



Jarak Penempatan *Lightning Arrester* sebagai Pelindung Transformator terhadap Tegangan Lebih pada Gardu Induk 150 Kv Harapan Baru

*Toyib¹, M. Zainuddin², Rusdiansyah³, Bustani⁴, La Bima⁵

Politeknik Negeri Samarinda^{1,2,3,4,5}

*Correspondence e-mail; toyibwar@gmail.com

Abstract:

The substation is part of the electrical energy distribution system, therefore depending on its function it must be protected from disturbances that cause disruption to the distribution of electrical energy. One of the important equipment in a substation is a transformer, and the protection device used is a lightning rod. With its good characteristics, the arrester plays a role in bypassing lightning currents so that the equipment does not produce high overvoltages. The analysis results show that the maximum distance between the arrester and the transformer is 10.96 meters, while the installation distance in the field is 3.2 meters, so the arrester can still protect the transformer because it is still lower than the maximum distance. Allowed. After the arrester turns on for 9.54 μ s, the voltage on the transformer will drop. And because the BIL of the transformer is 650 KV and the peak voltage reaches 751.3 kV at 300 μ s, the arrester can still protect the transformer.

Keywords: Substation; Transformer; Lightning arrester; Lightning surge.

Abstrak:

Gardu Induk merupakan bagian dari sistem distribusi energi listrik, oleh karena itu tergantung fungsinya harus dilindungi dari gangguan yang menyebabkan terganggunya distribusi energi listrik. Salah satu peralatan penting pada gardu induk adalah trafo, dan alat proteksi yang digunakan adalah penangkal petir. Dengan karakteristiknya yang baik, arester berperan mem-bypass arus petir sehingga peralatan tidak menghasilkan tegangan lebih yang tinggi. Hasil analisa menunjukkan jarak maksimum antara arester dan trafo adalah 10,96 meter, sedangkan jarak pemasangan di lapangan adalah 3,2 meter, sehingga arester masih dapat melindungi trafo karena masih lebih rendah dari jarak maksimum. Diizinkan. Setelah arester menyala 9,54 μ s, tegangan pada trafo akan turun. Dan karena BIL trafo adalah 650 KV dan tegangan puncaknya mencapai 751,3 kV pada 300 μ s, maka arester masih dapat melindungi trafo.

Kata Kunci: Gardu induk; Transformator; *Lightning arrester*; Surja petir.

PENDAHULUAN

Di era sekarang ini, kehidupan manusia tidak dapat dipisahkan dari segala peralatan listrik. Kebutuhan tenaga listrik dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan

meningkatnya taraf hidup masyarakat. Untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut diperlukan peningkatan kualitas sistem distribusi tenaga listrik.¹ Listrik dihasilkan oleh pembangkit listrik, kemudian dialirkan melalui saluran transmisi, kemudian didistribusikan, dan akhirnya sampai ke konsumen. Salah satu komponen penting dalam sistem transmisi tenaga listrik adalah gardu induk yang mempunyai peranan penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yaitu menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV agar dapat diterima oleh pengguna. Oleh karena itu, untuk mengurangi frekuensi kerusakan pada peralatan listrik, diperlukan peralatan yang dapat mencegah terjadinya gangguan.² Salah satu peralatan penting pada suatu gardu induk adalah trafo yang berperan untuk mendistribusikan daya dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan pada gardu induk. Transformator menggunakan proteksi berupa penangkal petir untuk melindunginya dari lonjakan petir.

Salah satu kegunaannya adalah untuk melindungi trafo daya pada gardu induk. Penempatan arester harus sesuai dengan jarak aman antara arester dengan trafo. Namun penentuan jarak aman harus memperhatikan tegangan percikan arester, tegangan penjepit trafo, kecuraman gelombang masuk, bil (*basic isolation level*), induktansi penghantar arester dan kecepatan rambat gelombang. Untuk meningkatkan kinerja peralatan proteksi jaringan distribusi terhadap lonjakan petir, perlu adanya jarak yang optimal antara arester dan trafo. Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan penelitian yang bertajuk “jarak penempatan arester untuk melindungi trafo dari tegangan lebih pada gardu induk 150 kv harapan baru”.

Tinjauan Pustaka

Di bawah ini adalah beberapa referensi penelitian-penelitian terdahulu mengenai penangkal petir untuk mengawali proses penelitian dan sebagai sumber dalam tugas skripsi ini, antara lain penelitian yang dilakukan oleh Abdul Azis dan H. Alimin Nurdin dengan judul “Analisa Jarak Lindung *Lighting Arrester* Terhadap Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Sungai Juaro Palembang”.³ Penelitian ini mengkaji kemampuan arester dengan menentukan jarak arester menggunakan metode ladder diagram untuk mengetahui tegangan lebih yang terjadi pada trafo dan menghitung jarak penempatan arester untuk menjamin

¹ Onglan Nainggolan, Bustani, and Arbain, “Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv Pada Penyulang J4 J5 J6 Di PT. PLN (Persero) Area Balikpapan Menggunakan Nilai SAIDI Dan SAIFI,” *Mutiara : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia* 1, no. 1 (July 2023): 103–116.

² Setyo Adi Nugroho, “INVESTIGASI TEGANGAN LEBIH TRANSIEN AKIBAT SAMBARAN PETIR PADA GARDU INDUK 150 KV,” *Jurnal Edukasi Elektro* 5, no. 1 (May 2021): 27–31.

³ Abdul Azis and H. Alimin Nurdin, “ANALISA JARAK LINDUNG LIGHTING ARRESTER TERHADAP TRANSFORMATOR DAYA 20 MVA GARDU INDUK SUNGAI JUARO PALEMBANG,” *TEKNIKA: Jurnal Teknik* 7, no. 1 (2020): 106–120, <http://www.teknika-ftiba.info/teknika/index.php/1234/article/view/134/115>.

keamanan trafo. Hasil dari penelitian ini adalah jarak dari instalasi arester yaitu 7 meter masih mampu melindungi trafo dari sambaran petir dan masih dalam batas yang ditentukan oleh PT PLN. Hal inilah yang mendasari penelitian yang penulis lakukan untuk memudahkan bahan penelitian, penelitian sebelumnya dilakukan di Gardu Induk Sungai Juaro Palembang dan penelitian ini dilakukan di GI Harapan Baru Samarinda.

Selanjutnya penelitian dari Randi dan Bambang HAS Wibowo yang berjudul “Analisa Penempatan Jarak Arrester Sebagai Proteksi Transformator Terhadap Tegangan Lebih Surja Petir”.⁴ Hasil penelitian menunjukkan bahwa penangkal petir dapat melindungi trafo dari arus lebih akibat lonjakan petir dalam jarak normal 3 meter dan jarak maksimum 9,75 meter. Pengaruh jarak terhadap tegangan abnormal yang sampai ke trafo, semakin dekat jarak maka tegangan yang sampai ke arester akan semakin kecil dan proteksi yang diberikan oleh arester akan semakin baik.

Tegangan Lebih Petir

Petir merupakan fenomena alam yang telah dipelajari manusia selama ratusan tahun. Petir atau guruh merupakan salah satu gejala alam yang biasa terjadi pada musim hujan, dengan adanya kilatan cahaya terang sesaat di langit yang sering disebut petir, sesaat kemudian disusul dengan suara gemuruh yang sering disebut guntur. Perbedaan waktu kemunculan ini disebabkan adanya perbedaan antara kecepatan suara dan kecepatan cahaya. Kajian mengenai petir telah berlangsung sejak lama, namun masih ada beberapa bagian yang belum dapat dijelaskan oleh ilmu pengetahuan dan dianggap sebagai misteri alam.⁵

Pada saat sistem tenaga listrik beroperasi, perhatian khusus perlu diberikan pada sistem proteksi tegangan lebih. Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditoleransi dalam jangka waktu terbatas. Bentuk gelombang tegangan lebih yang disebabkan oleh lonjakan petir dan lonjakan rangkaian merupakan bentuk gelombang dimana tegangan naik dalam waktu singkat dan kemudian menurun secara perlahan.

