

ANALISIS PENEMPATAN ARESTER SEBAGAI PROTEKSI TRANSFORMATOR DARI SAMBARAN PETIR PADA GARDU INDUK PLN 150KV TEMANGGUNG

Ilham Putra Palista¹⁾, dan Dedi Nugroho²⁾

^{1, 2)}Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya No.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112
e-mail: ilhamputrapalista@gmail.com¹⁾, dan dedi.nugroho@unissula.ac.id²⁾

ABSTRACT

These External disturbances in the form of lightning strikes pose a serious threat to the reliability of substation equipment, particularly power transformers, which play a vital role in the electricity transmission system. This study aims to analyze the effectiveness of lightning arrester placement and determine its effective distance from the power transformer at the 150kV Temanggung Substation to ensure that surge voltages do not exceed the Basic Insulation Level (BIL). The methodology employed includes documentation studies and mathematical calculations using the lattice diagram method (repeated reflection method) to evaluate insulation coordination. The analysis results indicate that a system without arrester protection can experience a surge voltage increase of up to 830.6 kV at 10 μ s, exceeding the safety limit. With the installation of an arrester featuring a sparkover voltage of 577 kV, the surge voltage reaching the transformer was successfully suppressed to 730.76 kV at 10.21 μ s and continued to decrease thereafter. Theoretically, the maximum allowable distance based on the repeated reflection method is 23.1 meters. The actual field placement at a distance of 4 meters proved to be highly effective as it is well below the maximum threshold and complies with the SPLN-7:1978 standard, providing optimal protection for the transformer against overvoltage damage.

Keywords: Lightning Arrester, Power Transformer, Lightning Strike, Repeated Reflection Method, 150kV Substation.

ABSTRAK

Gangguan eksternal berupa sambaran petir merupakan ancaman serius bagi keandalan peralatan di gardu induk, terutama pada transformator daya yang memiliki peran vital dalam sistem penyaluran energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penempatan lightning arrester dan menentukan jarak efektifnya terhadap transformator daya di Gardu Induk 150kV Temanggung guna memastikan tegangan surja tidak melampaui ambang batas isolasi (Basic Insulation Level/BIL). Metodologi yang digunakan adalah studi dokumentasi dan perhitungan matematis menggunakan metode pantulan berulang untuk mengevaluasi koordinasi isolasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem tanpa proteksi arrester dapat mengalami kenaikan tegangan surja hingga 830,6 kV pada waktu 10 μ detik, yang melampaui batas aman. Dengan pemasangan arrester yang memiliki tegangan percik 577 kV, tegangan surja yang sampai ke transformator berhasil diredam menjadi 730,76 kV pada 10,21 μ detik dan terus menurun. Secara teoritis, jarak maksimal yang diizinkan berdasarkan metode pantulan berulang adalah 23,1 meter. Penempatan aktual di lapangan dengan jarak 4 meter terbukti sangat efektif karena berada jauh di bawah ambang batas maksimal dan telah memenuhi standar SPLN-7:1978, sehingga mampu memberikan perlindungan optimal bagi transformator dari kerusakan akibat tegangan lebih.

Kata Kunci: Lightning Arrester, Transformator Daya, Sambaran Petir, Metode Pantulan Berulang, Gardu Induk 150kV.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga merupakan kebutuhan esensial bagi sektor rumah tangga maupun industrimasa kini. Di dalam struktur penyampaian tenaga listrik, jaringan transmisi 150 kV berperan sebagai fondasi infrastruktur yang mendukung kestabilan ekonomi dan sosial. Gardu Induk (GI) 150 kV Temanggung memiliki peran penting sebagai pusat distribusi energi listrik untuk daerah Kabupaten Temanggung dan sekitarnya [1].

Komponen paling kritis sekaligus memiliki nilai aset yang sangat tinggi pada gardu induk ini adalah Transformator Daya. Saat ini, GI 150 kV Temanggung mengoperasikan beberapa unit transformator dengan

kapasitas berbeda, yaitu 30 MVA dan 60 MVA. Namun, penelitian ini secara spesifik memberikan perhatian khusus pada Transformator 60 MVA. Akan tetapi, studi ini secara khusus memperhatikan Transformator 60 MVA. Penekanan ini dilakukan karena kapasitasnya yang lebih besar dalam menanggung beban wilayah; kegagalan isolasi pada unit ini akan berdampak jauh lebih luas terhadap hilangnya pasokan listrik dibandingkan unit-unit lainnya [2].

Ancaman utama bagi instalasi luar ruangan (*outdoor*) di GI Temanggung adalah fenomena surja petir. Mengingat letak geografis Indonesia, khususnya wilayah Temanggung yang memiliki kerapatan

sambaran petir tinggi, risiko kerusakan akibat tegangan lebih (*overvoltage*) menjadi ancaman nyata. Tanpa adanya sistem perlindungan yang tepat, tegangan surja dapat merusak isolasi internal transformator secara permanen [3], yang tidak hanya menimbulkan kerugian materiil akibat biaya perbaikan yang tinggi, tetapi juga menghentikan kelangsungan pelayanan listrik [4].

