutuhkan pengembangan lebih lanjut sebelum dapat diadopsi secara luas. Secara khusus, biaya produksi dan pemeliharaan yang tinggi menjadi faktor penghambat utama, yang telah dibahas dalam berbagai studi sebelumnya sebagai tantangan besar yang harus diatasi.

Selain itu, integrasi sistem kontrol cerdas berbasis ICT menunjukkan hasil yang menjanjikan, namun perbandingan dengan literatur lainnya mengungkapkan beberapa kekhawatiran yang perlu diperhatikan. Meskipun teknologi kontrol cerdas terbukti meningkatkan respons dan stabilitas sistem, risiko keamanan siber tetap menjadi perhatian utama [54]. Menurut penelitian, meskipun sistem ini menawarkan peningkatan keandalan, mereka juga rentan terhadap serangan siber yang dapat mengganggu operasional jaringan [55]. Penelitian yang dilakukan juga menekankan bahwa kebutuhan akan infrastruktur telekomunikasi yang aman dan canggih merupakan prasyarat penting untuk keberhasilan penerapan teknologi ini [55]. Oleh karena itu, meskipun hasil dari penelitian ini mendukung keuntungan yang dilaporkan dalam literatur, ada kebutuhan mendesak untuk mengatasi isu keamanan dan integrasi yang menjadi fokus dalam penelitian dan pengembangan lebih lanjut [56].

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting baik dari segi ilmiah maupun praktis,

terutama dalam konteks peningkatan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik [51]. Penerapan teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV) tidak hanya menunjukkan pengurangan signifikan dalam kehilangan daya selama transmisi jarak jauh tetapi juga memungkinkan peningkatan kapasitas daya yang dapat ditransmisikan [47]. Ini sangat relevan dalam memenuhi permintaan energi yang terus meningkat di berbagai negara. Temuan ini mendukung argumen bahwa investasi dalam teknologi UHV dapat menghasilkan manfaat jangka panjang dalam hal pengurangan biaya operasional dan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan, meskipun tantangan biaya dan infrastruktur awal tetap menjadi perhatian yang signifikan [41].

Di sisi lain, hasil terkait dengan kabel superkonduktor menggarisbawahi potensi besar teknologi ini untuk meningkatkan efisiensi energi, terutama di daerah perkotaan dengan kebutuhan daya yang tinggi dan ruang infrastruktur yang terbatas. Kabel superkonduktor, dengan kemampuannya untuk hampir menghilangkan kehilangan daya, dapat menjadi solusi yang sangat efektif dalam konteks tersebut. Namun, seperti yang diidentifikasi dalam literatur, tantangan utama yang harus diatasi adalah biaya tinggi dan kompleksitas sistem pendinginan yang diperlukan untuk menjaga kondisi superkonduktivitas. Jika tantangan ini dapat diatasi melalui penelitian dan pengembangan lebih lanjut, kabel superkonduktor dapat menjadi komponen kunci dalam jaringan transmisi masa depan yang lebih efisien dan ramah lingkungan [57] [58] [43].

Selain itu, integrasi sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan stabilitas dan respons jaringan transmisi terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal. Namun, penelitian ini juga menyoroti bahwa penerapan teknologi ini harus disertai dengan peningkatan keamanan siber dan pengembangan infrastruktur telekomunikasi yang memadai [59]. Tanpa langkah-langkah ini, risiko yang terkait dengan serangan siber dapat mengancam keandalan dan keamanan jaringan listrik, yang pada akhirnya dapat membatalkan manfaat yang diperoleh dari teknologi kontrol cerdas. Oleh karena itu, meskipun temuan penelitian ini menjanjikan,

penting untuk mengatasi tantangan keamanan dan integrasi ini agar sistem kontrol cerdas dapat diimplementasikan secara luas dan efektif dalam jaringan transmisi modern [60].

Secara keseluruhan, penelitian ini tidak hanya menegaskan manfaat potensial dari teknologi UHV, kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas, tetapi juga memberikan panduan penting mengenai tantangan yang harus diatasi untuk memastikan implementasi yang sukses. Implikasi dari hasil ini menunjukkan bahwa sementara teknologi-teknologi ini menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan transmisi, keberhasilan adopsi mereka sangat bergantung pada kemampuan untuk mengatasi hambatan teknis, ekonomi, dan keamanan yang terkait.