Petir adalah listrik statis yang dihasilkan selama badai petir.⁶ Petir merupakan peristiwa alam yang terjadi dalam bentuk debit arus yang relatif tinggi dan bersifat sementara

⁴ Randi Agustian and Bambang HSR Wibowo, “Analisa Penempatan Jarak Arrester Sebagai Proteksi Transformator Terhadap Tegangan Lebih Surja Petir,” *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology* 16, no. 1 (2018): 5–8, <https://epsilon.unjani.ac.id/index.php/epsilon/article/view/11/2>.

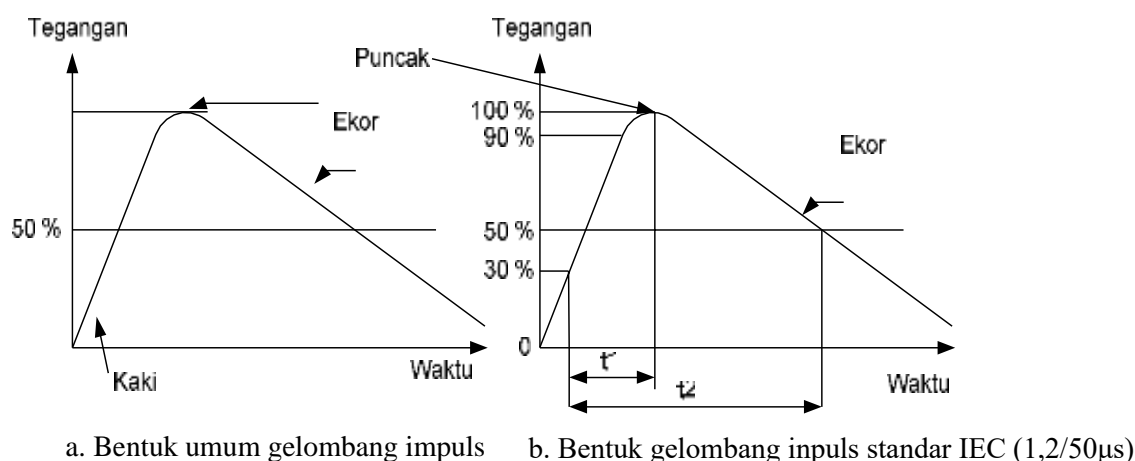
⁵ Prof. Dr. Reynaldo Zoro, “Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik,” in *Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik*, Cetakan 1. (Bandung: PT. Remaja Rosdakarya, 2018), 6–12 dan 89.

⁶ Anggita Dwi Ratnasari, Sukarno Budi Utomo, and Muhamad Haddin, “ANALISA TEGANGAN LEBIH AKIBAT SURJA PETIR DARI TRANSMISI YANG MASUK KE TRAFU DAYA I 20 MVA DI GARDU INDUK 150 KV BUMI SEMARANG BARU (BSB) DENGAN METODE DIAGRAM TANGGA,” *Jurnal JE-UNISLA : Electronic Control, Telecommunication, Computer Information and Power System* 7, no. 2 (September 2022): 113–118.

(berdurasi pendek) di atmosfer. Penyebabnya adalah menumpuknya ion-ion bebas bermuatan positif (+) dan negatif (-) di atmosfer, khususnya di awan kumulonimbus (CB). Ion-ion listrik ini tercipta dari gesekan antar partikel uap air di awan. Peristiwa Ionisasi ini juga disebabkan oleh perubahan wujud air dari cair menjadi gas dan sebaliknya, atau bahkan dari padat (es) menjadi cair.⁷ Besarnya energi yang dihasilkan oleh pelepasan muatan listrik dapat menimbulkan guntur atau kilat, rangkaian cahaya, panas, dan suara yang sangat kuat. Ketika muatan yang terakumulasi di awan mengembang dan menjadi stabil, lompatan listrik yang terjadi akan merambat ke massa lain melalui medan listrik.

Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan biasanya terjadi karena tegangan yang berlebihan. Hal ini dapat disebabkan oleh lonjakan arus listrik, atau yang biasa disebut dengan nyala dan matinya saklar daya, atau karena adanya gangguan alam berupa sambaran petir yang merambat melalui kabel. Bentuk umum dari gelombang berjalan digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.1. Spesifikasi gelombang berjalan.⁸

Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan:

1. Puncak (crest) gelombang, E (kV), yaitu amplitude maksimum dari gelombang.
2. Muka gelombang, t_1 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Dalam praktek ini diambil dari 10 % E sampai 90% E , lihat gambar b.
3. Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak. Panjang gelombang, t_2 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor.
4. Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negatif.

⁷ Prof. Dr. Reynaldo Zoro, "Sist. Prot. Petir Pada Sist. Tenaga List.," 6–12 dan 89.

⁸ Randi Agustian and Bambang HSR Wibowo, "Analisa Penempatan Jarak Arrester Sebagai Proteksi Transformator Terhadap Tegangan Lebih Surja Petir."

Suatu gelombang berjalan (surja) dinyatakan sebagai:

$$E, t_1 \times t_2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Jadi suatu gelombang dengan polaritas positif, puncak 1000 kV, maka 3 μ/s, dan Panjang 21 μ/s dinyatakan sebagai + 1000, 3× 21.

Dari segi energi, dapat dikatakan bahwa lonjakan pada kabel disebabkan oleh adanya suntikan energi secara tiba-tiba ke dalam kabel. Energi ini mengalir melalui kabel yang terdiri dari arus dan tegangan. Kecepatan rambat gelombang berjalan bergantung pada konstanta kawat. Pada kawat di udara, kecepatan rambatnya sekitar 300m/μs, sehingga sama dengan kecepatan cahaya. Pada kabel ground, kecepatan ini kira-kira 150 m/μs.

Ketika gelombang mencapai titik transisi dalam kontinuitas, gelombang tersebut berubah dan sedikit berbeda dari gelombang aslinya.

1. Kecepatan merambat

Kecepatan merambat gelombang berjalan pada kawat udara sama dengan kecepatan cahaya dalam hampa udara, yakni sebesar 300cm/s. Sedangkan untuk kabel konduktor padat dengan jari-jari r dan isolasi pembungkus R berjari-jari R serta permitivitas E, maka cepat rambat gelombang pada kabel menjadi,

$$\frac{3.10^{10}}{\sqrt{\epsilon}} \text{ cm/s} \dots\dots\dots (2.2)$$

Untuk kabel-kabel yang tersedia, umumnya harga E = 2,5 – 4

Jadi kecepatan merambat dalam kabel kira-kira ½ sampai ⅔ dari kecepatan cahaya.

2. Impedansi Surja

Impedansi Surja merupakan besaran impedansi yang dipengaruhi oleh induksi dan kapasitansi hantaran akibat gelombang Surja petir.

Untuk hantaran udara:

$$Z = 60 \ln \frac{2h}{r} \text{ ohm} \dots\dots\dots (2.3)$$

Sedangkan untuk kabel:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon \ln \frac{R}{r}}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

- Z = Impedansi Surja*
- h = Tinggi kawat penghantar*
- R = Jari – Jari konduktor luar*
- r = Jari-jari konduktor dalam*
- ε = permitivitas kabel*

Besar impedansi surja untuk kawat udara = 400 – 600 ohm, dan untuk kabel = 50 – 60 ohm.⁹ Tegangan kerja penangkal petir akan naik dengan nilainya arus pelepasan tetapi kenaikan ini sangat dibatasi tahanan linear dari penangkal petir.