Untuk meminimalkan risiko tersebut, penggunaan Lightning Arrester sebagai katup pengaman utama sangatlah krusial. Efektivitas arrester dalam melindungi transformator sangat bergantung pada koordinasi isolasi, terutama jarak penempatannya. Untuk mengurangi risiko tersebut, penerapan Lightning Arrester sebagai katup pengaman utama sangatlah penting. Keefektifan arrester dalam melindungi transformator sangat bergantung pada koordinasi isolasi, terutama jarak penempatannya.[5]. Apabila jarak fisik antara arrester dan transformator melebihi batas aman, tegangan lonjakan yang sampai di terminal transformator bisa naik hingga melampaui ambang batas *Basic Insulation Level* (BIL). Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini dilaksanakan untuk menilai efektivitas penempatan arrester pada Transformator 60 MVA di GI 150 kV Temanggung untuk memastikan sistem perlindungan telah sesuai dengan standar SPLN dan IEC yang berlaku.[6]

II. TINJAUAN PUSTAKA

Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat penting dalam menunjang berbagai aktivitas manusia. Dalam proses penyalurannya, sistem tenaga listrik tidak terlepas dari gangguan alam, salah satunya adalah sambaran petir [7]. Petir merupakan pelepasan muatan listrik bertegangan tinggi yang terjadi di atmosfer akibat perbedaan potensial antara awan maupun antara awan dan permukaan bumi. Fenomena ini dapat menghasilkan tegangan surja yang berpotensi merusak peralatan pada sistem tenaga listrik apabila tidak diantisipasi dengan sistem proteksi yang memadai [8].

Petir merupakan fenomena alam yang telah diteliti oleh manusia selama beratus-ratus tahun. Petir atau halilintar adalah gejala alam yang umumnya muncul pada musim penghujan dimana di langit muncul kilatan cahaya sasaat yang menyilaukan dan biasanya disebut kilat yang beberapa saat kemudian disusul dengan suara menggelegar sering disebut guruh [9]. Perbedaan waktu kemunculan ini disebabkan adanya perbedaan antara kecepatan suara dan kecepatan cahaya. Penelitian mengenai petir telah lama dilakukan, tetapi masih ada beberapa bagian yang belum dapat dijelaskan secara ilmiah yang dianggap sebagai misteri alam [10].

Dalam mengelola jaringan tenaga listrik, aspek keamanan terhadap lonjakan tegangan menjadi prioritas utama. Fenomena tegangan lebih merupakan kondisi naiknya tegangan yang hanya mampu ditanggung oleh perangkat dalam durasi singkat. Berdasarkan faktor

pemicunya, tegangan lebih diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama[11]:

- a. Tegangan Lebih Petir (*lightning Over Voltage*)
Gangguan tinggi pada perangkat listrik akibat sambaran petir, secara langsung atau tidak melalui induksi elektromagnetik.
- b. Tegangan lebih Surja hubung (*switching over voltage*) lonjakan tegangan yang muncul akibat dinamika buka-tutup saklar atau pemutus tegangan
Tegangan lebih sementara (*temporary over voltage*)
Gangguan tegangan berlebih yang dipicu oleh gangguan di Transformator.

Transformator merupakan perangkat elektromekanis yang berfungsi mengonversi energi listrik dari satu level ke level lainnya sesuai kebutuhan operasional [12]. Tugas utama Transformator adalah memodifikasi parameter kelistrikan khususnya besaran tegangan baik untuk menaikkan maupun menurunkannya [13].

Salah satu usaha memperkecil terjadinya gangguan internal maupun eksternal untuk mencegah kerusakan pada peralatan akibat sambaran petir adalah pemasangan arrester. Arrester adalah peralatan pengaman instalasi dari gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir (*Lighthning Surge*) maupun oleh surja hubung (*Switching Surge*) [14].

Secara mekanisme, *arrester* bekerja dengan cara menciptakan jalur pintas (*by-pass*) di sekitar sistem isolasi. Jalur ini memudahkan arus kejut berintensitas tinggi untuk langsung dialirkan menuju sistem pentanahan (*grounding*), sehingga isolasi peralatan tetap aman dari kerusakan. Spesifikasi teknis dan karakteristik dari *lightning arrester* ini umumnya berpedoman pada ketentuan standar IEEE terkait penggunaan *metal-oxide surge arrester* pada jaringan AC [15].

Bagian-Bagian *Arrester*

1. Elektroda: Komponen terminal pada penangkal petir. Elektroda bagian atas dikaitkan langsung dengan konduktor bertegangan, sementara elektroda bawah terhubung ke sistem pembumian.
2. Sela Percikan (*Spark-Gap*): Titik celah tempat terjadinya loncatan bunga api manakala *arrester* mendeteksi adanya tegangan lebih akibat sambaran petir atau surja hubung. Pada varian tertentu, busur api yang terbentuk akan disebarkan keluar menggunakan tekanan gas dari pembakaran tabung fiber.
3. Tahanan Katup (*Valve Resistor*): Komponen resistif khusus yang memiliki karakteristik resistansi dinamis, di mana nilai tahananannya dapat beradaptasi secara otomatis mengikuti fluktuasi tegangan yang diterima.