Penelitian lebih lanjut mengenai integrasi teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV), kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) menunjukkan hasil yang koheren dengan temuan awal, menguatkan potensi masing-masing teknologi dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik. Pada pengujian lebih lanjut dengan berbagai skenario operasional, teknologi UHV menunjukkan penurunan signifikan dalam kehilangan daya bahkan pada kondisi beban tinggi, menguatkan efektivitasnya dalam berbagai kondisi operasional. Selain itu, hasil uji coba terhadap kabel superkonduktor dalam lingkungan perkotaan yang lebih menantang mengungkapkan bahwa meskipun ada peningkatan kebutuhan energi selama proses pendinginan, efisiensi keseluruhan masih jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kabel konvensional [61] [62]. Sementara itu, sistem kontrol cerdas berbasis ICT menunjukkan peningkatan respons terhadap gangguan sistem, yang secara signifikan mengurangi frekuensi dan durasi pemadaman listrik, memperkuat keandalan jaringan transmisi secara keseluruhan [63] [61].

4.4 Perbandingan dan keselarasan dengan penelitian sebelumnya

Hasil ini sesuai dengan studi lain yang menyoroti keunggulan teknologi UHV dalam mengurangi kehilangan daya, namun juga menegaskan bahwa keberhasilan teknologi ini sangat bergantung pada kondisi infrastruktur

dan investasi awal yang memadai. Hasil penelitian [12] [30] [31] sama-sama menekankan bahwa meskipun UHV efektif, tantangan infrastruktur tetap menjadi hambatan utama bagi adopsi global. Ketika dibandingkan dengan literatur lain mengenai kabel superkonduktor, hasil ini konsisten dengan studi [34] [35] [36], yang menunjukkan bahwa meskipun kabel superkonduktor menawarkan efisiensi yang lebih tinggi, mereka menghadapi tantangan dalam hal pendinginan dan biaya. Selain itu, penelitian ini mendukung temuan sebelumnya yang mengidentifikasi pentingnya keamanan siber dalam implementasi sistem kontrol cerdas berbasis ICT, sejalan dengan laporan (Damodar Selvam & Anirudh Khanna, 2024; Energy, 2023; Kamalov et al., 2023; Kazancı, 2024; Mohammed et al., 2024; Suman Mysore, 2024; et al., 2024)[38] [55] [60] [63] [64] yang memperingatkan tentang risiko keamanan siber yang dapat mengancam stabilitas jaringan listrik.

4.5 Hasil praktis penelitian dan implikasi ilmiah

Secara ilmiah, hasil penelitian ini memberikan bukti kuat bahwa kombinasi teknologi UHV, kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik. Dalam praktiknya, temuan ini menunjukkan bahwa meskipun tantangan infrastruktur dan biaya tetap ada, teknologi ini menawarkan solusi jangka panjang yang dapat mengatasi beberapa masalah paling mendesak dalam distribusi energi modern. Secara khusus, peningkatan efisiensi dan pengurangan kehilangan daya melalui teknologi ini dapat membantu negara-negara dengan jaringan listrik yang berkembang untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya energi mereka, serta mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik konvensional yang kurang efisien. Namun, untuk mencapai potensi penuh dari teknologi ini, investasi dalam infrastruktur, keamanan siber, dan penelitian lebih lanjut sangat diperlukan.

Dalam pengujian yang lebih intensif, penggunaan teknologi UHV pada berbagai skenario lingkungan operasional menunjukkan bahwa efisiensinya tetap tinggi bahkan dalam kondisi ekstrim seperti beban puncak dan suhu

lingkungan yang tinggi. Teknologi ini terbukti mampu mempertahankan stabilitas transmisi dengan kehilangan daya minimal, bahkan ketika menghadapi variabilitas beban yang signifikan [47] [49] [51]. Selain itu, kabel superkonduktor dalam skenario ini menunjukkan ketahanan operasional yang tinggi, dengan performa yang konsisten meskipun terjadi fluktuasi suhu yang biasanya dapat mempengaruhi efektivitas pendinginan kriogenik [65] [66]. Sistem kontrol cerdas berbasis ICT juga menunjukkan peningkatan yang jelas dalam hal responsivitas terhadap gangguan, dengan pengurangan signifikan dalam durasi pemadshiaman dan peningkatan stabilitas keseluruhan jaringan transmisi [67].

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi teknologi tegangan ultra-tinggi (UHV), kabel superkonduktor, dan sistem kontrol cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi (ICT) dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik. Penerapan UHV terbukti efektif dalam mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan kapasitas transmisi, sementara kabel superkonduktor menunjukkan potensi besar dalam hampir menghilangkan kehilangan daya, terutama dalam lingkungan perkotaan dengan kebutuhan energi yang tinggi. Selain itu, sistem kontrol cerdas berbasis ICT berhasil meningkatkan stabilitas dan respons sistem terhadap fluktuasi beban dan gangguan eksternal.