Diagram Tangga

Dalam banyak permasalahan penting, misalnya dalam teori efek: proses pengisian atau pengosongan kabel, kabel ground, penangkal petir atau arrester dan saluran transmisi, perlu memperhatikan pantulan gelombang perjalanan yang berulang-ulang. Seringkali sulit untuk melacak jejak banyak gelombang yang disebabkan oleh pemantulan berulang kali. Oleh karena itu, untuk dapat mengikuti jejak gelombang tersebut dari waktu ke waktu, diperlukan diagram kisi yang disebut juga diagram ruang-waktu. Dengan diagram tangga ini kita dapat melihat posisi dan arah gerak dari tiap-tiap gelombang datang, gelombang pantulan dan gelombang terusan pada sistem itu pada setiap saat. Bahkan pengaruh dari redaman dan distorsi dapat juga diikuti-sertakan dalam diagram tangga itu.

Gambar 2.15 menggambarkan konduktor yang terhubung ke ground pada titik 1,2, dan 3. Asumsikan gelombang datang datang dari kiri. Setelah titik 1 terpenuhi, sebagian dipantulkan dan sebagian lagi diteruskan. Gelombang yang dipancarkan mencapai titik 2, dimana sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian lagi merambat. Hal yang sama terjadi pada titik 3 dan selanjutnya. Sirkuit antar titik sambungan dapat berupa kabel *overhead* atau kabel dengan impedansi lonjakan, kecepatan propagasi, dan redaman yang bervariasi.

Pada Gambar 2.15:

a = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kiri

b = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kanan

$a\phi$ = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kiri

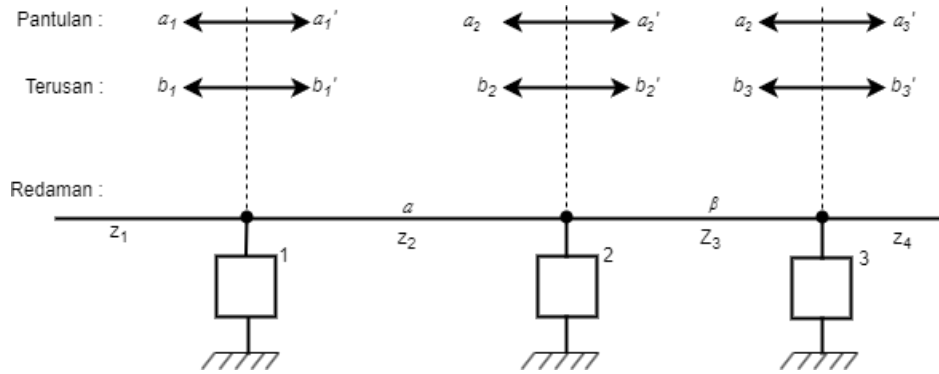
b' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

α, β = Konstanta redaman

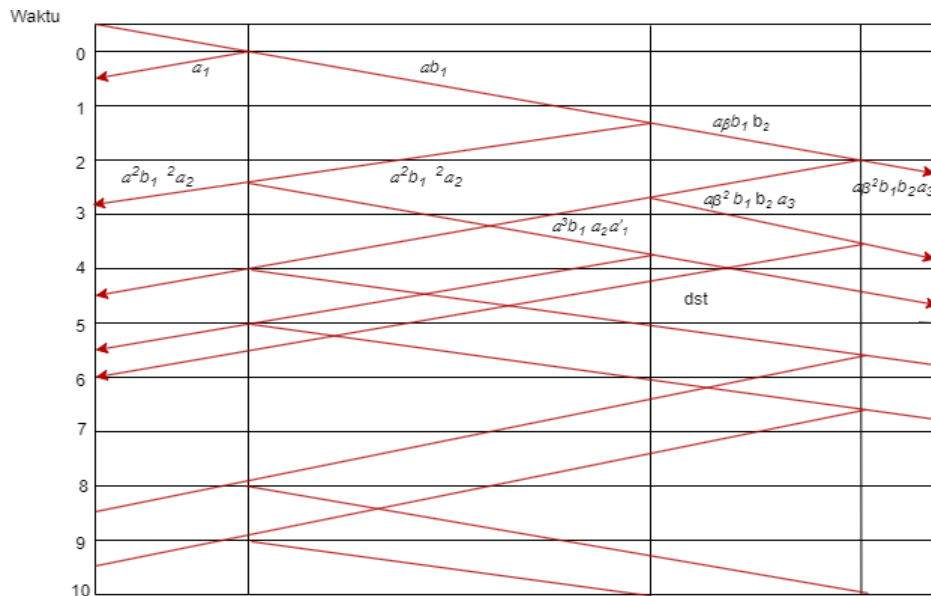
1,2,3 = Titik-titik sambungan

⁹ Ir. T.S. Hutauruk. MEE, “Koordinasi Lokasi Arrester Dengan Tingkat Isolasi Peralatan Yang Dilindungi,” in *Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja*, Cetakan 2. (Jakarta: Erlangga, 1991), 110.

Jarak Penempatan Lightning Arrester sebagai Pelindung Transformator terhadap Tegangan Lebih pada Gardu Induk 150 Kv Harapan Baru



Gambar 2.2. Kontruksi diagram tangga



Gambar 2.3. Diagram tangga

Kontruksi Diagram Tangga:

- Tempatkan titik-titik sambungan secara proporsional dengan waktu yang diperlukan untuk melewati setiap bagian.
- Pilih skala waktu vertikal kiri grafik.
- Gambarkan jalur gelombang secara diagonal.

Keuntungan memilih panjang bagian yang disesuaikan dengan waktu yang dibutuhkan gelombang untuk merambat melalui bagian tersebut adalah semua diagonalnya mempunyai kemiringan yang sama.

Dari diagram tangga itu dapat dilihat:

- Semua perambatan gelombang melemah.
- Posisi gelombang pada momen tertentu ditentukan oleh skala waktu vertikal.
- Tegangan total pada suatu titik pada waktu tertentu merupakan superposisi semua

gelombang radio yang tiba pada titik tersebut pada waktu tersebut.

- d. Asal usul masing-masing gelombang dapat dengan mudah diketahui, yaitu dari mana datangnya dan terdiri dari gelombang apa.
- e. Dengan memasukkan redaman, dapat menghitung berapa banyak gelombang yang jatuh selama setiap bagian perjalanannya.

Menentukan Tegangan Pengenal

Tegangan pelepasan (tegangan operasi) bergantung pada arus pelepasan arester (I_a) dan kecuraman arus yang masuk ke perangkat (di/dt). Tegangan pelepasan ini merupakan karakteristik terpenting dari penangkal petir untuk proteksi peralatan. Selain itu, tegangan operasi menentukan tingkat proteksi arester. Jika tegangan operasi arester berada pada TID peralatan yang dilindungi dan memiliki faktor keamanan yang memadai maka perlindungan peralatan terbaik dapat dicapai. Tegangan tertinggi sebagai berikut:

1. Tegangan sistem maksimum umumnya 110% dari tegangan nominal sistem.
2. Koefisien pembumian didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai efektif tegangan fasa-ke-tanah yang sehat pada kondisi gangguan di mana arester dipasang dan nilai efektif tegangan fasa-ke-fasa tertinggi dari sistem dalam suatu sistem. Oleh karena itu, tegangan pengenal arester (arrester rating) adalah nilai efektif tegangan fasa ke fasa $\times 1,10 \times$ koefisien pentanahan.
3. Untuk sistem pentanahan langsung, koefisien pentanahannya adalah 0,8, artinya arester semacam ini disebut arester 80%. Sistem yang tidak terhubung ke ground secara langsung mempunyai faktor ground sebesar 1,0. Arestor semacam ini disebut arester 100%. Arti dari sistem pentanahan langsung dan sistem pentanahan tidak langsung adalah sebagai berikut.

