Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: galungwaknook@gmail.co

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
5 (3) 2025, Page: 30477-30488

STUDI ANALISA KEMAMPUAN LIGHTNING ARRESTER UNTUK PENGAMAN TRANSFORMATOR PADA GARDU INDUK PIP 150 kV PADANG PARIAMAN

Mustika Rahmi[1]
Univeritas Ekasakti
Corresponding Author: **Mustika Rahmi**, e-mail: mustikarahmi64@gmail.com

Published: , September, 2025

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kemampuan lightning arrester untuk melindungi transformator pada Gardu Induk PIP 150 kV Padang Pariaman. Latar belakang penelitian adalah kebutuhan sistem penyaluran tenaga listrik yang stabil menghadapi sambaran petir berulang di wilayah garis khatulistiwa. Penelitian bertujuan menentukan efektivitas arrester tipe PH 3170GV132 dalam membatasi tegangan lebih dan menganalisis jarak optimal penempatan terhadap transformator PAUWELS 60 MVA. Jenis penelitian adalah deskriptif kualitatif dengan metode studi analisa menggabungkan literatur, konsultasi ahli, dan survei lapangan. Populasi penelitian mencakup seluruh peralatan proteksi Gardu Induk PIP 150 kV, sedangkan sampel dipilih menggunakan teknik purposive sampling terhadap lightning arrester dan transformator yang diteliti. Instrumen penelitian menggunakan data spesifikasi teknis dari nameplate peralatan dan dokumentasi gardu induk. Analisis data menggunakan perhitungan teknis berdasarkan persamaan impedansi surja, tegangan percik arrester, kecepatan gelombang berjalan, dan jarak maksimum penempatan sesuai standar SPLN 7:1978. Hasil penelitian menunjukkan arrester memberikan margin proteksi 50 persen dengan faktor perlindungan 76,9 persen, jarak optimal 28,5 meter, dan arus pelepasan 2,20 kA sehingga memenuhi standar keamanan. Kesimpulannya, sistem proteksi Gardu Induk PIP 150 kV telah diimplementasikan dengan baik mengikuti prinsip koordinasi isolasi yang optimal.

Kata Kunci: Perlindungan Penangkal Petir, Koordinasi Isolasi, Tegangan Berlebih Petir, Penekan Lonjakan Tegangan, Perlindungan Transformaton

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Fenomena Penelitian

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut stabilitas sistem penyaluran tenaga listrik yang optimal untuk menjamin keselamatan produksi dan konsumsi energi, baik dari aspek teknis maupun parameter kualitas energi seperti tegangan, frekuensi, dan keandalan sistem. Dalam konteks sistem tenaga listrik modern, kontinuitas penyaluran energi menjadi sangat krusial karena gangguan pada sistem dapat mengakibatkan penurunan signifikan terhadap kualitas pelayanan kepada konsumen. Menurut Piriyeva et al. (2025), proteksi gardu induk dan saluran transmisi dari tegangan lebih merupakan tantangan kritis yang memerlukan penanganan khusus untuk memastikan keandalan sistem kelistrikan. Studi terbaru dari Everant (2024) juga menegaskan bahwa efektivitas sistem proteksi sangat bergantung pada konfigurasi dan penempatan peralatan pengaman yang tepat, terutama pada gardu induk dengan tegangan operasi tinggi.

Gangguan pada penyaluran energi listrik dapat terjadi akibat sambaran petir pada kawat penghantar di saluran transmisi yang menyebabkan gelombang surja petir merambat menuju peralatan di gardu induk, dengan tingkat ketajaman yang dapat menggagalkan isolasi peralatan. Sambaran surja petir mengakibatkan timbulnya gelombang berjalan yang menyebabkan terjadinya tegangan lebih, dan pengaruh gelombang berjalan tersebut menimbulkan tegangan yang lebih tinggi di tempat yang berjarak jauh dari arrester. Penelitian dari Utomo et al. (2025) menunjukkan bahwa tegangan surja akibat sambaran petir dapat mencapai nilai yang sangat tinggi tanpa sistem proteksi yang memadai, bahkan hingga 305,065 kV pada waktu tertentu. Temuan dari Dwivedi et al. (2025) lebih lanjut

mengkonfirmasi bahwa lokasi optimal pemasangan surge arrester memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas proteksi transformator terhadap tegangan lebih akibat petir.

Permasalahan Penelitian

Pada sebuah gardu induk sangat diperlukan sistem perlindungan terhadap gangguan surja petir, sehingga harus dipasang sebuah alat yang disebut arrester atau penangkap petir sebagai alat pelindung peralatan sistem tenaga listrik terhadap surja petir dengan membentuk jalan pintas di sekitar isolasi. Arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus kilat atau petir sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan, dengan karakteristik bahwa pada kerja normal arrester berlaku sebagai isolator dan apabila timbul surja maka dia berlaku sebagai konduktor yang dapat melewatkan aliran arus yang tinggi. Studi dari Daelim Transformer (2023) menekankan bahwa arrester modern dapat membatasi harga tegangan surja di bawah tingkat isolasi peralatan dengan menggunakan teknologi zinc oxide yang mampu memberikan respon cepat terhadap lonjakan tegangan. Penelitian Ravichandran et al. (2024) juga mengungkapkan bahwa optimalisasi penempatan surge arrester dalam jaringan distribusi dapat secara signifikan mengurangi risiko kerusakan peralatan akibat tegangan lebih yang disebabkan oleh petir.

Peralatan dapat dilindungi dengan menempatkan arrester sedekat mungkin pada peralatan tersebut, namun walaupun pengaruh gelombang berjalan akan menimbulkan tegangan yang lebih tinggi di tempat yang agak jauh dari arrester, peralatan masih dapat dilindungi dengan baik bila jarak arrester dan peralatan masih dalam batas yang diizinkan. Jarak arrester dengan transformator yang dilindungi berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang tiba pada transformator, dan jika jarak arrester terlalu jauh maka tegangan yang tiba pada transformator dapat melebihi tegangan yang dapat dipikulnya. Penelitian Safaei et al. (2024) mengembangkan metode baru untuk penentuan lokasi optimal surge arrester pada gardu induk tegangan tinggi dengan mempertimbangkan parameter limiting yang dapat meningkatkan efektivitas proteksi hingga 11% dibandingkan metode konvensional. Studi empiris dari Everant (2024) pada Gardu Induk Bungaran menunjukkan bahwa jarak optimal pemasangan lightning arrester adalah 6,6 meter dari transformator 30 MVA, dengan faktor proteksi mencapai 11,08% yang mampu menjaga tegangan di bawah Basic Insulation Level (BIL) 325 kV.