III. METODE PENELITIAN

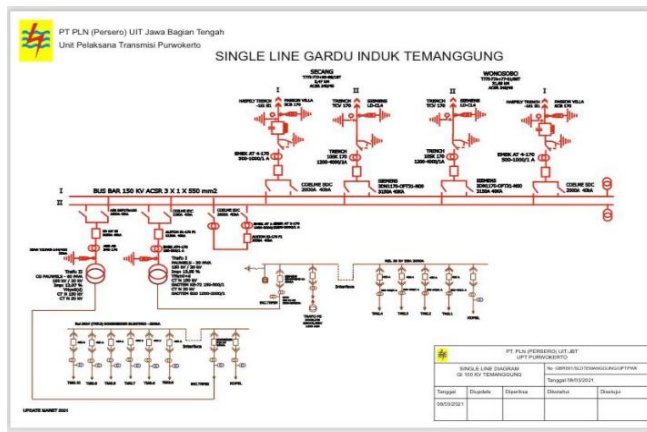
A. Model Penelitian

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi dokumentasi, yakni menghimpun serta

mengkaji berbagai arsip dan literatur guna mencukupi kebutuhan data penelitian. Pengumpulan data dilakukan melalui koordinasi langsung bersama pengelola Gardu Induk 150 kV Temanggung.

Tahapan selanjutnya setelah seluruh data terkumpul adalah melakukan simulasi perhitungan matematis dengan menerapkan metode pantulan berulang. Hasil akhir dari perhitungan tersebut kemudian dievaluasi secara komprehensif guna memastikan kesesuaiannya dengan standar regulasi yang berlaku.

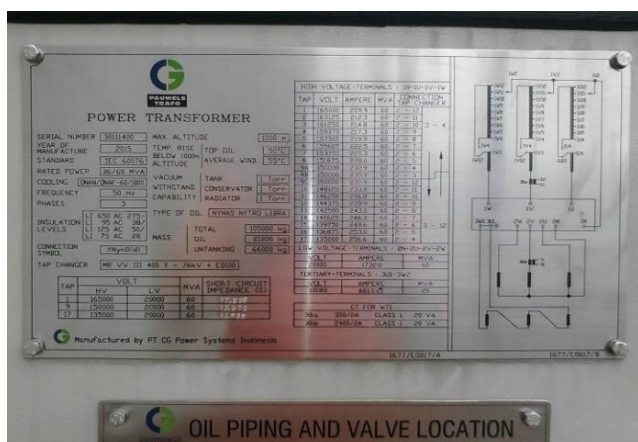
Data Yang Di Gunakan:



Gambar1. Single Line Diagram Gardu Induk 150 KV Temanggung



Gambar2. Tranformator Gardu Induk 150 Kv Temanggung

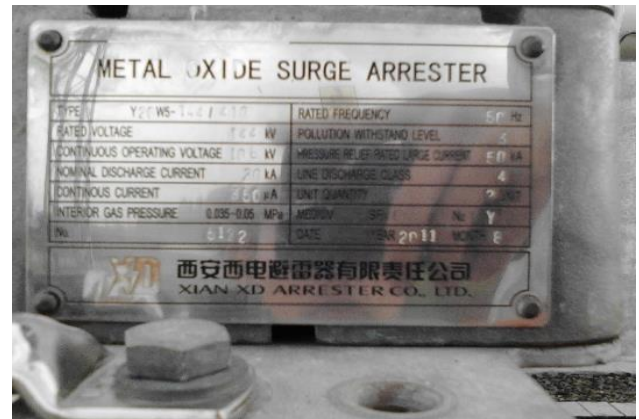


Gambar3. Nameplate. Trafo Gardu Induk 150 Kv Temanggung

TABEL I

DATA TEKNIS TRANSFORMATOR

Parameter Spesifikasi	Nilai	Satuan ^a
Serial number	30111400	-
manufacture	2015	-
Rated power	60	MVA
tegangan	150/20	KV
Frequency	50	HZ
Phases	3	-
Bil (hv)	650	KV



Gambar 4. Name Plate Areester Gardu Induk 150 Kv Temanggung

TABEL II

DATA TEKNIS ARRESTER

Parameter Spesifikasi	Nilai	Satuan ^a
Merk	XIAN XD	-
Type	Y20W5-144/410	-
Standart	IEC	-
Rated Voltage	144	KV
Frequency	50	HZ
Tegangan Kerja	500	KV
Year	2011	-
Tegangan Percik	577	KV

B. Teknik Analisa Data

Proses analisis data pada riset ini menerapkan metode koordinasi isolasi. Seluruh data yang berhasil dikumpulkan selanjutnya diolah untuk menghitung parameter penting, seperti *Tegangan Impresif Trafo (TID)*, tegangan pelepasan arrester, serta jarak optimal pemasangan arrester terhadap transformator. Pengerjaan analisis ini dilakukan dengan mengaplikasikan formula matematis yang berpedoman pada teori koordinasi penempatan arrester menurut Hutaeruk.