Untuk Menentukan Tegangan Pengenal Arrester menggunakan persamaan sebagai berikut:

Tegangan nominal $\times 110\%$ (factor toleransi)

$$U_m = \text{Tegangan Sistem} \times 1.1 \dots\dots\dots (2.4)$$

Tegangan Pengenal arrester

$$U_a = U_m \times \text{Koefisien Pentanahan} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan: U_m = Tegangan Maksimal

U_a = Tegangan Pengenal

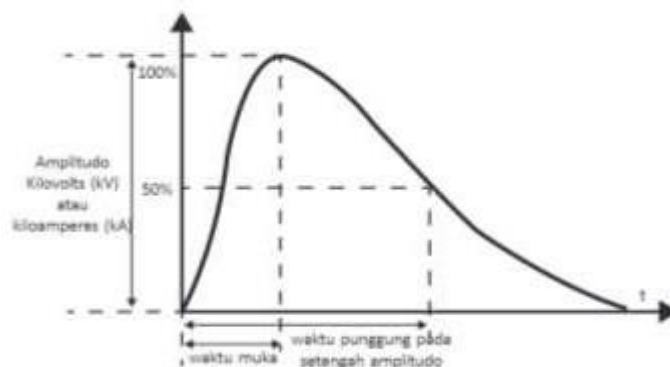
Arus Pelepasan Arrester

Arus pelepasan arester adalah arus pelepasan dengan nilai puncak dan bentuk gelombang tertentu, yang digunakan untuk menentukan jenis arester berdasarkan

kemampuannya melewati arus dan karakteristik proteksinya. Bentuk gelombang arus pelepasan adalah:

1. Menurut standar Inggris/Eropa (IEC) 8 μ s/ 20 μ s.
2. Menurut standar Amerika 10 μ s/ 20 μ s dengan kelas:
 - a. 10 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu induk, gardu yang beradadikawasan yang sering terjadi petir dan sitem bertegangan 66 kV.
 - b. 5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu bertegangan ≤ 66 kV.
 - c. 2,5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada sistem bertegangan ≤ 22 kV.
 - d. 1,5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada sistem distribusi bertegangan ≤ 22 kV

Bentuk gelombang arus pelepasan sebagai berikut:



Gambar 2.4. Bentuk gelombang impuls.¹⁰

Dalam menentukan arus pelepasan impuls dari arrester sewaktu melepasi arus Surja petir dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$I\alpha = \frac{2 U_d - U_a}{Z} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

$I\alpha$ = arus pelepasan arrester (kA)

U_d = Tegangan gelombang datang (kV) Z = impedansi surja saluran datang (Ω)

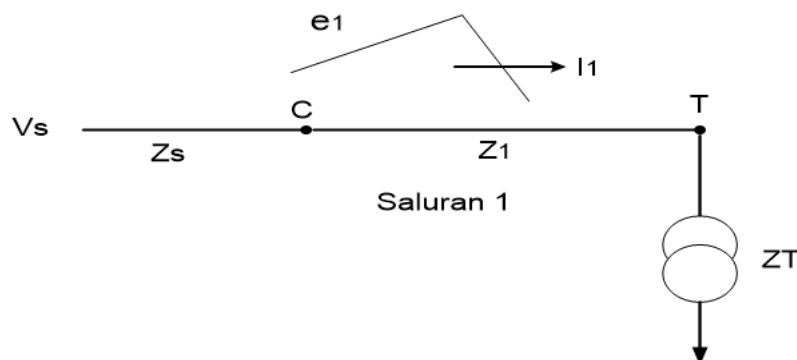
U_a =Tegangan kerja arrester (kV)

Tegangan Percik Lightning Arrester

Metode pemantulan berulang biasanya diimplementasikan dalam bentuk diagram tangga dan merupakan metode yang cocok untuk mengamati lintasan pemantulan gelombang gelombang yang merambat pada saluran. Sumbu horisontal dinamakan garis pantulan pada saluran, dan sumbu vertikal dinamakan garis pantulan pada saluran diberi nama garis refleksi dalam saluran. Sebutkan penambahan waktu total yang diperlukan

¹⁰ P. D. A. Arismunandar, *Teknik Tegangan Tinggi*, Cetakan 8. (Jakarta: Pradnya Paramita, 2001).

gelombang gelombang untuk merambat melalui saluran dalam satu arah: S/v . Dari grafik ini Anda bisa mendapatkan total nilai tegangan lonjakan untuk setiap titik dan waktu pada saluran. Penggunaan metode ini dapat dijelaskan lebih lanjut dalam menentukan tegangan surja dan arus surja untuk bentuk rangkaian seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.5. Rangkaian Satu Saluran

Titik C dan T pada Gambar 2.1 mewakili hubungan antara dua nilai resistansi atau impedansi lonjakan yang berbeda. Panjang total saluran 1 dengan impedansi lonjakan (Z_1) dari titik C ke titik T sama dengan S . Bayangkan Z_S sebagai impedansi lonjakan sisi sumber dan Z_T sebagai impedansi lonjakan sisi beban. Jika tegangan lonjakan (V_S) dari sisi sumber diterapkan ke saluran 1, maka akan terjadi tegangan lonjakan (e_1) dan arus surja (i_1) yang merambat dari titik C menuju titik T.¹¹

Ketika gelombang lonjakan mencapai suatu titik yang menghubungkan dua impedansi gelombang yang berbeda (titik transisi), maka akan menimbulkan gelombang surja yang dipantulkan pada titik tersebut. Gelombang surja masuk pada saluran (e_1 dan i_1) pada saluran-1 akan menimbulkan gelombang surja pantul di titik T setelah sampainya gelombang ini di titik tersebut pada waktu t . Kemudian gelombang gelombang pantul ini akan merambat dan mencapai titik C pada waktu $2t$, dan menghasilkan gelombang gelombang pantulan baru di titik C. Gelombang gelombang pantulan baru ini akan merambat lagi menuju titik T dan menghasilkan gelombang gelombang pantulan baru lagi. T pada waktu $3t$. Proses refleksi ini diulangi di titik T dan C. Setiap kali, total tegangan lonjakan atau arus lonjakan pada setiap titik saluran merupakan penjumlahan dari seluruh nilai gelombang tegangan lonjakan atau arus lonjakan yang muncul pada saluran. saluran pada saat itu. Waktu (t) adalah waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat

¹¹ Ir. T.S. Hutauruk. MEE, "Koordinasi Lokasi Arrester Dengan Tingkat Isolasi Peralatan Yang Dilindungi," 110.

pada saluran-1 dari titik C ke titik T atau sebaliknya, bila kecepatan rambat gelombang surja adalah v dan panjang saluran adalah S maka waktu (t) adalah:¹²

$$t = \frac{S}{v} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

$t =$ Waktu

$S =$ Panjang saluran (meter)

$v =$ Kecepatan gelombang datang (m/ μ s)

Gambar 2.16 menunjukkan bahwa gelombang sambaran petir datang dari sisi kiri, setelah sambaran petir mencapai titik pemasangan arrester, sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Untuk menentukan tegangan percikan arrester, terlebih dahulu harus ditentukan operator refleksi dan operator saluran.

$$a = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$b = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$a' = \frac{2 Z_c}{Z_c + Z_1} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$b' = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_c} \dots\dots\dots (2.11)$$