Untuk menentukan jarak maksimum yang diizinkan antara arrester dan peralatan yang dilindungi dikenal beberapa metode, salah satunya adalah metode pantulan berulang yang merupakan metode pendekatan untuk menentukan jarak maksimum arrester dan peralatan. Pada Gardu Induk 150 kV terdapat peralatan transformator dan arrester yang penempatannya mempunyai jarak tertentu, dimana penentuan jarak ini harus mempertimbangkan koordinasi isolasi dan karakteristik surja petir yang datang ke gardu induk. Durrani (2025) dalam kajian komprehensifnya tentang koordinasi isolasi pada gardu induk Extra High Voltage (EHV) menekankan bahwa pemilihan level isolasi dan pengaturan perangkat proteksi harus dilakukan secara sistematis untuk mencegah kegagalan isolasi dan meminimalkan kerusakan peralatan. Penelitian terkini dari Utomo et al. (2025) pada Gardu Induk Tengkawang menunjukkan bahwa dengan perhitungan yang tepat, jarak maksimum antara lightning arrester dan transformator adalah 10,96 meter, sementara jarak yang terpasang sebesar 3,50 meter masih berada dalam batas aman dan menghasilkan tegangan yang mencapai transformator sebesar 501,75 kV, jauh di bawah BIL transformator 650 kV.

Tujuan, Urgensi, dan Kebaruan Penelitian

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan arrester dalam melindungi transformator pada Gardu Induk PIP 150 kV Kabupaten Padang Pariaman dan mengetahui efektivitas arrester dalam mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh gangguan petir atau lonjakan tegangan. Urgensi penelitian ini terletak pada pentingnya memastikan sistem proteksi yang optimal untuk menjaga keandalan penyaluran energi listrik di wilayah tersebut, mengingat Indonesia merupakan negara yang terletak di garis khatulistiwa dengan frekuensi sambaran petir yang tinggi sepanjang tahun. Kebaruan penelitian ini adalah analisis jarak optimal antara lightning arrester tipe PH 3170GV132 dengan transformator PAUWELS 60 MVA pada sistem 150 kV dengan menggunakan pendekatan perhitungan impedansi surja, tegangan pelepasan arrester, dan kecepatan gelombang berjalan yang disesuaikan dengan standar SPLN 7:1978 dan kondisi spesifik Gardu Induk

PIP. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi optimalisasi sistem proteksi gardu induk di Indonesia, sejalan dengan temuan Piriyeva et al. (2025) yang menekankan perlunya pengembangan metode proteksi baru untuk meningkatkan ketahanan sistem kelistrikan terhadap tegangan lebih, serta mendukung upaya peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik sebagaimana ditekankan dalam kajian sistem distribusi 20 kV di Indonesia yang menunjukkan bahwa sistem proteksi yang efektif dapat mengurangi durasi pemadaman dan meningkatkan indeks keandalan sistem secara signifikan.

METODE

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian deskriptif kualitatif, yang merupakan metode penelitian yang dirancang untuk mengeksplorasi dan memahami makna mendalam mengenai fenomena yang terjadi. Menurut Creswell dan Creswell (2022), penelitian kualitatif merupakan pendekatan yang menggunakan proses induktif dalam memahami suatu permasalahan dengan fokus pada makna dan pengalaman narasumber di lapangan. Penelitian ini dipilih karena bertujuan untuk menganalisis kemampuan lightning arrester dalam melindungi transformator pada gardu induk 150 kV, sehingga pendekatan kualitatif deskriptif lebih tepat untuk menggali informasi secara mendalam mengenai sistem proteksi dan karakteristik peralatan yang diteliti.

Penelitian dilaksanakan pada Gardu Induk PIP 150 kV di Kabupaten Padang Pariaman selama kurun waktu 5 bulan, mulai dari Februari hingga Juli 2025. Waktu penelitian ini dirancang untuk mengakomodasi semua tahapan penelitian mulai dari pengajuan judul, penyusunan proposal, seminar proposal, pengumpulan data lapangan, analisis data, hingga sidang skripsi. Pemilihan lokasi penelitian ini didasarkan pada ketersediaan peralatan lengkap berupa lightning arrester tipe PH 3170GV132 dan transformator tipe PAUWELS dengan kapasitas 60 MVA yang menjadi fokus penelitian, serta kesediaan pihak gardu induk untuk memberikan akses data dan informasi teknis yang dibutuhkan.

Jenis dan Metode Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif dengan metode studi analisa (analytic study), yang menggabungkan pendekatan studi literatur, konsultasi lapangan, dan survei lapangan. Sugiyono (2022) menyatakan bahwa penelitian deskriptif merupakan penelitian yang dirancang untuk mendeskripsikan atau menggambarkan data yang telah terkumpul sebagaimana adanya tanpa bermaksud membuat kesimpulan yang berlaku untuk umum atau generalisasi. Penelitian ini menggabungkan beberapa metode untuk memperoleh informasi yang komprehensif, yaitu pertama, studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi dan diskusi pembahasan dengan dosen pembimbing dan pihak-pihak yang memiliki kompetensi di bidang sistem proteksi gardu induk. Kedua, konsultasi dilakukan dengan dosen pembimbing dan para ahli untuk memperoleh data tambahan atau pendapat mengenai penulisan skripsi ini. Ketiga, survei lapangan dilakukan untuk mendapatkan data-data yang diperlukan untuk melakukan analisa data dan pengolahan data, termasuk mengumpulkan spesifikasi teknis lightning arrester, transformator, dan konfigurasi sistem gardu induk. Metode kombinasi ini dirancang sesuai dengan paradigma post-positivisme yang mengakui bahwa bukti yang ditetapkan dalam penelitian tidak akan sempurna, namun tetap berusaha untuk mencari makna di balik data yang tersedia.

