

Fenomena *Back Flashover* Akibat Sambaran Petir Pada SUTT 150 kV Haurgeulis–Sukamandi#2

Septian Pramuditia Putra^{*a)}

(Received 11 Mei 2024 || Revised 27 Mei 2024 || Accepted 21 Juni 2024)

Abstract: *Lightning disturbances on the 150 kV High Voltage Overhead Transmission Line (SUTT) Haurgeulis-Sukamandi #2 were analyzed to understand their causes and impacts. This study aims to identify and analyze lightning-induced disturbances using data from Fault Locator, Digital Fault Recorder, and Lightning Detection System. The methods used include calculating the protection angle, analyzing the maximum current before shield failure, and applying the Rolling Sphere method. The analysis results showed that the lightning current of -22 kA exceeded the tower's shielding capacity, causing a Back Flash Over phenomenon that led to system disruption. This finding was confirmed by comparing the measured voltage with the breakdown voltage of the insulator. The implications of this study highlight the importance of enhancing lightning protection systems, such as reducing tower grounding resistance and installing inductance reducers, to prevent similar disturbances in the future. This research provides valuable insights for improving the reliability and safety of power transmission networks in lightning-prone areas.*

Keywords: *Lightning, High Voltage Overhead Lines, Fault Locator, Lightning Detection System*

1. Pendahuluan

Gangguan petir pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dapat menyebabkan kerusakan serius pada peralatan listrik, mengancam kestabilan sistem kelistrikan, dan mengakibatkan pemadaman yang merugikan konsumen. Indonesia, dengan kondisi cuaca tropisnya, mengalami frekuensi sambaran petir yang tinggi, terutama di wilayah Jawa Barat. Kejadian gangguan pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2 pada 15 Juni 2022 menunjukkan betapa mendesaknya penelitian ini. Gangguan yang menyebabkan kenaikan arus signifikan dapat mengancam peralatan dan kontinuitas pelayanan listrik. Oleh karena itu, analisis mendalam terhadap gangguan ini sangat penting untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik di masa depan.

Permasalahan yang signifikan adalah tingginya frekuensi sambaran petir di wilayah tropis seperti Jawa Barat seperti gangguan yang muncul di tanggal 15 Juni 2022 jam 01:58 WIB pada SUTT 150kV Haurgeulis – Sukamandi #2. Peristiwa tersebut mengakibatkan kenaikan arus yang signifikan disebabkan oleh fenomena *back flashover* yang sering terjadi pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) [1]. *Back flashover* dapat menyebabkan pemadaman listrik yang luas dan kerusakan serius pada infrastruktur dan peralatan SUTT [2]. Oleh karena itu, memahami fenomena *back flashover* sangat penting untuk meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem tenaga listrik.

Beberapa penelitian terbaru menunjukkan berbagai pendekatan untuk mengatasi gangguan petir pada saluran transmisi. Menurut R. Zoro et al. (2019), kerusakan pada isolator dan peralatan lainnya karena sambaran petir menyebabkan kerugian jutaan dolar setiap tahunnya di Indonesia [3]. Sebuah studi oleh F. M. Gatta et al. (2020) mengidentifikasi bahwa model-model saat ini masih kurang dalam memprediksi dan mengatasi efek langsung sambaran petir pada garis transmisi [4]. Analisis oleh C. A. Christodoulou et al. (2019) menunjukkan bahwa kegagalan dalam koordinasi insulasi dan ground merupakan penyebab umum