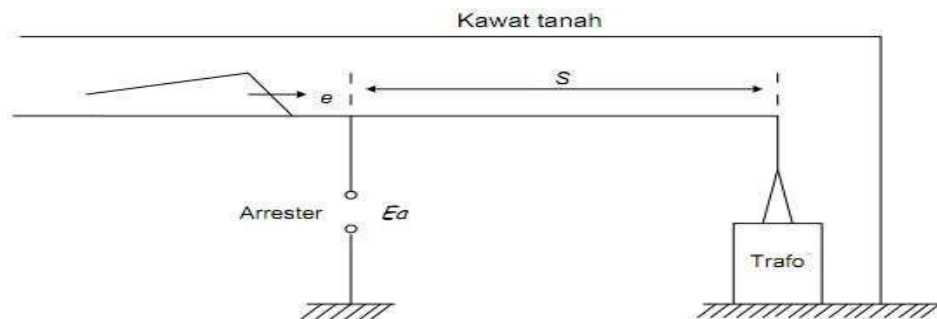
Keterangan :

$Z_1 =$ Impedansi surja penghantar udara (Ω)

$Z_c =$ Impedansi surja untuk kabel (Ω)

Jarak Maksimum Arrester dan Transformator yang dihubungkan dengan Saluran Udara

Di sini akan dibahas jarak maksimum arrester dan transformator bila dihubungkan langsung dengan saluran udara dan transformator dianggap sebagai jepitan terbuka.



Gambar 2.6. Jarak arrester dan Transformator terpisah sejauh S .¹³

¹² Ibid.

¹³ D. Marsudi, P. Generator, and B. Tobing, "Perlindungan Tegangan Lebih," in *Pembangkitan Energi Listrik*, 2016, 53–79.

Proteksi yang baik dapat diperoleh jika penangkal petir ditempatkan sedekat mungkin dengan klem trafo. Namun dalam prakteknya, arester biasanya harus ditempatkan pada jarak S dari transformator yang dilindungi. Oleh karena itu, jarak ini harus ditentukan agar perlindungan yang tepat dapat dilakukan. Seperti berikut:

E_a = tegangan percik arrester (arrester sparkover voltage).

E_p = tegangan jepitan trafo

$A = de/dt$ = kecuraman gelombang datang, dan di anggap konstan.

S = jarak arrester dengan tarfo

v = kecepatan merambat gelombang ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$) t = waktu

Jika trafo dianggap sebagai penjepit rangkaian terbuka, yang merupakan situasi paling berbahaya, pemantulan total akan terjadi jika gelombang mencapai trafo, dan gelombang ini akan kembali ke penghantar saluran dengan polaritas yang sama, gelombang yang merambat melalui pencegah petir adalah $2 S/v$. Jika arester mulai menyala (flashover), tegangan pada klip arester adalah :

$$E_a = At + (t - 2 \frac{S}{v}) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$E_p = 2 At - 2 A \frac{S}{v} \dots\dots\dots(2.13)$$

Bila waktu percik arrester t_{so} , dihitung mulai gelombang itu pertama kalisampai ke arrester, maka dari persamaan diatas menjadi

$$t_{so} = \frac{Ea + 2 A S/v}{2 A} \dots\dots\dots (2.14)$$

Setelah arrester itu memercik ia berlaku sebagai jepitan hubung singkat, dan menghasilkan gelombang sebesar:

$$-A = (t - t_{so}) \dots\dots\dots (2.15)$$

Kedua pihak dari arrester supaya tegangannya tetap E_a .

Gelombang negatif ini akan merambat ke transformator, dan setelah pantulan pertama pada transformator terjadi, jumlah tegangan pada transformator menjadi:

$$E_p = 2 At - 2A (t - t_{so}) = 2 A t_{so} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$= 2A \frac{Ea + 2 A S/v}{v} = Ea + 2 A S/v \dots\dots\dots (2.17)$$

Harga maksimum $E_p = 2 E_a$

Bila tegangan tembus isolator = E_p , maka E_p harus lebih besar dari $(E_a + 2A s/v)$ agar diperoleh perlindungan yang baik. Untuk mengubah harga E_p , cukup dengan mengubah S , yaitu makin kecil S maka makin kecil pula E_p .

METODELOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Pengambilan serta pengumpulan data yang dibutuhkan dalam penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2023 sampai dengan Juli 2023 di Gardu Induk Harapan Baru PT. PLN (Persero) Kota Samarinda.

Data Lapangan

Dalam melakukan penelitian ini, penulis membutuhkan beberapa data lapangan untuk mendukung berlangsungnya penulisan tersebut. Adapun data yang di butuhkan sebagai berikut:

1. Diagram satu garis (*single line diagram*) GI Harapan Baru
2. Data spesifikasi *Lightning Arrester* pada transformator GI Harapan Baru
3. Data spesifikasi transformator unit 1 pada GI Harapan Baru
4. Data sambaran petir (hari guruh) di Kota Samarinda pada tahun 2018
5. Data Jarak lightning arrester dengan transformator.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jumlah Sambaran Petir di Kota Samarinda

Hari guruh di kota Samarinda pada tahun 2018 termasuk daerah yang memiliki kerapatan sambaran petir tertinggi dengan total 288 hari guruh (IKL 78,90), sehingga perhatian terhadap peralatan proteksi untuk transformator daya dari surja petir pada GI Tengkawang. Dengan data IKL tersebut, jumlah sambaranpetir di sekitar GI Tengkawang dapat dihitung sebagai berikut:

$$N = 0,15 \cdot IKL$$

Diketahui:

$$N = \text{Jumlah sambaran petir per km}^2 \text{ dalam setahun} \quad IKL = 78,90$$

Maka diperoleh:

$$N = 0,15 \times 78,90 = 11,835/\text{km}^2 - \text{tahun}$$

Perhitungan Lightning Arrester pada Transformator Gardu Induk Harapan Baru

Pada perhitungan ini menggunakan metode diagram tangga untuk mengamankan transformator dapat dianalisis dari perhitungan arcing horn dan perbandingan kondisi arrester yang terjadi di lapangan.

Menentukan Tegangan Percik Impuls Maksimum

Menentukan besarnya nilai tegangan percikan impuls maksimal *Lightning Arrester* dengan tegangan operasi pada sistem 150 kV, maka dengan menggunakan Tabel 4.1 sebagai berikut:

Harga maksimum tegangan lebih gelombang petir

Rating LA (kV rms)	Kecepatan rambat gelombang berjalan (kV/ μ s)	LA dengan klasifikasi 10 kA	
		Tegangan percik impuls (kV)	Tegangan percik impuls maks. (kV)
108	870	363	418
120	940	940	463
126	980	420	495
138	1030	500	577
174	1160	570	660
186	1180	610	702
198	1200	649	746

Sumber : PT. PLN (Persero)¹⁴

Dari tabel diatas diperoleh tegangan percikan impuls maksimum sebesar 577 kV yang mana diambil dari baris ke empat dengan *rating arrester* 138 kV dan kecepatan rambat 1030 kV/ μ s.

Menentukan Arus Pelepasan Lightning Arrester pada Transformator GI Harapan Baru

Arus pelepasan *Lightning Arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.6). Besar impedansi surja untuk kawat udara = 400-600 ohm, dan untuk kabel = 50-60 ohm.¹⁵

1. Arus Nominal Transformator 30 MVA

Arus Nominal transformator 30 MVA pada GI Harapan Baru diperoleh data sebesar 866 A.

¹⁴ PT. PLN (Persero), "Pedoman Lightning Arrester," last modified 2014, https://www.academia.edu/37906336/Pedoman_Lightning_Arrester.

¹⁵ Ir. T.S. Hutauruk. MEE, "Koordinasi Lokasi Arrester Dengan Tingkat Isolasi Peralatan Yang Dilindungi," 110.