Formula tersebut dimanfaatkan secara khusus untuk menetapkan batasan jarak terjauh antara perangkat *arrester* dan transformator.

Secara sistematis, rangkaian tahapan analisis data yang dikerjakan meliputi:

1) Penentuan Tingkat Isolasi Dasar (TID)

Langkah awal dalam merancang sistem proteksi transformator distribusi terhadap ancaman surja petir adalah menetapkan besaran tingkat ketahanan isolasi impuls dasar dari peralatan yang akan dilindungi.

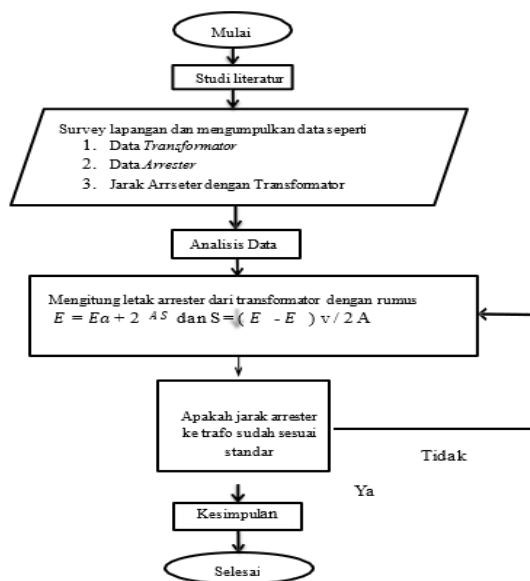
2) Estimasi Tegangan Pengenal Arrester

Setelah parameter dasar terpenuhi, tahap berikutnya adalah memperkirakan besaran tegangan pengenal *arrester* secara estimasi. Nilai tegangan pengenal ini harus dipastikan tidak berada di bawah hasil kalkulasi dari kedua parameter sebelumnya.

3) Analisis Faktor Koreksi dan Arus Pelepasan Impuls

Dalam perhitungannya, estimasi tegangan tinggi umumnya diberikan tambahan margin sebesar 10%. Sementara itu, untuk sistem pentanahan yang tidak efektif serta kondisi pentanahan terionisasi, praktiknya sering kali mengadopsi koefisien sebesar 100%. Tahap ini kemudian dilanjutkan dengan menetapkan besarnya arus pelepasan impuls dari *arrester*.

4) Menentukan Tegangan Pelepasan Arrester



Gambar 5. Langkah Penelitian

5) Perhitungan Tegangan Tertinggi Sistem

Nilai tegangan tertinggi pada suatu jaringan tenaga listrik umumnya ditetapkan sebesar 110% dari besaran tegangan nominal sistem yang bersangkutan. Ketetapan ini berfungsi untuk mengidentifikasi batas maksimum tegangan yang mampu dibangkitkan oleh sebuah gardu induk. Adapun formulasi matematis yang digunakan untuk menghitung tingkat tegangan tertinggi sistem tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_m &= 1,1 \times V_n \\
 &= 1,1 \times 150 \\
 &= 165 \text{ kV}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

6) Penentuan Rating Pengenal Arrester

Pemilihan kapasitas atau tegangan pengenal *arrester* umumnya didasarkan pada batas maksimum tegangan sistem yang berpotensi timbul. Guna menetapkan besaran tegangan dasar maupun tegangan operasional *arrester* tersebut, dapat merujuk pada persamaan matematis berikut:

$$\begin{aligned}
 V_c &= V_m \times \text{koefisien pentanahan} \\
 &= 165 \times 0,8 = 132 \text{ kV}
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Berdasarkan hasil kalkulasi, diperoleh nilai tegangan pengenal *arrester* $V_c = 132 \text{ kV}$. Angka ini mengindikasikan bahwa kapasitas kerja *arrester* berada di bawah

tingkat ketahanan isolasi impuls dasar (TID atau BIL) perangkat yang dilindungi, sehingga tingkat pengamanan optimal terhadap peralatan tersebut dapat tercapai.