dari kegagalan sistem saat terjadi sambaran petir [5]. Studi oleh Prasetyo et al. [6] menekankan pentingnya pemantauan dan analisis berkelanjutan terhadap kinerja petir.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman tentang efektifitas metode proteksi petir yang ada di Indonesia. Studi terdahulu lebih banyak fokus pada evaluasi dan analisis kinerja sistem proteksi petir di negara lain dengan kondisi yang berbeda. Selain itu, metode yang digunakan belum sepenuhnya mempertimbangkan kondisi tropis seperti di Jawa Barat, yang memiliki frekuensi petir tinggi. Pendekatan preventif yang diimplementasikan masih belum optimal, terbukti dari kejadian gangguan petir yang masih sering terjadi. Penelitian ini menawarkan konsep baru dalam analisis gangguan petir dengan pendekatan yang lebih terfokus pada kondisi lokal dan spesifikasi teknis di Indonesia. Pendekatan yang digunakan melibatkan penggunaan teknologi terbaru dalam pemantauan dan analisis gangguan, seperti Lightning Detection System (LDS) dan Fault Locator (FL) dengan Traveling Wave Signal (TWS). Penelitian ini juga mengusulkan metode perbaikan baru untuk menurunkan tahanan pentanahan dan nilai induktansi tower guna mengurangi risiko gangguan petir.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis gangguan petir yang terjadi pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2, mengidentifikasi penyebab utama gangguan, dan mengusulkan solusi teknis untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar bagi perbaikan metode proteksi petir dan mengurangi frekuensi serta dampak gangguan petir pada sistem transmisi listrik di Indonesia.

2. Metode

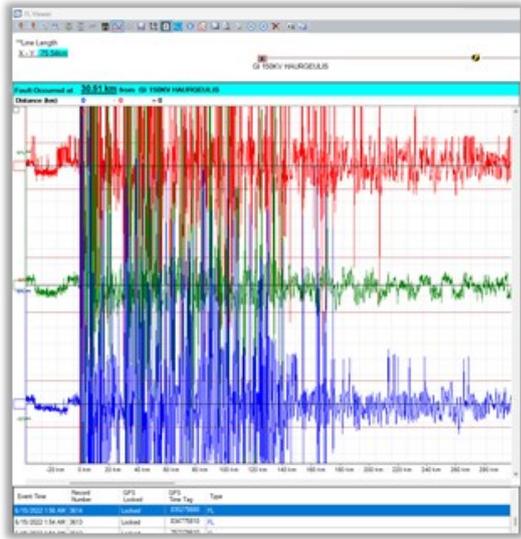
2.1 Diagram Segaris Sistem Cibatu – Mandirancan

Gambar 2.1 menunjukkan Diagram Satu Garis (Single Line Diagram) dari Sub Sistem Cibatu – Mandirancan.

*Korespondensi: septian.pramudita@pln.co.id

a) Pusat Pendidikan dan Pelatihan PT. PLN (Persero) Jakarta, Indonesia

indikasi titik gangguan berada di 30,51km dari GI Haurgeulis dan berada di sekitar Tower 105 pada pukul 01:58:28 dengan polaritas negatif sebesar -22kA. Gambar 2.4 berfokus pada sambaran petir yang secara langsung terkait dengan gangguan yang dianalisis.

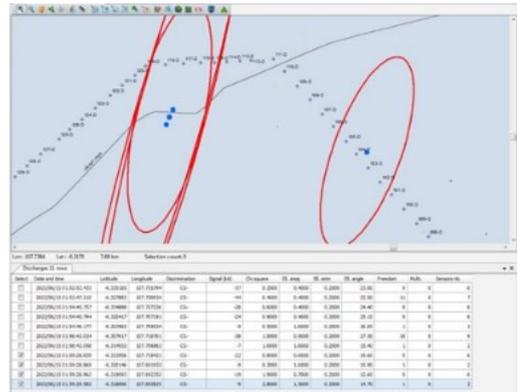


GAMBAR 2.4 HASIL REKAMAN LDS - SAMBARAN PETIR DI SEKITAR TOWER 104 15 JUNI 2022

Gambar 2.5 menunjukkan hasil rekaman LDS yang menampilkan rekaman dari beberapa sambaran petir yang terjadi dalam rentang waktu 01:52-01:59 WIB. Berdasarkan Gambar 2.5 didapatkan bahwa pada tanggal 15 Juni 2022 sekitar pukul 01:52-01:59 WIB terdapat 4 titik sambaran petir tersebar dengan 1 titik sambaran petir terdekat dengan ruas transmisi di sekitar Tower 104 pada pukul 01:58:28 dengan polaritas negative sebesar -22kA.