2. Menentukan Hambatan Saluran

Menentukan Hambatan Saluran transformator 30 MVA pada Gardu Induk Harapan Baru dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{150 \text{ kV}}{866 \text{ A}} = 173 \ \Omega$$

Menentukan Arus Pelepasan

Arus Pelepasan *Lightning Arrester* untuk mengisolasi transformator dengankapasitas 30 MVA diperoleh hasil melalui perhitungan menggunakan persamaan (2.6) sebagai berikut:

Diketahui:

$$U_d = 1030 \text{ kV}$$

$$U_a = 138 \text{ kV}$$

$$Z = 400 + 173 = 573 \ \Omega$$

Maka diperoleh:

$$I_a = \frac{2U_d - U_a}{Z}$$
$$= \frac{2(1030) - 138}{573} = \frac{1600}{573} = 3,35 \text{ kA}$$

Jadi arrester terpasang pada Gardu Induk Tengkwang yang ideal harus mampu melewati arus pelepasan dengan nilai minimal 3,35 kA. Arrester yang terpasang pada Gardu Induk Tengkwang untuk transformator satu mempunyai batas arus pelepasan 10 kA. Nilai ini telah sesuai dengan kebutuhan pada gardu induk tersebut. Apabila kapasitas arus pelepasan dari arrester semakin besar maka semakin baik perlindungan dari arrester tersebut.

Perhitungan Jarak *Lightning Arrester* dengan transformator

Diketahui tegangan sistem peralatan sebagai berikut, tegangan transmisi 150KV, dan BIL trafo 650KV. Trafo diproteksi dengan penangkal petir dengan tegangan percikan 577 kV. Jarak proteksi ke peralatan lapangan adalah 5 meter. Lonjakan dalam bentuk variabel merambat ke peralatan yang dilindungi penangkal petir dengan kecepatan 300 m/ μ s, berapa jarak maksimum antara arester dan peralatan untuk melindungi seluruh peralatan dari bahaya lonjakan arus?

Diketahui :

$$E_p = 650 \text{ kV}$$

$$A = 1000 \text{ dv/dt}$$

$$E_a = 577 \text{ kV}$$

$$v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Ditanya:

S (jarak maksimum antara arrester dengan tarrafo)?

Untuk surja petir tegangan gelombang datangnya sebesar 1000 kV, setelah dilakukan perhitungan matematis maka jarak maksimum arester dihitung sebagai berikut:

$$E_p = E_a + 2 \frac{A S}{v}$$

$$650 = 577 + 2 \frac{1000 S}{300}$$

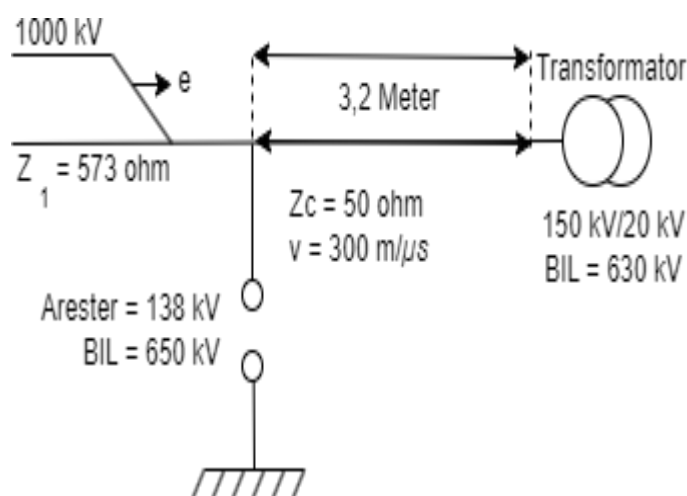
$$73 = 2 \frac{1000 S}{300}$$

$$73 = 2 \frac{1000}{300}$$

$$S = \frac{73}{6,66} = 10,96 \text{ meter}$$

Oleh karena itu, menurut perhitungan jarak antara arester dan trafo adalah 10,96 meter, dan jarak pemasangan sebenarnya di lapangan adalah 3,2 meter, sehingga pemasangannya masih lebih rendah dari harga maksimum.

Kontruksi Diagram Tangga Arrester Dengan Transformator



Gambar 4.1. Kontruksi diagram tangga arrester dengan transformator

$$a = \frac{Z_C - Z_1}{Z_C + Z_1} = \frac{50 - 573}{50 + 573} = \frac{-523}{623} = -0,84$$

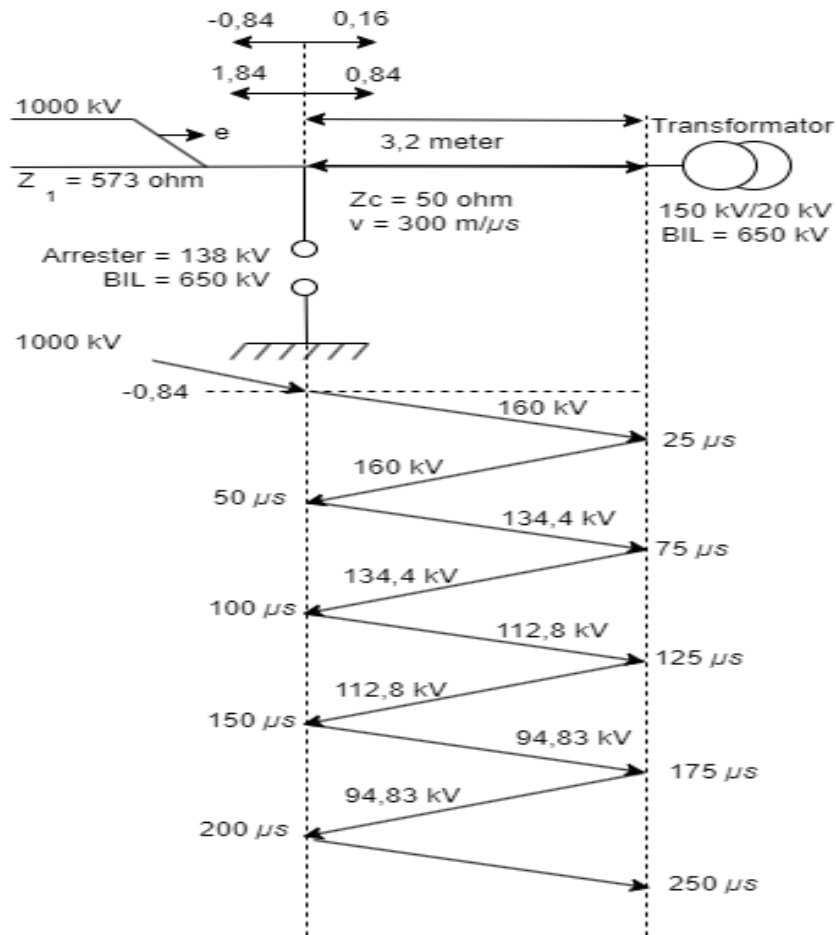
$$a' = \frac{2 Z_C}{Z_C + Z_1} = \frac{2 \times 50}{50 + 573} = \frac{100}{623} = 0,16$$

$$b = \frac{Z_1 - Z_C}{Z_C + Z_1} = \frac{573 - 50}{50 + 573} = \frac{523}{623} = 0,84$$

$$b' = \frac{2 Z_C}{Z_C + Z_1} = \frac{2 \times 573}{50 + 573} = \frac{1146}{623} = 1,84$$

Analisa Tegangan Percik Arrester

Nilai kecuraman gelombang 1000 dv/dt merupakan kenaikan tegangan tertinggi yang mungkin terjadi akibat lonjakan trafo. Hasil perhitungan bunga api arrester dan kenaikan tegangan trafo ditunjukkan pada diagram tangga di bawah ini:

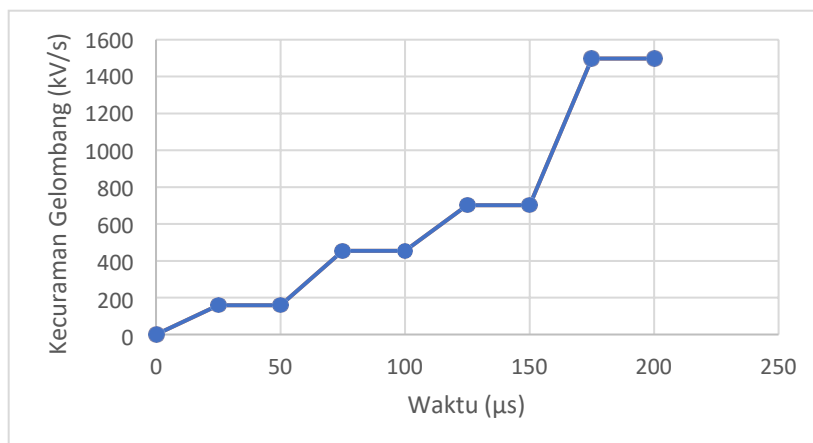


Gambar 4.2. Analisis diagram tangga

Pertama-tama yang harus ditentukan ialah waktu pada saat arrester mengalami percikan, Misalkan dulu tidak ada arrester, maka tegangannya adalah sebagai berikut :

- $t = 0 \mu\text{s}$; $e = 0 \text{ kV}$
- $t = 25 \mu\text{s}$; $e = 160 \text{ kV}$
- $t = 50 \mu\text{s}$; $e = 160 \text{ kV}$
- $t = 75 \mu\text{s}$; $e = 160 + 160 + 134,4 = 454,4 \text{ kV}$
- $t = 100 \mu\text{s}$; $e = 454,4 \text{ kV}$
- $t = 125 \mu\text{s}$; $e = 454,4 + 134,4 + 112,8 = 701.6 \text{ kV}$
- $t = 150 \mu\text{s}$; $e = 701.6 \text{ kV}$
- $t = 175 \mu\text{s}$; $e = 701,4 + 454,4 + 134,4 + 112,8 + 94,83 = 1497,83 \text{ kV}$
- $t = 200 \mu\text{s}$; $e = 1497,83 \text{ kV}$

Berdasarkan hasil perhitungan, kecuraman gelombang yang dihitung setiap waktu menurut waktu terjadinya ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.3. Grafik kecuraman gelombang berdasarkan waktu

Berdasarkan Gambar 4.3 terlihat bahwa kecuraman gelombang selalu bertambah sebanding dengan bertambahnya waktu. Pada waktu tertentu dan dengan kecuraman gelombang tertentu, arester akan menarik (memecah) tegangan pada lokasi arester, dan waktu untuk mencapai tegangan tersebut dapat diperoleh melalui analisis diagram tangga. Gambar 4.2 Kenaikan tegangan pada posisi arester ditunjukkan pada Gambar 4.4. Perhitungan berdasarkan waktu arester adalah sebagai berikut:

Waktu percik arrester (t_{so}) =

$$t_{so} = 8 + \Delta t$$

Diperoleh t_{so} sebagai berikut:

$$650 = 454,4 + 1,84 \times \frac{134,4}{2} \Delta t$$

$$195,6 = 123,64$$

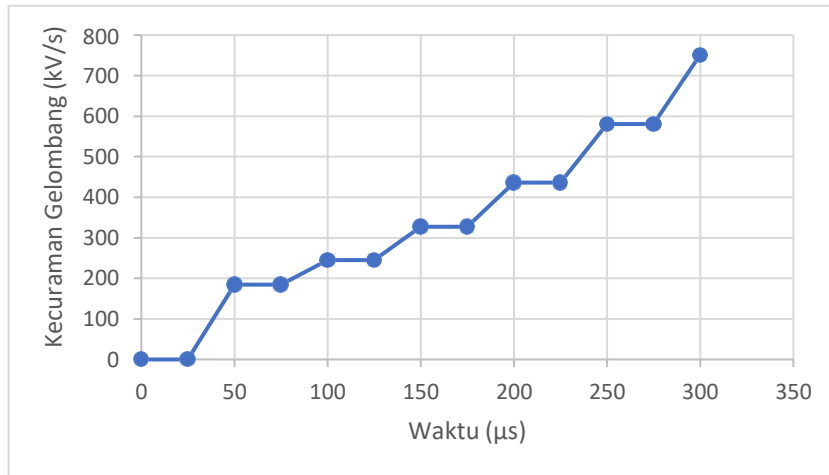
$$\Delta t = 1,58$$

Jadi $t_{so} = 8 + \Delta t = 8 + 1,54 = 9,54 \mu$ s

Naik tegangan pada trafo adalah sebagai berikut :

t = 0 μ s	; e = 0 kV
t = 25 μ s	; e = 0 kV
t = 50 μ s	; e = 184 kV
t = 75 μ s	; e = 184 kV
t = 100 μ s	; e = 184 + 61,27 = 245,27 kVt = 125 μ s ; e = 245,27 kV
t = 150 μ s	; e = 245,27 + 81,67 = 326,94 kV
t = 175 μ s	; e = 326,94 kV
t = 200 μ s	; e = 326,94 + 108,87 = 435,82 kVt = 225 μ s ; e = 435,82 kV
t = 250 μ s	; e = 435,82 + 145,12 = 580,94 kVt = 275 μ s ; e = 580,94 kV
t = 300 μ s	; e = 580,94 + 170,36 = 751,3 kV

Jarak Penempatan Lightning Arrester sebagai Pelindung Transformator terhadap Tegangan Lebih pada Gardu Induk 150 Kv Harapan Baru



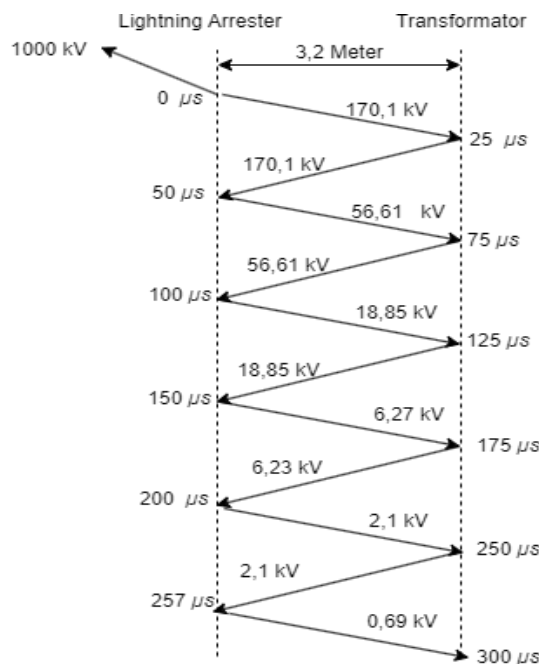
Gambar 4.4. Grafik naik tegangan pada trafo

Berdasarkan Gambar 4.4. Terlihat bahwa tegangan pada trafo juga terus bertambah atau bertambah seiring dengan berjalannya waktu. Koefisien proteksi trafo dihitung dan ditentukan berdasarkan $FP=1.2 \times BIL$ trafo, kemudian $FP=1.2 \times 650kV$, hasilnya 780kV tidak boleh melebihi batas toleransi BIL (*Basic Insulation Level*).

Setelah arester menyala 9,54 µs, tegangan pada trafo akan turun. Karena batas ketahanan BIL trafo adalah 780 kV dan tegangan puncak yang terjadi pada 300 µs adalah 751,3 kV, maka arester masih mampu melindungi trafo.

Jarak Pemasangan Arrester dengan Transformator 3,2 Meter

Berikut ini adalah perhitungan jarak arrester ke transformator dengan jarak 3,2 meter adalah sebagai berikut.