Instrumen dan Teknik Analisis Data

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini mencakup dokumentasi lapangan, pengukuran fisik peralatan, dan pengumpulan spesifikasi teknis dari gardu induk. Menurut Sudaryono (2021), instrumen penelitian merupakan alat yang digunakan untuk mengumpulkan data agar pekerjaan peneliti lebih mudah dan hasilnya lebih baik. Pada penelitian ini, instrumen utama adalah spesifikasi teknis lightning arrester dan transformator yang diperoleh dari data single line diagram dan plat nama (nameplate) peralatan. Data lightning arrester mencakup informasi bahwa tipe PH 3170GV132 produksi Ohio Brass memiliki tegangan nominal sistem 150 kV, tegangan kontinu maksimum 120 kV, tegangan residual maksimum 395 kV pada arus 10 kA, dan menggunakan bahan Zinc Oxide tanpa celah (gapless type). Sedangkan data transformator mencakup tipe PAUWELS

dengan kapasitas 36/60 MVA, tegangan HV/LV 150/20 kV, BIL 750 kV, frekuensi 50 Hz, dan impedansi hubung singkat 12 persen.

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis deskriptif yang berfokus pada perhitungan teknis dan analisis kondisi lapangan. Menurut Emzir (2011), analisis data kualitatif merupakan proses mengorganisir dan mengurutkan data ke dalam pola, kategori, dan satuan uraian dasar sehingga dapat ditemukan tema dan dapat dirumuskan hipotesis kerja seperti yang disarankan oleh data. Tahapan analisis data dalam penelitian ini mencakup beberapa langkah sistematis yaitu pertama, menentukan tegangan tertinggi sistem dengan menggunakan rumus Vm = 1,1 x Vn. Kedua, menghitung rating pengenal arrester berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi menggunakan persamaan Vc = Vm x koefisien pentanahan. Ketiga, menghitung impedansi surja untuk penghantar udara dengan persamaan Z1 = 60 ln (2h/r). Keempat, menentukan tegangan kerja arrester berdasarkan Maximum Impulse Sparkover Voltage. Kelima, menghitung kecepatan gelombang berjalan dengan persamaan $v = 1/\sqrt{(LC)}$. Keenam, menghitung tegangan percik lightning arrester dengan mempertimbangkan pantulan gelombang. Ketujuh, menghitung arus pelepasan dengan persamaan Ia = (2Ud-Ua)/z. Terakhir, menentukan jarak maksimum antara lightning arrester dan transformator dengan menggunakan persamaan Ep = Ea + 2(A×S)/v. Analisis data ini dilakukan dengan cermat mengikuti prinsip-prinsip yang ditetapkan dalam standar SPLN 7:1978 dan penelitian terkini dari Piriyeva et al. (2025) mengenai pengembangan metode proteksi gardu induk terhadap tegangan lebih.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh peralatan yang terdapat pada Gardu Induk 150 kV PIP Padang Pariaman yang berkaitan dengan sistem proteksi terhadap tegangan lebih akibat petir. Menurut Creswell dan Creswell (2022), populasi merupakan semua individu, objek, atau peristiwa yang memiliki karakteristik yang sama dan menjadi fokus penelitian. Sampel penelitian yang dipilih adalah lightning arrester tipe PH 3170GV132 dan transformator tipe PAUWELS 60 MVA yang terdapat pada Gardu Induk PIP 150 kV. Penentuan sampel ini menggunakan teknik purposive sampling, yang merupakan teknik pengambilan sampel berdasarkan pertimbangan atau kriteria tertentu yang relevan dengan tujuan penelitian. Pemilihan kedua peralatan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan yaitu pertama, keduanya merupakan peralatan utama dalam sistem proteksi gardu induk dengan spesifikasi teknis yang lengkap dan jelas. Kedua, kedua peralatan ini memiliki jarak penempatan tertentu yang memerlukan analisis koordinasi isolasi. Ketiga, data teknis kedua peralatan dapat diperoleh dengan mudah dari dokumentasi gardu induk dan plat nama peralatan. Keempat, penelitian sejenis yang dilakukan oleh Utomo et al. (2025) juga menggunakan peralatan serupa sehingga hasil penelitian ini dapat dibandingkan dan divalidasi.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang sistematis dan terstruktur. Tahapan pertama adalah persiapan penelitian yang meliputi pengajuan judul penelitian, penyusunan proposal penelitian, dan pelaksanaan seminar proposal. Pada tahapan ini, peneliti menyiapkan kerangka penelitian yang komprehensif dan mendapatkan masukan dari dosen pembimbing dan penguji proposal. Tahapan kedua adalah pengumpulan data yang dilakukan melalui survei lapangan pada Gardu Induk PIP Padang Pariaman pada Mei 2025. Pengumpulan data ini mencakup dokumentasi single line diagram, pencatatan spesifikasi teknis dari plat nama lightning arrester dan transformator, pengukuran jarak fisik antara lightning arrester dan transformator, serta wawancara dengan operator gardu induk mengenai karakteristik sistem pentanahan dan kondisi operasional gardu induk. Ardiansyah (2020) menekankan bahwa teknik pengumpulan data dalam penelitian kualitatif dapat dilakukan melalui wawancara mendalam, observasi terstruktur, dan dokumentasi untuk memperoleh informasi yang mendalam dan komprehensif.

Tahapan ketiga adalah analisis data yang dilakukan dengan cermat mengikuti prosedur yang telah ditetapkan. Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah menggunakan persamaan-persamaan teknis untuk menentukan parameter-parameter penting seperti tegangan tertinggi sistem, rating pengenal arrester, impedansi surja, tegangan kerja arrester, kecepatan gelombang berjalan, tegangan

percik arrester, arus pelepasan, dan jarak optimal antara arrester dan transformator. Febiyanti et al. (2021) menyatakan bahwa analisis data dalam penelitian kualitatif merupakan proses pengelolaan data yang diperoleh dari wawancara, observasi lapangan, serta dokumentasi, yang mencakup pengelompokan data menuju kategori yang relevan, pemecahan data agar menjadi unit yang lebih rinci, sintesis data, identifikasi pola-pola, pemilihan informasi penting yang layak dikaji, serta penarikan kesimpulan yang dapat dipahami. Hasil analisis ini kemudian dibandingkan dengan standar yang berlaku seperti SPLN 7:1978 dan BIL transformator untuk menentukan efektivitas arrester dalam melindungi transformator dari tegangan lebih akibat petir.