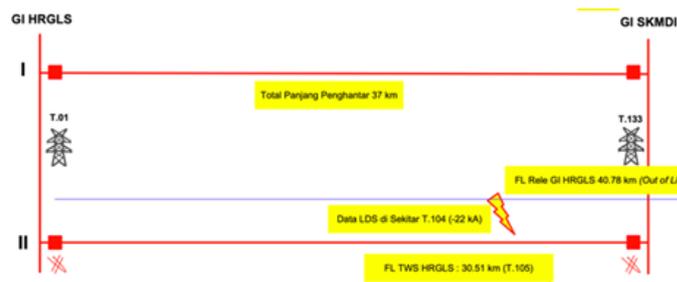
Kedua gambar ini digunakan bersama-sama untuk memberikan analisis yang komprehensif mengenai gangguan petir pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2, memastikan

bahwa semua faktor dan variabel yang relevan dipertimbangkan dalam evaluasi.



GAMBAR 2.5 REKAMAN HASIL REKAMAN LDS - AKTIVITAS PETIR PADA 15 JUNI 2022

Gambar 2.6 merupakan rekap hasil beberapa indikasi gangguan yang terjadi pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2. Gambar 2.6 menyajikan ringkasan dari data dan temuan yang diperoleh dari berbagai alat dan metode analisis yang digunakan dalam penelitian, termasuk hasil dari Distance Relay (DR), Fault Locator (FL), dan Lightning Detection System (LDS). Indikasi gangguan dari Distance Relay (DR) berupa trip pada fase R, dengan arus gangguan yang tinggi dan tegangan yang turun secara signifikan. Data dari DR mengindikasikan adanya kenaikan arus yang signifikan dan waktu clearing yang dicatat untuk masing-masing gangguan. Indikasi lokasi gangguan dari Fault Locator (FL) yang menggunakan sinyal gelombang perjalanan (Traveling Wave Signal, TWS) untuk menentukan lokasi gangguan. Lokasi gangguan diidentifikasi sekitar 3051 km dari GI Haurgeulis, yang berada di sekitar Tower 105. Indikasi Sambaran Petir dari LDS berupa adanya beberapa sambaran petir dalam rentang waktu 01:52-01:59 WIB pada tanggal 15 Juni 2022. Salah satu sambaran petir yang signifikan terjadi di dekat Tower 104 dengan arus -22kA.



GAMBAR 2.6 REKAPITULASI INDIKASI GANGGUAN PADA SUTT 150 kV HAURGEULIS – SUKAMANDI #2 DARI DR, FL, DAN LDS

2.3 Perhitungan Sudut Lindung Earth Wire

Sudut lindung merupakan salah satu parameter penting dalam sistem proteksi petir pada saluran transmisi tegangan tinggi [8], [9]. Sudut lindung menunjukkan seberapa besar area di sekitar tower yang dapat dilindungi oleh Earth Wire dari sambaran petir langsung [10]. Perhitungan ini penting untuk menentukan efektivitas sistem proteksi petir dan mengidentifikasi area yang rentan terhadap gangguan. Perhitungan sudut lindung dilakukan dengan menggunakan rumus trigonometri dasar [11] yang

mempertimbangkan tinggi tower dan jarak horizontal dari Earth Wire ke konduktor fase. Persamaan sudut lindung (α) seperti pada Persamaan (2-1)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\text{Jarak EW} - \text{Fasa R}}{\text{Tinggi Tower}} \quad (2-1)$$

Semakin kecil sudut lindung, semakin besar kemungkinan sambaran petir langsung mengenai konduktor fasa, yang dapat menyebabkan gangguan seperti yang dianalisis dalam penelitian ini [12].