C. Perhitungan Impedansi Surja

Berdasarkan spesifikasi teknis dari pabrikan (KBMI) maupun standar SPLN 41-7:1981, jaringan transmisi di Gardu Induk Temanggung menggunakan jenis konduktor ACSR berukuran 435/55 yang memiliki garis tengah sebesar 28,80 mm. Berdasarkan informasi yang diperoleh langsung dari operator gardu induk melalui wawancara, elevasi rata-rata posisi penghantar tersebut terhadap permukaan tanah adalah setinggi 16 meter. Diperoleh nilai R adalah:

$$\begin{aligned}
 R &= D/2 = 28,80/2 \\
 &= 14,40 \text{ mm} = 0,0144 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Perhitungan nilai impedansi surja pada saluran udara dapat diselesaikan dengan menggunakan formulasi matematis berikut:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 60 \ln 2h / r \text{ (}\Omega\text{)} \\
 Z_1 &= 60 \ln 2 \ln \left(\frac{2 \times 16}{0,0144} \right) \\
 Z_1 &= 60 \ln 2.222,22 \\
 Z_1 &= 462,375 \Omega
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Impedansi surja untuk kabel adalah $Z_C = 50 \Omega$

1) Penentuan Tegangan Kerja Arrester

Besaran tegangan operasional atau tegangan pelepasan *arrester* merujuk pada data acuan di lampiran 2 tabel *Maximum Impulse Sparkover Voltage*. Berdasarkan tabel tersebut, untuk sistem jaringan berkapasitas 150 kV, nilai tegangan pelepasan atau tegangan kerja *arrester* yang ditetapkan adalah sebesar $U_A = 500 \text{ Kv}$.

2) Perhitungan Kecepatan Gelombang Berjalan

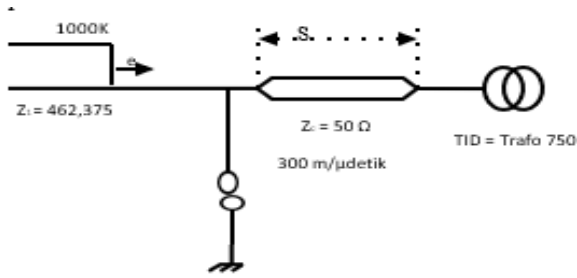
Kecepatan rambat gelombang berjalan pada jalur transmisi dapat dihitung dengan menerapkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2h}{r} \right)} \times 118 \times 10^9 \ln \left(\frac{2h}{r} \right)} \\
 &= 3 \times 10 \text{ cm/detik} = 300 \text{ m/udetik}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

3) Perhitungan Tegangan Percik Lightning Arrester

Ilustrasi pada Gambar 6 menggambarkan fenomena gelombang surja petir yang merambat dari arah kiri. Setibanya di titik instalasi penangkal petir (*lightning arrester*), gelombang tersebut akan terbagi menjadi dua bagian: sebagian dipantulkan kembali dan sebagian lainnya diteruskan. Guna menghitung besar tegangan percik pada *arrester*, langkah awal yang harus diselesaikan adalah menetapkan koefisien pantulan dan koefisien terusan terlebih dahulu.

Besaran koefisien pantulan serta koefisien terusan tersebut dapat dihitung melalui persamaan matematis berikut:



Gambar 6. Transformator Terhadap Lightning Arrester Dipisahkan Oleh Jarak S

Nilai koefesien pantulan dan terusan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} = \frac{50 - 462,375}{50 + 462,375} = -0,8084 \\
 b &= \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} = \frac{462,375 - 50}{462,375 + 50} = 0,8084 \\
 a' &= \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} = \frac{2 \times 50}{50 + 462,375} = 0,1951 \\
 b' &= \frac{2Z_1}{Z_1 + z_c} = \frac{2 \times 462,375}{462,375 + 50} = 1,8048
 \end{aligned} \quad (5)$$

Tingkat kecuraman gelombang datang yang memasuki area gardu induk atau transformator perlu dihitung terlebih dahulu, sehingga diperoleh nilai parameter sebagai berikut:

$$t = 2 \mu\text{detik}$$

$$A = 1.000 \text{ kV}$$

$$\alpha = A \cdot a' = 1.000 \times 0,1951 = 195,1$$

Langkah berikutnya adalah menghitung besar tegangan pada titik sambungan antara kabel dan kawat udara, yang dimulai dari waktu $t = 0$. Besar tegangan pada waktu-waktu berikutnya didapat dari penjumlahan tegangan sebelumnya dengan memperhitungkan faktor redaman (penurunan sinyal). Karena besar tegangan gelombang yang dipantulkan sama persis dengan gelombang yang datang, maka besarnya tegangan pada titik sambungan kabel dan kawat udara (jika *lightning arrester* belum dipasang) untuk setiap kelipatan waktu 2 μdetik adalah:

$$t = 0 \mu\text{detik}; e_0 = 0$$

$$t = 2 \mu\text{detik}; e_2 = e_0 \text{ arrester} + (A \times a')$$

$$= 0 + (1000 \text{ kV} \times 0,1951 \text{ kV})$$

$$= 195,1 \text{ kV}$$

$$t = 4 \mu\text{detik}; e_4 = e_2 \text{ arrester} \times 1$$

$$= 195,1 \times 1$$

$$= 195,1 \text{ kV}$$

$$t = 6 \mu\text{detik}; e_6 = e_4 \text{ arrester} + e_2 \text{ arrester} + (e_4 \text{ arrester} \times b)$$