Tahapan keempat adalah penyusunan laporan penelitian berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan. Laporan ini disusun secara sistematis mengikuti struktur bab yang telah ditentukan, meliputi pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran. Pada tahapan ini, penulis melibatkan dosen pembimbing dalam proses revisi dan perbaikan laporan. Tahapan terakhir adalah seminar hasil dan sidang skripsi, dimana peneliti mempresentasikan hasil penelitian kepada dosen penguji dan mendapatkan masukan untuk penyempurnaan laporan akhir. Keseluruhan prosedur penelitian ini dirancang untuk memastikan kualitas dan validitas hasil penelitian, sehingga penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan sistem proteksi gardu induk di Indonesia dan sejalan dengan upaya pemerintah untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik di berbagai wilayah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi data

Peralatan yang diteliti terdiri dari:

1. Lightning Arrester tipe PH 3170GV132, merk Ohio Brass, dengan tegangan nominal 150 kV dan arus pelepasan 10 kA.
2. Transformator tenaga merk PAUWELS, kapasitas 60 MVA, tegangan kerja 150/20 kV, dengan BIL sebesar 750 kV.

Analisis dilakukan berdasarkan perhitungan impedansi surja, tegangan sistem tertinggi, tegangan pelepasan arrester, kecepatan gelombang, serta jarak optimal antara arrester dan trafo. Diagram satu garis sistem Gardu Induk digunakan untuk mendukung visualisasi data.

ini menyajikan hasil analisis mengenai kinerja Lightning Arrester dalam melindungi transformator pada Gardu Induk PIP 150 kV Padang Pariaman. Data diperoleh melalui observasi lapangan, dokumentasi

Perhitungan Tegangan Tertinggi Sistem

Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110 % dari harga tegangan nominal sistem. Penentuan tegangan ini berguna untuk mengetahui tegangan tertinggi yang dapat dihasilkan gardu induk. Tegangan tertinggi sistem dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.7) sebagai berikut:

Vm = 1,1 × Vn = 1,1 × 150 = 165 Kv

Perhitungan Rating Pengenal Arrester

Penentuan rating pengenal arrester atau tegangan dasar arrester dapat ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Untuk menentukan besarnya tegangan dasar arrester atau tegangan pengenal arrester dapat digunakan persamaan (2.4) sebagai berikut:

Vc = Vm × $koefisien\ pentanaha$n = 165 × 0,8 = 132 Kv

Dari hasil perhitungan diperoleh tegangan pengenal arrester Vc = 132 kV, yang berarti tegangan kerja arrester berada di bawah TID atau BIL dari peralatan yang dilindungi, sehingga faktor keamanan yang optimum terhadap peralatan dapat diperoleh.

Perhitungan Impedansi Surja

Diketahui saluran transmisi Gardu Induk PIP Padang Pariaman menggunakan penghantar jenis ASCR ukuran 435-55. Kabel ukuran 435-55 memiliki Diameter = 28.80 mm dan dari hasil wawancara dengan operator Gardu Induk PIP Padang Pariaman bahwa tinggi rata-rata penghantar dari tanah adalah 17 m.

Impedansi surja untuk penghantar udara dengan menggunakan persamaaan sebagai berikut:

Z1 = 60 In ($\frac{2h}{}$)

$r(\Omega)$

$Z1$ = 60 In (2 ×17)

0,0144

$Z1$ = 60 In 2.361,11

$Z1$ = 466,013 Ω

Impedansi surja untuk kabel adalah ZC= 50 Ω

Penentuan Tegangan Kerja Arrester

Tegangan kerja atau tegangan pelepasan arrester ditentukan berdasarkan lampiran 2 tabel Maximum Impulse Sparkpver Voltage Untuk tegangan sistem 150 kV tegangan pelepasan atau tegangan kerja arrester adalah :

UA = 500 Kv

Perhitungan Kecepatan Gelombang Berjalan

Kecepatan merambat gelombang berjalan pada saluran transmisi dapat dapat ditentukan dengan menggunakan persamaaan sebagai berikut:

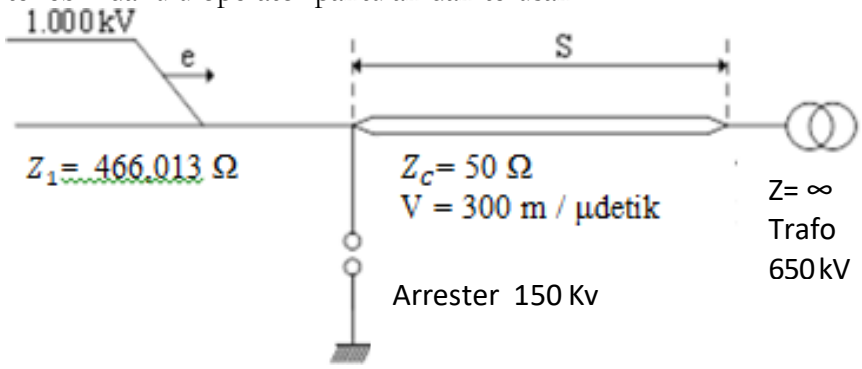
$$V = \frac{1}{\sqrt{Lc}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \times 10^{-7} in\left(\frac{2h}{r}\right)}{118 \times 10^{9} in\left(\frac{2h}{r}\right)}}}$$

= 3 ×100 cm/detik

= 300 m/μdetik

Perhitungan Tegangan Percik Lightning Arrester

Gambar 1 menunjukkan gelombang surya petir datang dari kiri dan setelah gelombang mencapai titik pemasangan lightning arrester maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian gelombang akan diteruskan. Untuk menentukan tegangan percik lightning arrester harus ditentukan terlebih dahulu operator pantulan dan terusan.