2.4 Perhitungan Tegangan Maksimal dan Arus Maksimal

Tegangan dan arus maksimum adalah parameter penting dalam analisis gangguan pada sistem transmisi tegangan tinggi [13]. Perhitungan yang akurat dari tegangan dan arus ini membantu dalam memahami kondisi operasional sistem dan dalam merancang proteksi yang memadai [14].

Perhitungan tegangan maksimum pada tower saat terjadi sambaran petir menggunakan parameter seperti induktansi tower, tahanan pentanahan, dan kecuraman impuls petir. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung tegangan maksimum (V_{max}) seperti pada Persamaan (2-2).

$$V_{max} = L \frac{di}{dt} + I \cdot rt \quad (2-2)$$

dengan

- L : induktansi tower
- $\frac{di}{dt}$: kecuraman impuls petir
- I : arus sambaran petir
- rt : tahanan pentanahan

Untuk menghitung arus maksimum (I_{max}) berdasarkan data yang ada, perlu menggunakan informasi tentang parameter listrik dari tower dan sistem proteksi petir yang diterapkan. Dalam konteks perhitungan arus maksimum secara praktis, sering digunakan pendekatan bahwa arus petir maksimal tidak langsung dihubungkan dengan nilai induktansi tinggi. Akan tetapi, menggunakan pendekatan dasar dari spesifikasi standar. Apabila hanya digunakan tahanan pentanahan untuk menghitung arus maksimal yang mungkin pada sistem dengan tegangan tertentu, maka persamaan arus maksimal (I_{max}) adalah:

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{rt} \quad (2-3)$$

2.5 Metode Bola Bergulir

Metode bola bergulir menunjukkan bahwa bola dengan radius R bergulir di atas tanah, di sekitar bangunan, dan di atasnya hingga bertemu dengan tanah atau bangunan yang berhubungan dengan permukaan bumi dan berfungsi sebagai penghantar. Nilai R berasal dari jarak sambaran akhir antara objek dan petir. Semua petir akan memiliki kesempatan yang sama untuk menyambar bangunan atau tiang jika mereka berjarak R dari ujung terminasi udara dan berada di titik sentuh bola bergulir struktur [15]. Jari-jari petir atau radius petir adalah konsep yang digunakan untuk menggambarkan area di sekitar titik sambaran petir di mana efek sambaran petir, seperti medan listrik dan gelombang kejut, dapat dirasakan. Ini sering digunakan dalam konteks metode bola bergulir, yang membantu menentukan zona perlindungan dalam desain sistem proteksi petir. Persamaan jari-jari petir dapat dinyatakan ke dalam Persamaan (2-4) [16].

$$r = 6.7xI^{0.8} \text{ m} \quad (2-4)$$

Keterangan:

- r = jari-jari petir
- I = arus sambaran petir

Dengan menggunakan metode bola bergulir, data karakteristik tinggi tiang terminal udara (h) sesuai dengan tipe tiangnya dan nilai jarak sambar petir (r) dimasukkan ke dalam Persamaan (2-5) untuk melakukan analisis sudut lindung (α) [17].

$$\alpha = \sin^{-1} \left[1 - \left(\frac{h}{r} \right) \right] \quad (2-5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Sudut Lindung Earth Wire yang ada

Dalam penelitian ini, sudut lindung dihitung berdasarkan data spesifik dari SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2. Tower di SUTT Haurgeulis – Sukamandi memiliki spesifikasi dan konstruksi sebagai berikut.

