

EVALUASI PERLINDUNGAN GARDU INDUK 150 KV PANDEAN LAMPER DI TRAF0 III 60 MVA TERHADAP GANGGUAN SURJA PETIR

Ihwan Ernanto Wibowo¹⁾, Luqman Assaffat²⁾, M. Toni Prasetyo³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Semarang

One of the main causes of damage to existing equipment in the substation was struck by lightning attack that cause the conductor wave and make over voltage and flames leap peak voltage exceeds BIL.

The aim of this study was to calculate and analyze the level of protection, against power transformer arrester, the safe distance between arrester and transformer power to get a good protection against harmful lightning surges, comparing both arresters installed.

To solve the problems of interference caused by lightning surge lightning arrester is installed as close as possible to put on the transformer clamps to protect electrical equipment.

The results of calculations for a distance of 6 m, 4 MBA type 2 arrester capable of with standing the wavefront steepness of 500 kV / μ s, while type exlim P 700 kV / μ s. The greater the arrester capable of withstanding surge wavefront tilting the better the equipment in substations are protected. The evaluation shows that the distance between arrester and transformer installed in the 150 kV substation Pandean Lamper less than the maximum to protect electrical equipment, especially power transformers.

Key words : *lightning attack, arrester distance, level of protection.*

Pendahuluan

Sistem tenaga listrik adalah hubungan antara pusat listrik (pembangkit) dan konsumen (beban) dimana diantara keduanya terdapat saluran transmisi, gardu induk, dan saluran distribusi sehingga energi listrik yang dihasilkan pusat listrik dapat dipergunakan oleh konsumen.

Salah satu komponen utama pada sistem transmisi adalah gardu induk, dimana gardu induk merupakan kumpulan peralatan listrik tegangan tinggi yang mempunyai fungsi dan kegunaan dari masing-masing peralatan

Evaluasi Perlindungan GI.....

yang satu sama lain terkait sehingga penyaluran energi listrik dapat terlaksana dengan baik. Salah satu penyebab terjadinya kerusakan peralatan utama maupun peralatan lainnya seperti instrument gardu induk atau gagalnya isolasi peralatan adalah gangguan sambaran surja petir, baik secara langsung maupun tak langsung pada peralatan di dalam gardu induk. Gangguan dapat disebabkan bila terjadinya sambaran pada kawat penghantar di saluran transmisi yang menyebabkan gelombang surja petir merambat menuju peralatan di gardu

induk, di mana besar dan ketajamannya dapat menggagalkan isolasi peralatan.

Sambaran surja petir dapat mengakibatkan timbulnya gelombang berjalan yang berbentuk impuls pada penghantar. Gelombang berjalan ini akan menyebabkan terjadinya tegangan lebih (*over voltage*), dan juga dapat mengakibatkan terjadinya lompatan api (*flash over*), apabila tegangan puncaknya melebihi ketahanan impuls isolasi atau BIL (*Basic Impulse Insulation Level*). Namun pengaruh gelombang berjalan akan menimbulkan tegangan yang lebih tinggi di tempat-tempat yang agak jauh dari arrester. Oleh karena itu jarak optimal yang diizinkan antara arrester dan peralatan yang dilindungi dapat ditentukan dengan memperhatikan keamanan dari gelombang surja yang datang, kecepatan perambatan gelombang, tegangan percik arrester, sehingga konsep perlindungan terhadap peralatan dalam hal ini koordinasi isolasi dapat tercapai secara optimal.

Dengan demikian, pada sebuah gardu induk sangat diperlukan perlindungan terhadap gangguan surja petir. Untuk membuat jalan yang mudah dilalui oleh surja petir maka harus dipasang sebuah alat yang disebut arrester. Arrester merupakan alat proteksi bagi peralatan sistem tenaga listrik terhadap gangguan gangguan surja petir.