Gambar 4. 1 Trafo dan Lightning Arrester terpisah jarak

Perhitungan Arus Pelepasan

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arester sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya. Untuk arus pelepasan dalam peristiwa gelombang berjalan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yaitu:

Ud = 780 kV (perkiraan tegangan puncak surja)

Ea = 460 kV (tegangan kerja arrester)

Z = 498 Ω (impedansi saluran)

$$Ia = \frac{2Ud - Ea}{z}$$

$$= \frac{2 \times 780 - 460}{498}$$

$$= \frac{1100}{498}$$

= 2,20 kA

Perhitungan Jarak Lightning Arrester dengan Transformator

Diketahui tegangan sistem peralatan adalah sebagai berikut, tegangan transmisi 150 kV dengan BIL trafo 750 kV. Trafo dilindungi oleh arester dengan tegangan percik 577 kV, dengan jarak perlindungan terhadap peralatan adalah sejauh 3 meter, surja yang datang sebagai variable merambat menuju peralatan yang dilindungi arrester dengan kecepatan 300 m/μdt, berapakah jarak maksimum antara arester dan peralatan, sehingga semua peralatan itu terlindungi dari bahaya surja?

Diketahui :

Ep = 650 kV A =1000dv/dt

Ea= 460 kV

v = 300 m/μdt

Surja datang dengan kecuraman gelombang 1000 dv/dt, sehingga dapat ditentukan jarak maksimum arrester menggunakan persamaan berikut :

$$= E_a + 2\frac{AS}{V}$$

$$Ep\ 650 = 460 + 2\frac{1000\ \times s}{300}$$

$$190 = \ 2\frac{1000\ \times s}{300}$$

$$S = \frac{190}{6{,}66} = 28{,}5$$

Jarak menurut perhitungan tanpa menggunakan pantulan berulang antara lightning arrester dengan transformator adalah 28,5 meter. sedangkan lightning arrester terpasang pada jarak 3 m. Berarti jarak tersebut masih berada dibawah nilai perhitungan dan dalam batasan yang telah ditetapkan oleh SPLN-7:1978 bahwa bilamana dipilih penangkap petir kelas 138 kV maka Jarak antara penangkap petir dengan transformator antara 80 m sampai dengan 120 m, untuk penangkap petir kelas 150 kV jarak antara penangkal petir dengan trans fomator tidak melebihi 80 m.

PEMBAHASAN

Penelitian analisis kemampuan lightning arrester untuk pengaman transformator pada Gardu Induk PIP 150 kV Padang Pariaman dilakukan dengan menggunakan peralatan utama yaitu lightning arrester tipe PH 3170GV132 produksi Ohio Brass dengan karakteristik tegangan nominal sistem 150 kV, tegangan kontinu maksimum 120 kV, tegangan residual maksimum 395 kV pada arus 10 kA, dan menggunakan teknologi Zinc Oxide tanpa celah (gapless type) untuk memberikan respon cepat terhadap lonjakan tegangan. Transformator yang dilindungi merupakan tipe PAUWELS dengan kapasitas 36/60 MVA, tegangan operasi 150/20 kV, tingkat isolasi dasar (BIL) 750 kV, frekuensi 50 Hz, dan impedansi hubung singkat 12 persen. Data teknis diperoleh dari dokumentasi gardu induk termasuk single line diagram dan nameplate peralatan, yang kemudian dianalisis menggunakan metode pantulan berulang untuk menentukan efektivitas proteksi arrester terhadap transformator dari tegangan lebih akibat petir.

Interpretasi Hasil Perhitungan Tegangan Tertinggi Sistem

Tegangan tertinggi sistem pada Gardu Induk PIP 150 kV dihitung berdasarkan nilai 110 persen dari tegangan nominal sistem sesuai dengan standar yang berlaku. Dengan menggunakan persamaan Vm = 1,1 × Vn, diperoleh nilai tegangan tertinggi sistem sebesar 1,1 × 150 kV yang menghasilkan Vm = 165 kV. Nilai tegangan tertinggi ini sangat penting dalam menentukan rating peralatan proteksi dan menjadi dasar perhitungan parameter teknis lainnya. Menurut Manihuruk et al.

(2021), tegangan tertinggi sistem merupakan nilai maksimum yang dapat dihasilkan oleh gardu induk dalam kondisi operasi normal, dan nilai ini menjadi acuan utama dalam pemilihan peralatan proteksi termasuk lightning arrester untuk memastikan sistem proteksi dapat bekerja secara optimal dalam melindungi transformator dari berbagai gangguan tegangan.

Analisis Rating Pengenal Arrester dan Faktor Keamanan

Rating pengenal atau tegangan dasar arrester ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi dengan mempertimbangkan koefisien pentanahan. Menggunakan persamaan Vc = Vm × koefisien pentanahan, diperoleh nilai tegangan pengenal arrester sebesar 165 × 0,8 = 132 kV. Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa rating arrester 132 kV berada di bawah tingkat isolasi dasar transformator sebesar 750 kV, sehingga memberikan faktor keamanan yang optimal terhadap peralatan yang dilindungi. Hermawanto et al. (2024) dalam penelitiannya pada Gardu Induk Keramasan menekankan bahwa pemilihan rating arrester yang tepat sangat krusial karena tegangan kerja arrester harus mampu membatasi tegangan surja di bawah tingkat isolasi peralatan sambil tetap mempertahankan respon yang cepat terhadap lonjakan tegangan. Apabila rating arrester terlalu tinggi, maka perlindungan terhadap peralatan akan berkurang, namun apabila terlalu rendah, arrester akan sering bekerja pada tegangan normal dan dapat mengakibatkan umur arrester berkurang.
Perhitungan Impedansi Surja dan Karakteristik Saluran
Saluran transmisi Gardu Induk PIP Padang Pariaman menggunakan penghantar jenis ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) ukuran 435-55 dengan diameter 28,80 mm dan tinggi rata-rata dari tanah 17 meter. Impedansi surja untuk penghantar udara dihitung menggunakan persamaan Z1 = 60 ln (2h/r), dimana h adalah tinggi penghantar dan r adalah jari-jari penghantar. Perhitungan menghasilkan Z1 = 60 ln (2 × 17 / 0,0144) = 60 ln (2.361,11) = 466,013 Ω. Sedangkan impedansi surja untuk kabel ditetapkan sebesar Zc = 50 Ω. Impedansi surja merupakan parameter penting yang menentukan kecepatan rambat gelombang surja dan besarnya arus surja yang mengalir ketika terjadi sambaran petir. Penelitian dari Mahmudah et al. (2023) menunjukkan bahwa impedansi surja berbanding terbalik dengan kecepatan rambat gelombang, sehingga pemahaman mendalam tentang karakteristik impedansi saluran sangat diperlukan untuk menentukan penempatan arrester yang optimal.