- Tegangan operasi : 150 kV;
 - tipe tower : suspension;
 - isolator : berbahan kaca sebanyak 11 keping;
 - Tinggi tower (h) : 38 m;
 - Jarak EW – Fasa R : 4.37 m
 - Jarak badan tower – ujung fasa: 1.33 m.
- Sehingga nilai sudut lindung pada penelitian ini adalah:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{1.33}{4.37} = 16.93^\circ$$

Sudut lindung (α) yang dihitung untuk tower dengan spesifikasi yang diberikan adalah sekitar 16.93° . Sudut 16.93° menunjukkan seberapa besar area di sekitar tower yang dapat dilindungi oleh *Earth Wire* dari sambaran petir langsung.

Tabel 3.1 menunjukkan hasil perhitungan sudut lindung berdasarkan data di atas.

TABEL 3.2 HASIL PERHITUNGAN SUDUT LINDUNG

Parameter	Nilai
Tinggi Tower (h)	38 meter
Jarak EW ke Fasa R	4.37 meter
Sudut Lindung (α)	6.56°

Perhitungan sudut lindung menunjukkan bahwa sudut 6.56 derajat tergolong kecil, yang berarti area perlindungan *Earth Wire* terhadap sambaran petir langsung terbatas. Berdasarkan penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Zoro et al. (2019), sistem proteksi petir yang efektif seharusnya memiliki sudut lindung yang lebih besar untuk meningkatkan area perlindungan [3]. Hasil ini mengindikasikan perlunya peninjauan ulang dan kemungkinan peningkatan pada sistem proteksi petir yang digunakan saat ini.

Peningkatan sistem proteksi petir pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2 dapat dilakukan melalui beberapa metode yang telah terbukti efektif. Pemasangan surge arrester [18], peningkatan tahanan pentanahan [19], [20], dan penggunaan *shield wire* [21], adalah beberapa langkah yang dapat diambil. Implementasi metode-metode ini akan meningkatkan keandalan dan keamanan operasional saluran transmisi, mengurangi risiko gangguan akibat sambaran petir, dan memastikan kontinuitas pelayanan listrik yang lebih baik bagi konsumen.

Diketahui pula berdasarkan data yang ada, arus gangguan petir yang menyambar sebesar -22kA dan arus maksimum sebelum terjadi *Shielding Failure* pada tower dengan spesifikasi di atas adalah $13,45\text{kA}$. Dengan nilai sebesar itu maka sambaran petir yang terjadi adalah sambaran petir langsung ke *Earth Wire* atau konstruksi tower ($|-22\text{kA}| > 13,45\text{kA}$).

3.2 Analisis Menggunakan Bola Bergulir

Metode Bola Bergulir didasarkan pada prinsip bahwa sambaran petir mengikuti lintasan yang menyerupai busur bola dengan jari-jari tertentu. Radius bola ini ditentukan berdasarkan arus petir dan kondisi sistem. Perhitungan daerah lindung

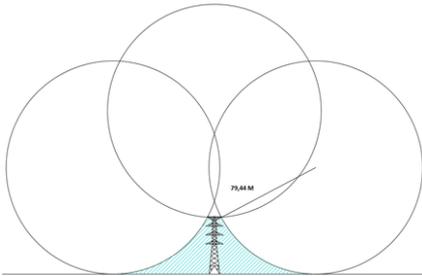
dengan metoda Bola Bergulir merupakan penentuan jarak sambaran terhadap penangkal petir. Berdasarkan data yang ada dan Persamaan (2-4) maka:

$$\text{Radius Bola Bergulir } (r) = 6.7 \times 22^{0.8} = 79.44 \text{ m}$$

Setelah diperoleh radius dari Bola Bergulir tersebut kemudian untuk menghitung luas sudut lindung suatu penangkal petir besaran arus petir 22 kA, tinggi tower (h) 38 m, dan Persamaan (2-5), maka diperoleh sudut lindung sebagai berikut

$$\alpha = \sin^{-1} \left[1 - \left(\frac{38}{79.44} \right) \right] = 31.47^\circ$$

Hasil analisis menggunakan metode Bola Bergulir dapat dilihat di Gambar 3.1.