Meskipun demikian, penelitian ini juga mengungkapkan tantangan yang signifikan terkait dengan biaya, infrastruktur, dan keamanan yang perlu diatasi untuk mengimplementasikan teknologi-teknologi ini secara luas. Hambatan ini menekankan perlunya penelitian dan pengembangan lebih lanjut, serta investasi dalam infrastruktur dan keamanan siber yang memadai.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman dan pengembangan sistem transmisi tenaga listrik yang lebih efisien dan andal, dengan implikasi praktis yang signifikan untuk memenuhi kebutuhan energi global yang terus meningkat. Masa depan penerapan

teknologi ini sangat tergantung pada kemampuan untuk mengatasi tantangan teknis dan ekonomi yang diidentifikasi, serta pada dukungan kebijakan dan investasi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Wang, Y. Zhang, W. Lin, and W. Wei, "Transregional electricity transmission and carbon emissions: Evidence from ultra-high voltage transmission projects in China, *Energy Economics*, vol. 123, p. 106751, 2023. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106751>
- [2] I. Beerepoot, C. Di Ciccio, H. A. Reijers, S. Rinderle-Ma, W. Bandara, A. Burattin, D. Calvanese, T. Chen, I. Cohen, B. Depaire, G. Di Federico, M. Dumas, C. van Dun, T. Fehrer, D. A. Fischer, A. Gal, M. Indulska, V. Isahagian, C. Klinkmüller, ... F. Zerbato, "The biggest business process management problems to solve before we die," *Computers in Industry*, vol. 146, p. 103837, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103837>
- [3] J. Caron and J. R. Markusen, "Distribution Power Reliability and Transmission System Performance Report - 2023," pp. 1–23, 2023.
- [4] J. Rantaniemi, J. Jääskeläinen, J. Lassila, and S. Honkapuro, "A Study on the Impact of Distance-Based Value Loss on Transmission Network Power Flow Using Synthetic Networks, *Energies*, vol. 15, no. 2, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15020423>
- [5] Larsen, M. Lawson, K. Lacommaré, and J. Eto, "Severe weather, utility spending, and the long-term reliability of the U.S. power system, *Energy*, vol. 198, p. 117387, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117387>
- [6] S. Chen, Z. Li, and W. Li, "Integrating high share of renewable energy into power system using customer-sited energy storage," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 143, p. 110893, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110893>
- [7] S. Chen, Z. Li, and W. Li, "Integrating high share of renewable energy into power system using customer-sited energy storage," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 143, p. 110893, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110893>
- [8] M. Tomita, Y. Fukumoto, A. Ishihara, K. Suzuki, T. Akasaka, Y. Kobayashi, T. Onji, and Y. Arai, "Energy analysis of superconducting power transmission installed on the commercial railway line," **Energy**, vol. 209, p. 118318, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118318>
- [9] W. Dolega, "Development of electric power network infrastructure in aspect of electric energy supply security—case study Poland," *E3S Web of Conferences*, vol. 84, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198402002>
- [10] Paulson Institute, "Paulson Papers on Standards Power Play: China's Ultra-High Voltage Technology and Global Standards," April 2015.
- [11] JEPT Indonesia. (2023). *Foreword from the Government of Indonesia*.
- [12] Z. Zhang, D. Ding, L. He, W. Liu, C. Bai, and J. Liu, "Transient Voltage UWB Online Monitoring System for Insulation Failure Analysis and Fault Location of GIL," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4863, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14164863>
- [13] J. Li, D. Li, S. Savarese, and S. Hoi, "BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pretraining with Frozen Image Encoders and Large Language Models," **arXiv preprint arXiv:2301.12597**, 2023.
- [14] B. Han, X. Qie, Z. Xiang, Y. Lou, X. Wang, and Q. Zhang, "Study on Deeply Suppression of Overvoltage of UHV project in High Altitude Area in 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2022, pp. 1614–1618. Available: <https://doi.org/10.1109/ACPEE53904.2022.9783691>
- [15] Z. Han, Y. Su, X. Yao, Y. Ding, and C. Zhong, "Numerical Calculation of Direct Current Breakdown Voltage for Complex Short Air Gaps Under Varying Altitudes," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2588, no. 1, p. 12009, 2023. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2588/1/012009>
- [16] A. Ahmad, "Desain Prototype Penambahan Arrester Pada Arcing Horn (Saluran Transmisi Payakumbuh-Kotopanjang 150 kV Pada Area Cadas)," *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, vol. 12, no. 1, pp. 533, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7203>
- [17] F. Fan, Q. Ji, G. Wu, M. Wang, X. Ye, and Q. Mei, "Dynamic Barrier Coverage in a Wireless Sensor Network for Smart Grids," *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 41, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19010041>
- [18] F. Fan, G. Wu, M. Wang, Q. Cao, and S. Yang, "Multi-Robot Cyber Physical System for Sensing Environmental Variables of Transmission Line," *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3146, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18093146>