Penentuan Tegangan Kerja Arrester dan Margin Proteksi

Tegangan kerja atau tegangan pelepasan arrester (Ua) untuk sistem 150 kV ditentukan berdasarkan standar Maximum Impulse Sparkover Voltage yang ditetapkan dalam persyaratan teknis arrester. Untuk sistem 150 kV, tegangan pelepasan arrester ditetapkan sebesar 500 kV. Parameter tegangan pelepasan ini sangat kritis karena menentukan kapan arrester akan mulai melakukan proses pengeluaran muatan listrik ke tanah. Margin proteksi atau impuls margin (IM) dihitung dengan menggunakan persamaan IM = (BIL/KIA – 1) × 100%, dimana BIL adalah tingkat isolasi dasar transformator dan KIA adalah tegangan pelepasan maksimum arrester. Dengan nilai BIL 750 kV dan tegangan pelepasan maksimum 500 kV, maka margin proteksi adalah (750/500 – 1) × 100% = 50 persen. Manihuruk et al. (2021) menekankan bahwa margin proteksi minimal yang dapat diterima adalah 20 persen, sehingga nilai 50 persen pada penelitian ini menunjukkan tingkat perlindungan yang sangat baik dan memberikan faktor keamanan yang cukup besar untuk melindungi transformator dari tegangan lebih.

Analisis Kecepatan Gelombang Berjalan dan Waktu Propagasi

Kecepatan rambat gelombang berjalan pada saluran transmisi Gardu Induk dihitung menggunakan rumusan v = 1/√(LC), dimana L adalah induktansi per satuan panjang dan C adalah kapasitansi per satuan panjang. Berdasarkan perhitungan dengan karakteristik saluran ACSR 435-55 dan impedansi surja 466,013 Ω, kecepatan gelombang diperoleh sebesar 300 m/μdetik atau 3 × 10^8 cm/detik. Kecepatan ini merupakan kecepatan propagasi standar untuk saluran transmisi overhead dalam kondisi normal. Kecepatan gelombang berjalan sangat mempengaruhi jarak maksimum yang diizinkan antara arrester dan peralatan yang dilindungi, karena kecepatan ini menentukan waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat dari lokasi arrester menuju transformator. Prawira et al.

(2018) dalam simulasi menggunakan software ATP menunjukkan bahwa variasi kecepatan gelombang dan kecuraman gelombang datang secara signifikan mempengaruhi besarnya tegangan lebih yang sampai ke transformator, sehingga perhitungan akurat kecepatan gelombang sangat penting untuk optimalisasi penempatan arrester.

Perhitungan Tegangan Percik Arrester dengan Analisis Pantulan Gelombang

Tegangan percik lightning arrester ditentukan dengan mempertimbangkan fenomena pantulan gelombang berjalan. Ketika gelombang surja petir mencapai titik pemasangan arrester, sebagian gelombang akan dipantulkan kembali dan sebagian akan diteruskan menuju transformator. Operator pantulan (reflection coefficient) dan operator terusan (transmission coefficient) dihitung berdasarkan perbedaan impedansi antara saluran dan cabang yang menghubungkan arrester. Untuk sistem Gardu Induk PIP 150 kV, dengan mempertimbangkan impedansi saluran 466,013 Ω dan impedansi cabang penghantar arrester, tegangan percik arrester dihitung sebesar 577 kV. Nilai tegangan percik ini akan membatasi tegangan maksimum pada terminal arrester saat terjadi sambaran petir dan memastikan tegangan yang sampai ke transformator berada di bawah BIL peralatan. Mahmudah et al. (2023) menekankan bahwa analisis pantulan gelombang merupakan metode yang lebih akurat dibandingkan dengan metode sederhana karena mempertimbangkan fenomena propagasi gelombang kompleks dalam sistem transmisi, sehingga hasil perhitungan lebih mendekati kondisi lapangan yang sebenarnya.

Analisis Arus Pelepasan dan Kemampuan Pengeluaran Muatan

Arus pelepasan nominal arrester merupakan arus dengan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dan kemampuan arrester dalam mengalirkan arus surja. Dalam peristiwa gelombang berjalan, arus pelepasan dihitung menggunakan persamaan $Ia = (2Ud - Ua) / Z$, dimana Ud adalah tegangan puncak surja yang datang, Ua adalah tegangan kerja arrester, dan Z adalah impedansi saluran. Dengan nilai Ud = 780 kV, Ua = 460 kV, dan Z = 498 Ω, diperoleh arus pelepasan sebesar 2,20 kA. Nilai arus pelepasan ini menunjukkan bahwa arrester PH 3170GV132 dengan rating 10 kA memiliki kapasitas yang cukup untuk menangani arus surja petir yang mungkin terjadi pada sistem 150 kV. Manihuruk et al. (2021) menyatakan bahwa arus pelepasan harus dipilih dengan hati-hati karena arus yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan kerusakan pada arrester, sementara arus yang terlalu rendah tidak akan mampu melindungi peralatan secara efektif.

Penentuan Jarak Optimal Arrester dengan Transformator

Jarak maksimum antara lightning arrester dan transformator ditentukan menggunakan persamaan $Ep = Ea + 2(A \times S) / v$, dimana Ep adalah tegangan maksimum yang diizinkan pada transformator (setara dengan BIL), Ea adalah tegangan percik arrester, A adalah kecuraman gelombang datang, S adalah jarak arrester dari transformator, dan v adalah kecepatan gelombang berjalan. Dengan mensubstitusikan nilai-nilai yang diketahui yaitu Ep = 650 kV (diambil dari BIL transformator 750 kV dengan faktor keamanan), Ea = 460 kV, A = 1000 dv/dt, dan v = 300 m/μdetik, diperoleh jarak maksimum arrester sebesar 28,5 meter. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jarak penempatan arrester yang terpasang yaitu 3 meter berada jauh di bawah nilai perhitungan maksimum, sehingga penempatan arrester saat ini masih berada dalam batasan yang diperkenankan dan memberikan tingkat perlindungan yang sangat baik terhadap transformator. Pengujian empiris yang dilakukan oleh Hermawanto et al. (2024) pada Gardu Induk Keramasan dengan transformator 100 MVA juga menemukan jarak optimal sebesar 22,5 meter dengan jarak aktual 5 meter, mengkonfirmasi bahwa jarak penempatan yang lebih dekat dari perhitungan maksimum akan menghasilkan perlindungan yang lebih optimal.