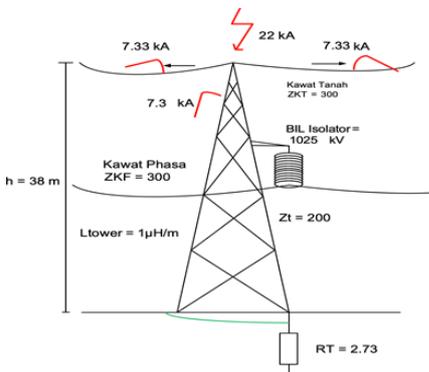


GAMBAR 3.1 HASIL ANALISIS METODE BOLA BERGULIR

Berdasarkan Gambar 3.1 dapat diketahui bahwa radius bola bergulir yaitu 79.44 m lebih tinggi daripada tinggi tower yaitu 38 m dan sudut lindung yang kecil yaitu 31.47° menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk meningkatkan sistem proteksi petir pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2. Implementasi metode yang terbukti efektif, seperti peningkatan ketinggian tower dan pemasangan surge arrester tambahan, akan membantu meningkatkan keandalan dan keamanan operasional saluran transmisi. Penelitian lebih lanjut dan pengujian lapangan diperlukan untuk memvalidasi dan mengoptimalkan rekomendasi ini.

3.3 Sambaran Petir Pada Konstruksi Tower dan Earth Wire

Berdasarkan rekaman data Gambar 2.4 yang menampilkan satu titik sambaran petir spesifik, kemungkinan petir menyambar pada konstruksi tower seperti yang diilustrasikan di Gambar 3.2 dan sambaran petir terjadi di earth wire seperti ilustrasi di Gambar 3.3.



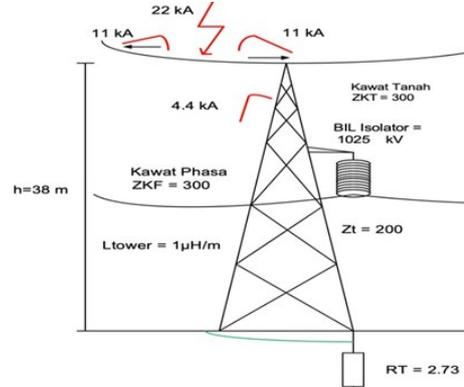
GAMBAR 3.2 SAMBARAN PETIR PADA KONSTRUKSI TOWER

Berdasarkan Gambar 3.2 dapat diketahui apabila petir menyambar di konstruksi tower maka arus petir yang mengalir ke tower sebesar 7.3 kA. Sedangkan data-data lainnya sebagai berikut:

- Kecuraman Impuls Petir : 30kA/μs
- Impedansi Earth Wire (zt) : 300ohm
- Impedansi Konduktor Fasa (zf): 300ohm
- Tahanan Pentanahan (rt) : 2,73ohm
- Induktansi Tower (L) : 38μH.

Berdasarkan data tersebut maka tegangan pada tower sesuai Gambar 3.2 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-2):

$$V = 38 \times 30 + 7.33 \times 2.73 = 1160 \text{ kV.}$$



GAMBAR 3.3 SAMBARAN PETIR PADA EARTH WIRE

Berdasarkan Gambar 3.3 dapat diketahui apabila petir menyambar di earth wire maka arus petir yang mengalir ke tower sebesar 4.4 kA. Menggunakan data yang sama dengan perhitungan sebelumnya maka tegangan pada tower sesuai Gambar 3.3 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-2):