$$= 195,1 \text{ kV} + 195,1 \text{ kV} + (195,1 \text{ kV} \times 0,8048)$$

$$= 195,1 \text{ kV} + 195,1 \text{ kV} + 157 \text{ kV}$$

$$= 547,2 \text{ kV}$$

$$t = 8 \mu\text{detik}; e_8 = e_6 \text{ arrester} \times 1$$

$$= 547,2 \text{ kV} \times 1$$

$$= 547,2 \text{ kV}$$

$$t = 10 \mu\text{detik}; e_{10} = e_8 \text{ arrester} + (e_4 \text{ arrester} \times b) + (e_4 \text{ arrester} \times b \times b)$$

$$= 547,2 \text{ kV} + (195,1 \text{ kV} \times 0,8048) + (195,1 \text{ kV} \times 0,8048 \times 0,8048)$$

$$= 547,2 \text{ kV} + 157,1 \text{ kV} + (195,1 \text{ kV} \times 0,6477)$$

$$= 547,2 \text{ kV} + 157,1 \text{ kV} + 126,3 \text{ kV}$$

$$= 830,6 \text{ kV}$$

$$t = 12 \mu\text{detik}; e_{12} = e_{10} \text{ arrester} \times 1$$

$$= 830,6 \text{ kV} \times 1$$

$$= 830,6 \text{ kV}$$

Pada saat $e = 577 \text{ kV}$, *lightning arrester* telah memercik (*spark over*), Perhitungan waktu tegangan berdasarkan

waktu muka gelombang *lightning arrester* (Δt) dilakukan menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta t = (E_a - t = 8) / b' \left(\frac{E_4 \text{ Arrester} \times b}{2} \right)$$

$$= (577 - 547,2) / 1,8048 \left(\frac{157,1}{2} \right) \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{29,8}{141,8} = 0,21 \mu\text{detik}$$

Waktu percik *lightning arrester* (t_{s0}) di lokasi pemasangan ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$t_{s0} = 8 + \Delta t = 8 + 0,21 = 8,21 \mu\text{detik}$. Dapat ditentukan tegangan pelepasan atau tegangan kerja $e_t = 8,23$ dari *lightning arrester* dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$t = 8,21 \mu\text{detik}; e_t = 8,21$$

$$= e_t = 8 + \left(\frac{e_t - 10 - e_t = 8}{2} \right) \Delta t \quad (7)$$

$$= 547,2 + \left(\frac{830,6 - 547,2}{2} \right) 0,21$$

$$e_t = 8,21 = 547,2 + 29,75 = 576,95 \text{ kV}$$

1. Perhitungan Naik Tegangan Pada Transformator Daya

Waktu percik arrester (t_{s0}) adalah sebesar $t_{s0} = 8 + \Delta t$. Kenaikan tegangan pada transformator dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$t = 0 \mu\text{detik}; e_0 = 0$$

$$t = 2 \mu\text{detik}; e_2 = 0$$

$$t = 4 \mu\text{detik}; e_4 = E_2 \text{ arrester} + (2 \times A \times a')$$

$$= 0 + (2 \times 1000 \text{ kV} \times 0,1951 \text{ kV})$$

$$= 390,2 \text{ kV}$$

$$t = 6 \mu\text{detik}; e_6 = e_4 \text{ arrester} \times 1$$

$$= 390,2 \times 1$$

$$= 390,2 \text{ kV}$$

$$t = 8 \mu\text{detik}; e_8 = e_6 \text{ arrester} \times (1 + b)$$

$$= 390,2 \text{ kV} \times (1 + 0,8048)$$

$$= 390,2 \text{ kV} \times 1,8048 \text{ kV}$$

$$= 704,232 \text{ kV}$$

$$t = 10 \mu\text{detik}; e_{10} = e_8 \text{ arrester} \times 1$$

$$= 704,232 \text{ kV} \times 1$$

$$= 704,232 \text{ kV}$$

Belum mencapai $t=12 \mu\text{detik}$ arrester memercik (spark over) pada $t=10,21 \mu\text{detik}$ dan untuk menentukan tegangan pada $t=10,21 \mu\text{detik}$, tentukan nilai tegangan pada $t=12 \mu\text{detik}$ terlebih dahulu.

$$\begin{aligned} t &= 12 \mu\text{detik}; e_{12} = e_6 \text{ arrester} \times (1 + b + (b)^2) \\ &= 390,2 \times (1 + 0,8048 + (0,8048)^2) \\ &= 390,2 \times 2,452 \\ &= 956,9 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 10,21 \mu\text{detik}; e_{10,21} = e_{t=10} + \left(\frac{e_{t=12} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t \\ e_{10,169} &= 704,232 + \left(\frac{956,9 - 704,232}{2} \right) 0,21 \\ e_{10,21} &= 704,232 + 26,53 \\ &= 730,76 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 12,21 \mu\text{detik}; e_{12,21} = e_{t=10,21} - \left(\frac{e_{t=12} - e_{t=8}}{2} \right) (2\mu t - \Delta t) \\ e_{12,21} &= 730,76 - \left(\left(\frac{E_4 \text{ Arrester} \times b}{2} \right) 956,9 - 704,232 \right) (2 - 0,21) \\ e_{12,21} &= 730,76 - 226,13 = 504,63 \text{ kV} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Jarak Arrester Metode Pantulan Berulang