Gambar 4.5. Diagram tangga dengan jarak 3,2 meter

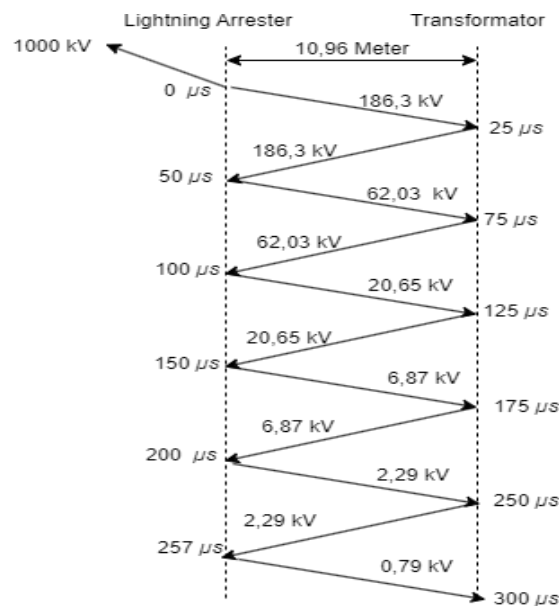
Naik tegangan pada trafo adalah sebagai berikut:

$t = 0 \mu s$; $e = 0 \text{ kV}$
$t = 25 \mu s$; $e = 0 \text{ kV}$
$t = 50 \mu s$; $e = 170,1 \text{ kV}$
$t = 75 \mu s$; $e = 170,1 \text{ kV}$
$t = 100 \mu s$; $e = 170,1 + 56,61 = 226,61 \text{ kV}$
$t = 150 \mu s$; $e = 226,61 + 75,41 = 302,07 \text{ kV}$
$t = 200 \mu s$; $e = 302,07 + 100,58 = 402,66 \text{ kV}$
$t = 250 \mu s$; $e = 402,66 + 134,08 = 536,74 \text{ kV}$
$t = 300 \mu s$; $e = 536,74 + 178,73 = 715,47 \text{ kV}$

Dengan demikian jarak arester dengan trafo adalah 3,2 meter dan tegangan yang muncul pada trafo sebesar 715,47 kV sehingga trafo masih aman karena tidak melebihi batas ketahanan TID trafo yaitu 780 kV.

Jarak Pemasangan Arrester dengan Transformator 10,96 Meter

Berikut ini adalah perhitungan jarak arrester ke transformator dengan jarak 10,96 meter adalah sebagai berikut.



Gambar 4.6. Diagram tangga dengan jarak 10,96 meter

Naik tegangan pada trafo adalah sebagai berikut:

$t = 0 \mu s$; $e = 0 \text{ kV}$
$t = 25 \mu s$; $e = 0 \text{ kV}$
$t = 50 \mu s$; $e = 186,3 \text{ kV}$
$t = 75 \mu s$; $e = 186,3 \text{ kV}$
$t = 100 \mu s$; $e = 186,3 + 62,03 = 248,33 \text{ kV}$
$t = 150 \mu s$; $e = 248,33 + 82,69 = 331,03 \text{ kV}$
$t = 200 \mu s$; $e = 331,03 + 110,23 = 441,26 \text{ kV}$
$t = 250 \mu s$; $e = 441,26 + 146,94 = 588,21 \text{ kV}$
$t = 300 \mu s$; $e = 588,21 + 195,87 = 784,08 \text{ kV}$

Jadi untuk jarak 10,96 meter antara arester dan trafo, tegangan yang muncul pada trafo sebesar 784,08 kV sehingga arester tidak dapat bekerja maksimal karena sedikit melampaui batas ketahanan TID trafo sebesar 780 kV.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: Pertama, tata letak arester unit trafo daya Unit 1 Gardu Induk Pakatan Harapan sudah memenuhi standar. Dihitung jarak maksimum antara arester dengan trafo daya adalah 10,96 meter, sedangkan jarak antara arester on-site dengan trafo adalah 3,2 meter, sehingga penempatan arester di Gardu Induk Harapan Baru sudah optimal untuk melindungi arus listrik. Trafo daya tidak terpengaruh oleh gelombang petir dan arus lonjakan. Kedua, kenaikan tegangan yang terjadi pada trafo masih dibawah BIL, sehingga dipastikan peralatan tersebut masih dapat terlindungi oleh arester karena pemasangannya masih dibawah harga maksimal atau tidak melebihi standar BIL. Dilihat dari pengaruh jarak terhadap tegangan abnormal yang mencapai trafo, semakin dekat jarak maka efek proteksi arester semakin baik, karena semakin sedikit tegangan yang mencapai arester.

Hasil pembahasan dan analisa rating Gardu Induk Harapan Baru atau rating penangkal petir dapat dijadikan acuan untuk menentukan jenis penangkal petir yang akan digunakan. Kemajuan yang dicapai dalam penelitian ini diharapkan dapat diterapkan pada gardu induk lainnya.

REFERENSI

- Abdul Azis, and H. Alimin Nurdin. "ANALISA JARAK LINDUNG LIGHTING ARRESTER TERHADAP TRANSFORMATOR DAYA 20 MVA GARDU INDUK SUNGAI JUARO PALEMBANG." *TEKNIKA: Jurnal Teknik* 7, no. 1 (2020): 106–120. <http://www.teknika-ftiba.info/teknika/index.php/1234/article/view/134/115>.
- D. Marsudi, P. Generator, and B. Tobing. "Perlindungan Tegangan Lebih." In *Pembangkitan Energi Listrik*, 2016.
- Ir. T.S. Hutauruk. MEE. "Koordinasi Lokasi Arrester Dengan Tingkat Isolasi Peralatan Yang Dilindungi." In *Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja*. Cetakan 2. Jakarta: Erlangga, 1991.
- Nainggolan, Onglan, Bustani, and Arbain. "Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv Pada Penyulang J4 J5 J6 Di PT. PLN (Persero) Area Balikpapan Menggunakan Nilai

- SAIDI Dan SAIFI.” *Mutiara : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia* 1, no. 1 (July 2023): 103–116.
- Nugroho, Setyo Adi. “INVESTIGASI TEGANGAN LEBIH TRANSIEN AKIBAT SAMBARAN PETIR PADA GARDU INDUK 150 KV.” *Jurnal Edukasi Elektro* 5, no. 1 (May 2021): 27–31.
- P. D. A. Arismunandar. *Teknik Tegangan Tinggi*. Cetakan 8. Jakarta: Pradnya Paramita, 2001.
- Prof. Dr. Reynaldo Zoro. “Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik.” In *Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik*. Cetakan 1. Bandung: PT. Remaja Rosdakarya, 2018.
- PT. PLN (Persero). “Pedoman Lightning Arrester.” Last modified 2014. https://www.academia.edu/37906336/Pedoman_Lightning_Arrester.
- Randi Agustian, and Bambang HSR Wibowo. “Analisa Penempatan Jarak Arrester Sebagai Proteksi Transformator Terhadap Tegangan Lebih Surja Petir.” *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology* 16, no. 1 (2018): 5–8. <https://epsilon.unjani.ac.id/index.php/epsilon/article/view/11/2>.
- Ratnasari, Anggita Dwi, Sukarno Budi Utomo, and Muhamad Haddin. “ANALISA TEGANGAN LEBIH AKIBAT SURJA PETIR DARI TRANSMISI YANG MASUK KE TRAFU DAYA I 20 MVA DI GARDU INDUK 150 KV BUMI SEMARANG BARU (BSB) DENGAN METODE DIAGRAM TANGGA.” *Jurnal JE-UNISLA : Electronic Control, Telecommunication, Computer Information and Power System* 7, no. 2 (September 2022): 113–118.