Pada keadaan normal arrester tersebut berlaku sebagai isolator, bila timbul surja petir arrester berlaku sebagai konduktor, dan setelah surja itu hilang arrester harus dengan cepat kembali sebagai isolator, sehingga pemutus daya tidak sempat membuka. Disamping itu arrester mampu memutus arus susulan (*follow current*) tanpa menimbulkan gangguan, inilah salah satu fungsi terpenting dari arrester.

2. Tinjauan Pustaka

Saluran transmisi memegang peranan penting dalam proses penyaluran daya dari pusat-pusat pembangkit hingga ke pusat-pusat beban. Agar dapat melayani kebutuhan tersebut maka diperlukan sistem transmisi tenaga listrik yang handal dengan tingkat keamanan yang memadai. Salah satu penyebab terjadinya kerusakan peralatan utama maupun peralatan lainnya seperti instrument gardu induk adalah sambaran surja petir baik secara langsung maupun tak langsung pada peralatan di dalam gardu induk. Dengan demikian, pada sebuah gardu induk sangat diperlukan perlindungan terhadap gangguan surja petir. Untuk membuat jalan yang mudah dilalui oleh surja petir harus dipasang sebuah alat yang disebut arrester.

Menurut Suyono dan T. Haryono arrester Zinc-oxide produk ABB tipe
Ihwan Ernanto W, Luqman A, M. Tony P

exlim-P bekerja sangat baik, yaitu dapat memotong semua surja tegangan baik surja cepat maupun surja lambat pada muka gelombangnya.

Kuffel W. S. Zaengldalam Warmi Y menyatakan bahwa perlindungan peralatan pada gardu induk biasanya menggunakan arrester yang dapat membatasi harga tegangan surja di bawah tingkat isolasi dasar peralatan. Namun pengaruh gelombang berjalan akan menimbulkan tegangan yang lebih tinggi di tempat-tempat yang agak jauh dari arrester.

Menurut Zoro dan Merfiadhi gangguan sambaran petir menjadi temporer akibat adanya *short circuit* pada jaringan. Hal ini mungkin terjadi, bila tegangan lebih akibat sambaran petir menyebabkan tembus pada isolator yang sudah tua, peralatan pada jaringan yang mengalami kondisi serupa (trafo, arrester) atau jaringan menjadi putus, atau hal lain yang merupakan rentetan kejadian seperti penuaan atau pengotoran pada isolator sehingga rentan terhadap tegangan lebih petir.

Trafo dibagi atas dua bagian yaitu trafo tenaga (*Power Transformer*) dan trafo instrumen (*Instrumen Transformer*). Trafo tenaga gunanya untuk menyalurkan menyalurkan daya listrik pada tegangan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan, bisa *step up/step down*. Trafo instrumen

gunanya untuk mengukur, memonitor & mengamankan kebesaran listrik (Volt, kilo Volt, Ampere, kilo Ampere) pada sisi primer.

Trafo Instrumen gunanya untuk mengukur, mengamankan, dan memonitor kebesaran listrik pada sisi primer. Terdiri dari atas trafo tegangan (PT) dan trafo arus (CT). Desain dari trafo instrument sama sekali berbeda dengan trafo tenaga. Pada trafo arus, arus primer tidak tergantung pada kondisi arus sekunder, bahkan arus primer merupakan faktor dominan.

Gardu Induk (GI) adalah adalah tempat peralatan-peralatan listrik untuk menghubungkan dan memutuskan serta mengatur tegangan listrik yang dibangkitkan dari pembangkit dan merupakan penghubung saluran sistem transmisi dan saluran distribusi. Peranan dari gardu induk itu sendiri adalah menerima dan menyalurkan tenaga listrik (KVA, MVA) sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu (TET, TT, TM).

Adapun klasifikasi gardu induk menurut tegangannya :

1. Gardu Induk Transmisi

adalah gardu induk yang tegangan keluarannya berupa tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi.