Penentuan jarak lightning arrester terhadap transformator daya dilakukan berdasarkan persamaan berikut.

$$S = (E_r - E_a) v / 2 A$$

$$S = (730,76 - 576,95) 300 / 2 \times 1000 = 23,1 \text{ Meter}$$

3. Perhitungan Arus Pelepasan

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan nilai puncak dan bentuk gelombang tertentu yang dijadikan dasar untuk menentukan kelas lightning arrester sesuai dengan kemampuan menghantarkan arus dan karakteristik perlindungannya. Nilai arus pelepasan pada peristiwa gelombang berjalan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$I_a = \frac{2u_d - U_a}{Z_s} \quad (8)$$

$$I_a = \frac{2.1025 - 576,99}{462,375} = 3.18$$

4. Perhitungan Jarak Lightning Arrester dengan Transformator

Diketahui sistem memiliki tegangan transmisi sebesar 150 kV dengan nilai Basic Insulation Level (BIL) transformator sebesar 750 kV. Transformator tersebut dilindungi oleh lightning arrester yang memiliki tegangan percik sebesar 577 kV dan dipasang pada jarak 4 meter dari transformator. Surja datang merambat menuju peralatan yang dilindungi dengan kecepatan 400 m/ μdetik . Berdasarkan data tersebut, tentukan jarak maksimum yang diperbolehkan antara lightning arrester dan transformator agar seluruh peralatan tetap terlindungi dari bahaya surja.

$$\text{Diketahui : } E_p = 750 \text{ KV}$$

$$A = 1000 \text{ dv/dt } E_a = 577 \text{ KV}$$

$$v = 400 \text{ m}/\mu\text{dt}$$

Dengan kecuraman gelombang surja sebesar 1000 dv/dt jarak maksimum pemasangan lightning arrester dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$E_p = E_a + 2 \frac{AS}{v} \quad (9)$$

$$750 = 577 + 2 \frac{100 \times S}{300}$$

$$173 = 2 \frac{1000 \times S}{300}$$

$$S = \frac{173}{6,66} = 25,98$$

Jadi jarak yang menggunakan perhitungan tanpa teori pantulan berulang antara transformator dan Lightning Arrester adalah 25,98 meter.

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Analisis terhadap tegangan surja memperlihatkan bahwa sistem yang tidak dilengkapi lightning arrester akan mengalami kenaikan tegangan yang berpotensi membahayakan peralatan. Hal ini terlihat pada waktu $t=10 \mu\text{detik}$, dimana tegangan surja mencapai 830,6 kV. Lightning arrester dirancang untuk bekerja pada tegangan percik sebesar 577 kV, sehingga mampu menghentikan kenaikan tegangan tersebut. Pada kondisi ini, peredaman tegangan terjadi pada waktu $t = 8,21 \mu\text{detik}$ dengan nilai tegangan 576,95 kV, yang menunjukkan bahwa lightning arrester berperan efektif dalam membatasi amplitudo surja.

Penentuan jarak antara lightning arrester dan Transformator Daya 60 MVA di Gardu Induk Temanggung dilakukan dengan dua pendekatan perhitungan. Berdasarkan metode pantulan berulang, jarak yang direkomendasikan adalah 23,1 m, sedangkan perhitungan tanpa pendekatan pantulan berulang menghasilkan jarak sebesar 25,98 m. Pada implementasi di lapangan, lightning arrester dipasang pada jarak 4 m dari transformator. Jarak ini berada jauh di bawah hasil perhitungan teoritis serta masih sesuai dengan ketentuan SPLN-7:1978. Dalam standar tersebut disebutkan bahwa penangkap petir kelas 138 kV memiliki ketentuan jarak pemasangan terhadap transformator antara 80 m hingga 120 m, sedangkan untuk penangkap petir kelas 150 kV, jarak pemasangan dibatasi tidak lebih dari 80 m.

Transformator yang tidak dilengkapi lightning arrester akan menerima tegangan yang terus meningkat, dimana pada waktu $t = 12 \mu\text{detik}$ tegangan mencapai 956,9 kV. Setelah lightning arrester dipasang, tegangan surja yang sampai ke transformator mengalami penurunan yang signifikan. Pada waktu $t = 10,21 \mu\text{detik}$, tegangan tercatat sebesar 730,76 kV dan selanjutnya menurun pada waktu $t = 12,21 \mu\text{detik}$ menjadi 504,63 kV. Dengan demikian, tegangan yang diterima transformator tidak melampaui batas TID sebesar 750 kV, sehingga dapat disimpulkan bahwa lightning arrester mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap transformator dari gangguan tegangan surja.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan serangkaian analisis data dan perhitungan matematis mengenai sistem proteksi pada Transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Temanggung, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. Efektivitas Sistem Proteksi: Penggunaan Lightning Arrester tipe ZnO pada bay transformator 60 MVA terbukti sangat efektif dalam memitigasi risiko tegangan lebih akibat surja petir. Arrester mampu memotong level tegangan surja sehingga nilai yang sampai ke terminal transformator tetap berada di bawah ambang batas Basic Insulation Level (BIL) sebesar 650 kV.