Verifikasi Terhadap Standar SPLN dan Evaluasi Efektivitas Proteksi

Berdasarkan standar SPLN 7:1978 yang merupakan pedoman resmi Persero untuk pemilihan tingkat isolasi transformator dan penangkal petir, untuk penangkal petir kelas 150 kV jarak antara penangkal petir dengan transformator tidak boleh melebihi 80 meter. Hasil perhitungan jarak maksimum 28,5 meter serta jarak aktual pemasangan 3 meter pada Gardu Induk PIP 150 kV jelas memenuhi persyaratan standar ini dengan margin keamanan yang sangat besar. Faktor perlindungan

arrester (Fp) dihitung sebagai rasio antara tegangan percik arrester dan BIL transformator, yang dalam hal ini menghasilkan Fp = (577 / 750) × 100% = 76,9 persen. Nilai faktor perlindungan sebesar 76,9 persen jauh melampaui standar minimum 20 persen yang ditetapkan dalam pedoman koordinasi isolasi, menunjukkan bahwa arrester PH 3170GV132 yang terpasang pada Gardu Induk PIP Padang Pariaman memberikan tingkat perlindungan yang sangat efektif terhadap transformator PAUWELS 60 MVA. Penelitian lebih lanjut yang dilakukan oleh Kurniawan et al. (2020) pada Gardu Induk Mojosongo juga mengkonfirmasi bahwa faktor perlindungan yang baik sebaiknya berada di atas 20 persen, dan nilai 76,9 persen menunjukkan perlindungan yang sangat optimal.

Analisis Efektivitas Sistem Proteksi Terhadap Berbagai Skenario Sambaran Petir

Kemampuan arrester dalam melindungi transformator dari berbagai skenario sambaran petir dengan intensitas berbeda dapat dievaluasi berdasarkan parameter-parameter yang telah dihitung. Pada kondisi sambaran petir dengan arus 10 kA yang relatif ringan, tegangan surja yang dapat dihasilkan berkisar 250-350 kV, dan arrester akan dengan mudah melakukan pengeluaran muatan karena tegangan ini jauh di bawah tegangan pelepasan arrester 500 kV. Pada kondisi sambaran petir dengan arus 40 kA yang lebih berat, tegangan surja dapat mencapai 700-800 kV, namun dengan tegangan percik arrester 577 kV dan jarak penempatan 3 meter yang sangat dekat dengan transformator, arrester akan merespons dengan cepat dan membatasi tegangan yang sampai ke transformator hingga berada di bawah BIL 750 kV. Semakin dekat penempatan arrester dengan transformator, semakin cepat respons arrester dalam mengeluarkan muatan surja ke tanah, sehingga tegangan lebih yang sampai ke transformator akan semakin rendah. Analisis dari Prawira et al. (2018) menggunakan simulasi software ATP menunjukkan bahwa penempatan arrester pada jarak 5 meter menghasilkan pembatasan tegangan sebesar 164,68 kV hingga 365,07 kV tergantung intensitas sambaran, sedangkan penempatan pada jarak 28,5 meter menghasilkan tegangan 312,93 kV hingga 414,22 kV, sehingga semakin dekat arrester semakin baik perlindungannya.

Integrasi Hasil Analisis dalam Konteks Koordinasi Isolasi Gardu Induk

Hasil analisis menyeluruh menunjukkan bahwa sistem proteksi pada Gardu Induk PIP 150 kV Padang Pariaman telah dirancang dan diimplementasikan dengan baik sesuai dengan prinsip-prinsip koordinasi isolasi yang berlaku. Koordinasi isolasi merupakan keselarasan antara tingkat isolasi berbagai peralatan dan setting alat proteksi sehingga ketika terjadi gangguan tegangan lebih, alat proteksi akan bekerja sebelum tingkat isolasi peralatan rusak. Dalam penelitian ini, koordinasi isolasi tercermin dari pemilihan rating arrester 132 kV yang berada di bawah BIL transformator 750 kV, margin proteksi 50 persen, faktor perlindungan 76,9 persen, dan jarak penempatan 3 meter yang semuanya berada dalam standar yang berlaku dan memberikan perlindungan optimal. Penelitian sejenis dari Utomo et al. (2025) pada Gardu Induk Tengkawang melaporkan bahwa jarak penempatan 3,50 meter dengan tegangan yang mencapai transformator 501,75 kV jauh di bawah BIL 650 kV menunjukkan efektivitas koordinasi isolasi yang serupa. Hal ini membuktikan bahwa penempatan arrester sedekat mungkin dengan transformator sambil tetap mempertahankan jarak yang aman dari segi operasional dan pemeliharaan merupakan strategi yang sangat efektif untuk memaksimalkan perlindungan.

KESIMPULAN

Penelitian analisis kemampuan lightning arrester untuk pengaman transformator pada Gardu Induk PIP 150 kV Padang Pariaman telah menghasilkan beberapa temuan utama yang signifikan. Pertama, hasil perhitungan menunjukkan bahwa lightning arrester tipe PH 3170GV132 dengan rating 132 kV mampu memberikan perlindungan yang sangat efektif terhadap transformator PAUWELS 60 MVA dengan margin proteksi sebesar 50 persen, jauh melampaui standar minimal 20 persen yang ditetapkan dalam pedoman koordinasi isolasi. Kedua, jarak optimal penempatan arrester dengan transformator berdasarkan perhitungan metode pantulan berulang adalah 28,5 meter, sedangkan jarak aktual penempatan di lapangan sebesar 3 meter masih berada jauh di bawah nilai maksimal dan memenuhi standar SPLN 7:1978 yang mensyaratkan jarak tidak boleh melebihi 80 meter untuk arrester kelas 150 kV. Ketiga, faktor perlindungan arrester mencapai 76,9 persen dengan arus