- [19] Y. E. M. Hamouda and S. J. I. Dwedar, "Optimally Automated Home Management for Smart Grid System Using Sensor Networks: Gaza Strip as a Case Study," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40866-020-00089-1>.
- [20] H. Abobaker, J. Genci, M. Gamcová, and G. A. Ismeal, "Design and Implementation of Secured Power Grid System With Information and Communication Technology," *Sn Applied Sciences*, vol. 2, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03820-w>.
- [21] M. Z. Jahromi, A. A. Jahromi, S. Sanner, D. Kundur, and M. Kassouf, "Cybersecurity Enhancement of Transformer Differential Protection Using Machine Learning," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/pesgm41954.2020.9282161>.
- [22] Y. Liu, H. Tian, Z. Liu, and X. Qin, "Aspects of ultra-high voltage half-wavelength power transmission technology," *Global Energy Interconnection*, vol. 1, no. 1, pp. 96–102, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.012>.
- [23] T. Alsuwian, A. Basit, A. A. Amin, M. Adnan, and M. Ali, "An Optimal Control Approach for Enhancing Transients Stability and Resilience in Super Smart Grids," **Electronics**, vol. 11, no. 19, p. 3236, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11193236>.
- [24] J. Ostergaard, J. Okholm, K. Lomholt, and O. Toennesen, "Energy losses of superconducting power transmission cables in the grid," vol. 11, pp. 2375–2378, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/77.920339>.
- [25] J. S. Oliha, P. W. Bui, and O. C. Obi, "Securing the Smart City: A Review of Cybersecurity Challenges and Strategies," **Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies**, vol. 7, no. 1, pp. 94–101, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.53022/oarjms.2024.7.1.0013>.
- [26] B. Ahn, T. Kim, S. Ahmad, S. K. Mazumder, J. Johnson, H. A. Mantooth, and C. Farnell, "An Overview of Cyber-Resilient Smart Inverters Based on Practical Attack Models," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 39, no. 4, pp. 4657–4673, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tpe.2023.3342842>.
- [27] M. A. Sheba, D. A. Mansour, and N. H. Abbasy, "A New Low-cost and Low-power Industrial Internet of Things Infrastructure for Effective Integration of Distributed and Isolated Systems With Smart Grids," **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 17, no. 20, pp. 4554–4573, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12951>.
- [28] Y. Shu and W. Chen, "Research and Application of UHV Power Transmission in China," *High Voltage*, vol. 3, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/hve.2018.0003>.
- [29] Y. Chen, L. Fu, X. Chen, S. Jiang, X. Chen, J. Xu, and B. Shen, "Ultra-low electrical loss superconducting cables for railway transportation: Technical, economic, and environmental analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 445, p. 141310, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141310>.
- [30] B. Li, J. He, Y. Li, and Y. Zheng, "Chapter 1 - Introduction," in *Ultra-High Voltage AC Transmission Systems*, B. Li, J. He, Y. Li, and Y. Zheng, Eds., pp. 1–17. Academic Press, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816205-7.00001-7>.
- [31] B. Li, J. He, Y. Li, and Y. Zheng, "Chapter 1 - Introduction," in *Ultra-High Voltage AC Transmission Systems*, B. Li, J. He, Y. Li, and Y. Zheng, Eds., pp. 1–17. Academic Press, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816205-7.00001-7>.
- [32] B. J. Mccalley, "Interregional transmission: The US is the tortoise, China is the hare," pp. 1–5, 2023.
- [33] G. Hajiri, K. Berger, F. Trillaud, J. Lévêque, and H. Caron, "Impact of Superconducting Cables on a DC Railway Network," **Energies**, vol. 16, no. 2, pp. 0–35, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16020776>.
- [34] W. Paper, "SUPERCONDUCTORS FOR ELECTRICITY,".
- [35] C. E. Bruzek, A. Allais, D. Dickson, N. Lallouet, K. Allweins, and E. Marzahn, "7 - Superconducting DC cables to improve the efficiency of electricity transmission and distribution networks: An overview," in **The Energy-Food-Water Nexus: Technology and Distribution Networks**, J.-L. Bessède, Ed., pp. 135–167. Woodhead Publishing, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-010-1.00007-0>.
- [36] M. Yazdani-Asrami, S. Seyyedbarzegar, A. Sadeghi, W. T. B. de Sousa, and D. Kottonau, "High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends" *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, no. 8, p. 83002, 2022.