$$V = 38 \times 30 + 4.4 \times 2.73 = 1152 \text{ kV.}$$

Dari kedua hasil perhitungan tersebut, didapat bahwa tegangan pada tower saat petir menyambar tower sebesar 1160kV dan saat menyambar Earth Wire sebesar 1152kV. Sedangkan tegangan tembus isolator sesuai dengan spesifikasi terpasang sebesar 1025 kV. Oleh karena itu saat tower terkena sambaran petir secara langsung terjadi fenomena Back Flashover (1160 kV atau 1152kV > 1025kV).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, gangguan yang terjadi pada tanggal 15 Juni 2022 disebabkan oleh sambaran petir dengan arus -22 kA yang melebihi kapasitas proteksi tower sehingga menyebabkan fenomena Back Flashover. Hal ini dikonfirmasi melalui perhitungan tegangan pada tower yang melebihi nilai tegangan tembus isolator. Tegangan pada tower ketika petir menyambar konstruksi tower sebesar 1160 kV maupun ketika petir menyambar earth wire sebesar 1152 kV, sedangkan tegangan tembus isolator sebesar 1025 kV.

Penelitian ini juga menggunakan metode Bola Bergulir untuk mengidentifikasi area perlindungan dan menunjukkan bahwa perlindungan saat ini belum memadai. Dari perhitungan diperoleh radius bola bergulir sebesar 79.44 m lebih tinggi daripada tinggi tower yaitu 38 m dan sudut lindung yang kecil yaitu 31.47° .

Untuk meningkatkan kinerja sistem proteksi petir pada SUTT 150 kV Haurgeulis – Sukamandi #2, dapat dilakukan dengan menurunkan tahanan pentanahan tower dan atau mengurangi nilai induktansi tower dengan memasang penurun induktansi tower (seperti kabel induktansi yang dipasang secara paralel).