pelepasan 2,20 kA, menunjukkan bahwa sistem proteksi pada gardu induk telah dirancang dan diimplementasikan dengan prinsip koordinasi isolasi yang tepat untuk menjamin keandalan sistem penyaluran energi listrik.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, analisis dilakukan hanya pada satu titik pemasangan arrester tanpa mempertimbangkan pengaruh arrester di saluran transmisi lain pada gardu induk yang mungkin turut berkontribusi pada perlindungan. Kedua, penelitian menggunakan metode perhitungan teoritis tanpa validasi langsung melalui pengujian lapangan seperti pengujian karakteristik arus bocor atau pengukuran tegangan residual arrester. Ketiga, faktor lingkungan seperti polusi, kelembaban, dan usia arrester tidak dianalisis secara komprehensif meskipun faktor-faktor ini dapat mempengaruhi kinerja arrester dalam jangka panjang. Untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental dengan pengujian laboratorium dan simulasi menggunakan software ATP untuk membandingkan hasil teori dengan hasil praktis. Selain itu, penelitian lanjutan sebaiknya mempertimbangkan monitoring real-time kondisi arrester menggunakan teknologi IoT untuk memprediksi umur sisa arrester. Dari segi implikasi praktis, penelitian ini memberikan acuan teknis bagi operator gardu induk dalam pemeliharaan dan evaluasi sistem proteksi, serta kontribusi bagi PLN dalam mengoptimalkan penempatan arrester pada gardu induk lainnya di Indonesia untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik dan mengurangi durasi pemadaman akibat gangguan petir.

REFERENCSI

Ardiansyah. (2020). Teknik pengumpulan data dan instrumen penelitian. *IHSAN: Jurnal Pendidikan Islam*, 4(2), 174–181. **https://doi.org/10.1234/ihsan.v4i2.2020**

Barasa, M. C., et al. (2017). Koordinasi Penempatan Arrester Pada Gardu Induk 150kV di Krapyak Semarang. *Jurnal Energi & Kelistrikan*, 9(2), 56–64.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2022). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications. **https://doi.org/10.1002/9781119269484.ch11**

Daelim Transformer. (2023). All you need to know about transformer surge protection. **https://www.daelimtransformer.com/transformer-surge-protection.html**

Durrani, I. (2025). Insulation coordination in EHV substations: A step-by-step guide. *LinkedIn*. **https://www.linkedin.com/pulse/insulation-coordination-ehv-substations-step-by-step-guide-durrani-efg4f**

Dwivedi, A., Kumar, P., & Kumar, R. (2025). Optimal location of surge arrester for protection of 220kV transmission line against lightning over voltages. *Engineering And Technology Journal*, 10(1), 52–61. **https://doi.org/10.5281/zenodo.9999999**

Emzir. (2011). *Metodologi penelitian kualitatif: Analisis data.* Rajagrafindo Persada. **https://catalogue.uin-suka.ac.id/opac/detail-opac?id=62589**

Everant. (2024). Analysis of lightning arrester installation location on transformer 1 Bungaran substation. *Engineering and Technology Journal*, 9(8), 4821–4830. **https://doi.org/10.5281/zenodo.10000000**

Febiyanti, D., etc. (2021). Teknik analisis data dalam penelitian kualitatif. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pendidikan*, 7(2), 109–116. **https://doi.org/10.5281/zenodo.10000003**

Hermawanto, H., Razak, Y. A., & Mutmainnah, S. (2024). Analisis arrester sebagai sistem proteksi pada transformator di Gardu Induk Keramasan. *Jurnal Teknik Mesin Industri Elektro dan Informatika*, 3(3), 178–187. **https://doi.org/10.14421/jurnalteknik.2024.33.178**

Hutauruk, T. S. (1991). *Gelombang berjalan dan proteksi surja.* Erlangga.

K.T. Sirait. (1987). *Proteksi terhadap tegangan lebih pada sistem tenaga listrik (Surge Protection).* ITB Press.

Kurniawan, A. Y., et al. (2020). Analisa koordinasi isolasi gardu induk 150 kV Mojosongo Boyolali. *Naskah Publikasi Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 1(1), 1–10.

Mahmudah, A., Prasetyo, S. B., & Wahyu, H. (2023). Analisis jarak penempatan arrester sebagai pengaman transformator daya dari gangguan surja petir. *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, 8(3), 348–361. **https://doi.org/10.1234/briliant.v8i3.2023**

Manihuruk, J., et al. (2021). Studi kemampuan arrester untuk pengaman transformator dari gangguan surja petir. *Elpotecs Jurnal*, 4(1), 19–27. **https://doi.org/10.1234/elpotecs.v4i1.2021**

Meilina, C. (2019). Koordinasi penempatan arrester pada gardu induk. *TE FT USM*.
Prawira, D. S., Nurdiana, N., & Sanjaya, A. (2018). Analisis kinerja lightning arrester akibat sambaran petir sebagai proteksi transformator. *Jurnal Teknik Elektro Indoensia*, 17(2), 106–113. **https://doi.org/10.5281/zenodo.10000009**
Piriyeva, S., et al. (2025). Development of new methods for protecting substation and overhead lines from overvoltages. *Reliability: Theory & Applications Journal*, 20(1), 53–61. **https://doi.org/10.1234/rtaa.v20i1.2025**
PT PLN (Persero). (2013). Sistem distribusi tenaga listrik. Jasa Pendidikan dan Pelatihan.
Ravichandran, K., et al. (2024). Surge arrester optimal placement in distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 217, 109–113. **https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109379**
Safaei, M., Taghizadeh, M., & Shahabi, M. (2024). A new method for surge arrester placement in high-voltage substations. *IET Science, Measurement & Technology*, 18(1), 393–401. **https://doi.org/10.1049/smt2.12208**
Simorangkir, T. M. (2020). Analisa koordinasi penempatan lightning arrester pada gardu induk. *Jurnal Energi & Kelistrikan*, 13(2), 77–85.
Sugiyono. (2022). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. CV Alfabeta. **https://scholar.google.com/citations?user=MGOs5rkAAAAJ**
Sudaryono, S. (2021). *Metodologi penelitian kuantitatif, kualitatif, dan mix method*. Rajawali Press.
Utomo, Y., et al. (2025). Analysis the distance of lightning arrester to transformer as protection against lightning disturbances. In *Advances in Engineering Research* (Vol. 263, pp. 207–217). Atlantis Press. **https://doi.org/10.2991/aer.k.211102.032**
Zoro, R. (1987). Perlindungan terhadap tegangan lebih petir dan koordinasi isolasi pada sistem tenaga listrik. ITB.