Optimalisasi Jarak Penempatan: Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode pantulan berulang (Lattice Diagram), jarak eksisting antara arrester dan transformator di lapangan sejauh 4 meter berada dalam kategori Sangat Aman. Jarak ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan batas maksimal proteksi yang diizinkan secara teoritis, yaitu 23,1 meter.

Prioritas Keandalan Aset: Fokus perlindungan pada unit 60 MVA merupakan langkah strategis yang tepat. Dengan koordinasi isolasi yang terjaga pada jarak 4 meter, integritas isolasi transformator dapat dipertahankan, sehingga risiko pemadaman skala besar di wilayah Temanggung akibat kerusakan aset utama dapat diminimalisir secara optimal.

B. Saran

Guna meningkatkan dan mempertahankan keandalan sistem proteksi di masa mendatang, penulis menyarankan beberapa hal. Pemeliharaan Sistem Pentanahan: Perlu dilakukan pengujian rutin terhadap nilai resistansi pentanahan (grounding) pada kaki arrester. Hal ini penting untuk memastikan arus surja dapat dialirkan ke bumi dengan cepat tanpa hambatan yang berarti. Monitoring Kondisi Arrester: Mengingat intensitas petir di wilayah Temanggung yang cukup tinggi, disarankan untuk melakukan pemeriksaan berkala pada counter jumlah sambaran dan arus bocor (leakage current) pada arrester untuk memantau sisa usia pakai peralatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Arismunandar and S. Kuwahara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II: Saluran Transmisi*. Jakarta, Indonesia: Pradnya Paramita, 2004.
- [2] M. F. Robbani, D. Nugroho, and Gunawan, "Penentuan kelayakan tahanan isolasi pada transformator 60 MVA di gardu induk 150 kV Tegal dengan menggunakan indeks polarisasi, tangen delta, dan breakdown voltage," *ElektriKA*, vol. 12, no. 2, pp. 60–66, 2020.
- [3] S. R. Handoko, "Analisa peralatan lightning arrester pada gardu induk 150 kV PLTU Rembang," *JETI (Jurnal Elektro dan Teknologi Informasi)*, vol. 2, no. 1, 2022.
- [4] J. Manihuruk, T. Simorangkir, and N. L. Sitanggang, "Studi kemampuan arrester untuk pengaman transformator pada gardu induk Tanjung Morawa 150 kV," *Jurnal ELPOTECS*, vol. 4, no. 1, 2021.
- [5] W. C. P. Sari and E. Ispranyoto, "Analisis jarak lightning arrester sebagai pengaman transformator daya unit II 60 MVA 150/20 kV di gardu induk Ancol," Institut Teknologi PLN, 2018.
- [6] R. Labado, Mujiman, and P. E. Pambudi, "Analisis penempatan arrester terhadap efektivitas proteksi transformator pada PT PLN (Persero) P3B Jawa-Bali APP Salatiga gardu induk 150 kV Bantul," *Jurnal Elektrikal*, vol. 2, no. 2, pp. 79–87, 2015.
- [7] T. S. Hutauruk, *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 1991.
- [8] R. F. Hibatullah and Winarso, "Analisa kemampuan dan kelayakan lightning arrester (LA) untuk pengaman transformator 5 (60 MVA) pada gardu induk 150 kV Kalibakal dengan software Matrix Laboratory," *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, vol. 6, no. 2, 2024, doi: 10.30595/jrre.v6i2.23651.
- [9] R. Nasution, Yumartato, and Armansyah, "Analisa penempatan lightning arrester sebagai pengaman gangguan petir di gardu induk Langsa," *Buletin Utama Teknik*, vol. 14, no. 3, pp. 205–209, 2019.
- [10] J. Sinaga, J. Siburian, Jumari, and I. Ompusunggu, "Analisa arrester transformator 60 MVA 150 kV/20 kV di gardu induk Titi Kuning Medan," *Jurnal Darma Agung*, vol. 30, no. 1, pp. 83–92, Apr. 2022, doi: 10.46930/ojsuda.v30i1.1413.
- [11] M. Ch. M. Barasa, L. S. Patras, and H. Tumaliang, "Analisis kinerja lightning arester pada jaringan transmisi 150 kV sistem Minahasa khususnya pada penyulang Kawangkoan–Lopana," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 6, no. 1, pp. 7–14, Apr. 2017, doi: 10.35793/jtek.6.1.2017.15567.
- [12] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2006.
- [13] A. S. Pabla, *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 1994.
- [14] PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Peralatan Penyaluran: Lightning Arrester*. Jakarta, Indonesia: Pusat Pemeliharaan Ketenagalistrikan, 2014.
- [15] *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, IEEE Std C62.22-2009, 2009.