2. Gardu Induk Distribusi

adalah gardu induk yang menerima suplai tenaga dari gardu induk

transmisi untuk diturunkan tegangannya melalui trafo daya menjadi terganngan menengah (20 kV)

Perlindungan Gardu Induk

Pada umumnya GI dilindungi untuk mendapatkan pengamanan dari macam-macam gangguan. Pada GI dipasang suatu pengamanan supaya dapat beroperasi sebagaimana fungsinya, dan supaya alat-alat yang terdapat di dalam GI juga tidak mudah rusak. Perlindungan gardu induk terbagi dalam 2 bagian :

1. Perlindungan terhadap sambaran langsung
2. Perlindungan terhadap gelombang yang datang dari kawat transmisi

Sepanjang perambatannya pada kawat transmisi, gelombang mengalami redaman dan distorsi yang disebabkan oleh korona, resistivitas, tanah, pengaruh kulit dan gandengan. Selain itu, bentuknya juga dapat berubah karena pantulan ketika mencapai gardu.

Redaman dimisalkan mengikuti formula empiris dari FOUST and MENGER,

$$\frac{E}{1 + K E x}$$

Keterangan :

e = tegangan (kV) pada titik sejauh mil dari

titik mula.

x = jarak perambatan (mil)

E = tegangan surja (kV) pada titik mula.

K = konstanta redaman

= 0,0006 untuk gelombang-gelombang terpotong (**2 μs**)

= 0,0003 untuk gelombang-gelombang pendek (**5 μs**)

= 0,00016 untuk gelombang-gelombang panjang (**20 μs**)

Semakin tinggi tegangan, makin besar redaman dan gelombang-gelombang pendek diredam lebih cepat dari gelombang panjang.

Apabila surja dengan tegangan *e* mencapai gardu, terjadi pantulan dan tegangan puncak pada gardu menjadi :

$$e_2 = b e = \frac{b E}{1 + K E x}$$

Dimana:

$$b = \frac{\text{puncak dari surja selama pantulan}}{\text{puncak dari gelombang berjalan bebas}} = \text{indeks terusan}$$

Jadi *b* merupakan perbandingan antara tegangan total selama pantulan dengan gelombang masuk.

Sambaran Petir

Bila ada suatu awan yang berada di atas bumi dalam jarak tertentu, muatan positif mengumpul pada bagian atas dan muatan negatif berada pada bagian bawah. Bumi dapat dikatakan sebagai benda yang mempunyai muatan positif pada permukaan. Muatan negatif yang berada di awan akan ditarik oleh muatan

positif pada permukaan bumi. Proses pengaliran muatan negatif dari awan menuju ke bumi dinamakan petir.

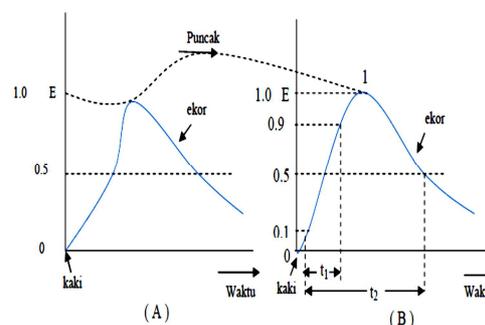
Petir merupakan loncatan elektron dari awan yang merupakan kilatan yang umumnya disertai dengan suara gemuruh. Muatan dari awan cenderung mengumpul pada tempat-tempat yang runcing, sehingga petir seringkali menuju pada tempat-tempat tersebut. Elektron dari awan mempunyai jumlah yang besar, jika mengalir ke permukaan bumi akan mengalirkan pula arus listrik yang sangat besar, dimana nilainya dapat mencapai ratusan kilo ampere.

Pada sistem tenaga listrik yang dipasang diatas tanah, kemungkinan terkena sambaran petir sangat besar sekali, maka sistem tenaga listrik perlu di beri perlindungan terhadap adanya sambaran petir. Keadaan awan yang bermuatan positif dan negatif tersebut tidak merata diseluruh angka, hal ini akan mempengaruhi cara-cara masuk dan macam-macam proteksi untuk

Sambaran Petir Sebagai Gelombang Berjalan

Bentuk umum suatu gelombang berjalan digambarkan seperti pada gambar (2.1), sedangkan spesifikasi dari suatu gelombang berjalan antara lain meliputi :

- Puncak (crest) gelombang, E (kV), yaitu amplitude maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang, t_1 (mikro detik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Dalam praktek ini diambil dari 10% E , lihat gambar (2.1b).
- Ekor gelombang, yaitu bagian dibelakang puncak. Panjang gelombang, t_2 (mikro detik), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
- Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negative.