- [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac7ae2>.
- [37] C. Coombs, D. Hislop, S. K. Taneva, and S. Barnard, "The strategic impacts of Intelligent Automation for knowledge and service work: An interdisciplinary review," *The Journal of Strategic Information Systems*, vol. 29, no. 4, p. 101600, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2020.101600>.
- [38] F. Kamalov, D. Santandreu Calonge, and I. Gurrib, "New Era of Artificial Intelligence in Education: Towards a Sustainable Multifaceted Revolution," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su151612451>.
- [39] Asian Development Bank (ADB), Independent Assessment of Indonesia's Energy Infrastructure Sector, May 2020, pp. 2020–2024.
- [40] W. Chen and L. Luo, "Research on Reactive Power Compensation Method of Long-Distance and Large-Capacity Offshore Wind Farm High Voltage AC Transmission System," in **The Proceedings of 2023 International Conference on Wireless Power Transfer (ICWPT2023)**, C. Cai, X. Qu, R. Mai, P. Zhang, W. Chai, and S. Wu, Eds., pp. 531–542. Springer Nature Singapore, 2024.
- [41] Q. Chen, Y. Han, X. Wang, and C. Yu, "Analysis of the Advantages of UHV Power Grids for the Power Flow Evacuation Capability of Large Power Systems," in **Proc. 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST)**, pp. 923–927, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPST56889.2023.10165249>.
- [42] D. Ding, W. Si, S. Peng, J. Cai, L. Chen, X. Li, and Y. Xu, "Electromagnetic Characteristic Analysis of Superconducting Cables," in **The Proceedings of 2023 International Conference on Wireless Power Transfer (ICWPT2023)**, C. Cai, X. Qu, R. Mai, P. Zhang, W. Chai, and S. Wu, Eds., pp. 597–604. Springer Nature Singapore, 2024.
- [43] M. Tomita, Y. Fukumoto, A. Ishihara, Y. Kobayashi, T. Akasaka, K. Suzuki, and T. Onji, "Superconducting DC power transmission for subway lines that can reduce electric resistance and save energy," **Energy**, vol. 281, p. 128250, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128250>.
- [44] S. A. Dahat and A. Dhabale, "Analysis of the combined effects of SVC and SSSC controllers to improve power system stability," **Energy Reports**, vol. 9, pp. 445–454, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.064>.
- [45] Z. S. Hasan, D. H. Al-Mamoori, and A. A. Al-Obaidi, "Transient system stability improvement using a robust controller based on CSC-STATCOM," **AIP Conference Proceedings**, vol. 2591, no. 1, p. 40041, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/5.0119857>.
- [46] A. Shrivastava, S. Pundir, P. A. Sharma, A. P. Srivastava, R. Kumar, and A. K. Khan, "Enhancing System Stability with FACTS Devices Using Deep Neural Network Algorithm," in **Proc. 2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)**, pp. 703–709, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPCSN58827.2023.00122>.
- [47] X. Xiaoling, X. Jinyu, L. Yao, W. Jiawei, X. Zheng, and Y. Zheyang, "Future Demand and Innovative Development of Advanced UHV Power Transmission technology in the Scenarios of Global Energy Interconnection," in **Proc. 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)**, pp. 4530–4535, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CIEEC54735.2022.9846684>.
- [48] K. Sun, D. Wang, S. Li, and H. Qiu, "Development of UHV Power Transmission," in **Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission**, H. Zhou, W. Qiu, K. Sun, J. Chen, X. Deng, F. Qian, D. Wang, B. Zhao, J. Li, S. Li, Y. Qiu, and J. Yu, Eds., pp. 3–21. Springer Berlin Heidelberg, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54575-1_1.
- [49] S. Tian, H. Cheng, X. Yang, Y. Fu, and S. Wei, "A Novel Comprehensive Economic Evaluation Method of Ultra High Voltage Transmission Network," in **Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, pp. 1–5, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586577>.
- [50] H. Puppala, P. R. T. Peddinti, J. P. Tamvada, J. Ahuja, and B. Kim, "Barriers to the adoption of new technologies in rural areas: The case of unmanned aerial vehicles for precision agriculture in India," **Technology in Society**, vol. 74, p. 102335, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102335>.
- [51] Y. Yuanyuan, W. Kui, Y. Dawei, L. Zhongyi, L. Zheng, Z. Jin, X. Wenbo, D. Chengdi, and S. Jia, "Efficiency Analysis of UHV Network," in **Proc. 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)**, pp. 1105–1109, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592036>.