Referensi

- [1] R. P. Luntungan, L. S. Patras, and G. MCh Mangindaan, "Analisa Daerah Lindung dan Grounding Pada Tower Transmisi Akibat Terjadinya Back Flashover," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 199–206, 2018.
- [2] A. Y. Dewi, Y. Warmi, P. Peprizal, and ..., "STUDI PENGARUH BACK FLASHOVER PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV PAYAKUMBUH-KOTO PANJANG," *Ensiklopedia ...*, vol. 2, no. 3, pp. 270–274, 2020.
- [3] R. Zoro, G. Atmajaya, B. D.-2019 2nd International, and U. 2019, "Lightning protection system for high voltage transmission line in Indonesia," in *2nd International Conference on High Voltage Engineering*, 2019. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011069.
- [4] F. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, F. P.-Energies, and U. 2020, "Lightning performance evaluation of Italian 150 kV sub-transmission lines," *Energies*, vol. 13, p. 2142, 2020.
- [5] C. A. Christodoulou, G. P. Fotis, L. Ekonomou, G. P. Fotis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "Assessment of surge arrester failure rate and application studies in Hellenic high voltage transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, pp. 176–183, 2010, doi: 10.1016/j.epr.2009.08.018.
- [6] E. Prasetyo, N. Silaen, ... A. A.-2022 I. P. 14th A., and U. 2022, "Lightning Performance of 70 kV Overhead-Line Sub-Transmission in Bandung," *2022 IEEE PES 14th Asia-Pacific Power Energy Eng. 2022*, 2022, doi: 10.1109/APPEEC53445.2022.10072250.
- [7] M. Biswal, S. M. Brahma, and H. Cao, "Supervisory Protection and Automated Event Diagnosis Using PMU Data," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 4, pp. 1855–1863, Aug. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2520958.
- [8] P. S. Hariyanto, A. Setiawan, and B. E. Prasetyo, "Analisa Proteksi Gangguan Petir Pada SUTT 70 KV Antara GI Kebonagung - Polehan," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 13–18, Mar. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I1.975.
- [9] L. L. Aini, B. S, and A. G.A, "Perlindungan Kawat Fasa dengan Optimalisasi Sudut Lindung Kawat Tanah dan Penempatan Lightning Arestor," *JST (Jurnal Sains dan Teknol.*, vol. 11, no. 1, pp. 10–17, Feb. 2022, doi: 10.23887/JSTUNDIKSHA.V11I1.40466.
- [10] R. P. Luntungan, L. S. Patras, and G. M. C. Mangindaan, "Analisa Daerah Lindung dan Grounding Pada Tower Transmisi Akibat Terjadinya Back Flashover," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 199–206, Jul. 2018, doi: 10.35793/JTEK.V7I3.20766.
- [11] A. Indah Pratiwi and S. Humena, "Analisa Kebutuhan Sistem Proteksi Petir Pada Gedung Pascasarjana Universitas Ichsan Gorontalo," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 11, no. 2, pp. 278–285, Oct. 2023, doi: 10.32487/JTT.V11I2.1861.
- [12] B. B. S. D. A. Harsono *et al.*, "KARAKTERISTIK PETIR INDONESIA DAN PENGGUNAANNYA DALAM EVALUASI UNJUK KERJA SALURAN UDARA 150 KV SAAT TERJADI SAMBARAN PETIR," *J. Technopreneur*, vol. 9, no. 1, pp. 46–53, May 2021, doi: 10.30869/JTECH.V9I1.726.
- [13] R. Agustian and B. HSR Wibowo, "Analisa Penempatan Jarak Arrester Sebagai Proteksi Transformator Terhadap Tegangan Lebih Surja Petir," *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–8, Apr. 2018.
- [14] Mahadi Septian, "DESAIN SISTEM PROTEKSI PETIR INTERNAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA KUALA BEHE KABUPATEN LANDAK," *J. Electr. Eng. Energy, Inf. Technol.*, vol. 5, no. 1, May 2017, doi: 10.26418/J3EIT.V5I1.19919.
- [15] N. N. Sriyanto, A. Warsito, and A. Syakur, "Proteksi Petir Eksternal pada Gedung ICT Center," *Transient*, vol. 7, no. 3, pp. 702–708, 2018.
- [16] U. S. Atmam, "Perancangan Kinerja Penangkal Petir Menggunakan Metoda Bola Gelinding Pada Gedung Perpustakaan Universitas Lancang Kuning Pekanbaru," *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 13, no. 1, pp. 130–135, 2015.
- [17] F. Pradipta, D. Yayan Sukma, E. Ervianto, K. Bina Widya Km, and S. Baru Panam, "Perbandingan Metode Protective Angle Dan Metode Rolling Sphere Pada Proteksi Tegangan Lebih Saluran Distribusi 13,8 Kv PT. Chevron Pacivic Indonesia," *Jom Fteknik*, vol. 2, no. 2, pp. 1–11, 2015.
- [18] T. Sakti Adiwibowo and P. Akbar Pandegatama, "Perancangan Proteksi Petir SUTET dengan Konsep Lightning Performance dan Kinerja Arrester," *ENERGI & KELISTRIKAN*, vol. 11, no. 2, pp. 98–107, Dec. 2019, doi: 10.33322/ENERGI.V11I2.769.
- [19] G. TAMAHULLAH and D. FAUZIAH, "Analisis Tahanan Pentanahan pada Kaki Tower SUTT 150 kV Jatiluhur-Padalarang Institut Teknologi Nasional," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, pp. 346–353, 2021.
- [20] B. E. Prasetyo, A. Hermawan, and S. Azizah, "Analisis Perbaikan Sistem Pentanahan Tower 70 kV pada Transmisi Wlingi - Blitar," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 205–209, Oct. 2022, doi: 10.33795/ELPOSYS.V9I3.970.
- [21] P. F. Satria, I. B. Sulistiawati, and N. P. Agustini, "ANALISIS EVALUASI SISTEM PROTEKSI PETIR (LIGHTNING PERFORMANCE) PADA JARINGAN TRANSMISI 70 KV GARDU INDUK SUKOREJO – GARDU INDUK BANGIL," *SinarFe7*, vol. 1, no. 1, pp. 87–93, Jul. 2018.