Gambar 1. Spesifikasi gelombang berjalan

Suatu gelombang berjalan (surja) dinyatakan sebagai :

$$E, t_1/t_2$$

dengan,

E : Tegangan puncak

t_1/t_2 : Rasio muka gelombang

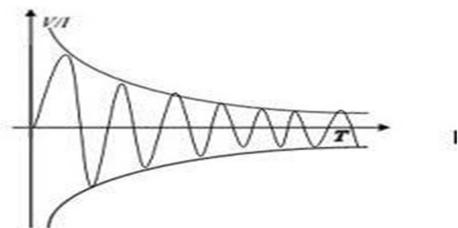
terhadap ekor gelombang surja

Jadi suatu gelombang dengan polaritas positif, puncak 1000 kV, maka tiap 3 mikro detik, dan panjang 21 mikro detik dinyatakan sebagai : + 1000, 3/21.

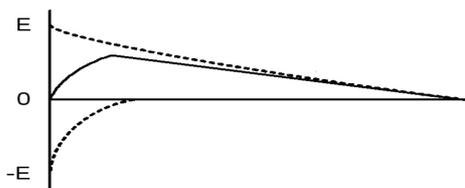
Ekspresi dasar dari gelombang berjalan secara sistematis dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$e(t) = E(e^{-at} - e^{-bt})$$

Dimana E, a dan b adalah konstanta. Dari variasi a dan b dapat dibentuk berbagai macam bentuk gelombang yang dapat dipakai sebagai pendekatan dari gelombang berjalan. Gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2. Macam Gelombang surja.

Keterangan gambar 2.

a. Gelombang sinus teredam.

$$a = \alpha - j\omega$$

$$b = \alpha + j\omega$$

$$E = E_0 / 2j$$

$$E = E_0/2j e^{-at} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})$$

$$= e^{-at} \sin \omega t$$

b. Gelombang kilat tipikal.

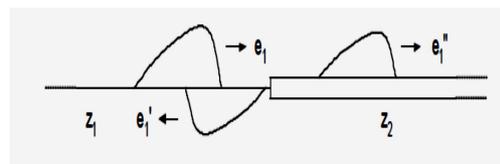
a }
b } terbatas serta riil
E }

Bila gelombang berjalan menemui titik peralihan misalnya : hubungan terbuka, hubungan singkat, atau perubahan impedansi, maka sebagian gelombang itu akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan ke bagian lain dari titik tersebut.

Pada titik peralihan itu sendiri, besar tegangan dan arus dapat dari 0 sampai 2 x besar tegangan gelombang yang datang.

Gelombang yang datang dinamakan gelombang datang (incident wave), dan kedua gelombang lain yang timbul karena titik peralihan itu dinamakan gelombang pantulan (reflected wave) dan gelombang terusan (transmitted wave),

lihat gambar 3.



Gambar 3. Perubahan impedansi pada titik peralihan

Keterangan gambar :

e_1 : Gelombang datang (*incident wave*)

e_1' : Gelombang pantulan (*reflected wave*)

e_1'' : Gelombang terusan (*transmitted wave*)

Karakteristik Arrester

Basic Impulse Insulation Level (BIL) adalah batas kumparan suatu peralatan terhadap surja-hubung atau surja petir. Pada G.I 150 kV diperlukan kekuatan BIL sekitar 750 kV atau lima kali tegangan sistem.

Pemilihan Arrester

Dalam pemilihan jenis arrester yang sesuai untuk suatu perlindungan tertentu, beberapa faktor harus diperhatikan :

1. Kebutuhan perlindungan

Kebutuhan perlindungan berhubungan dengan kekuatan isolasi peralatan yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari arrester.

2. Tegangan sistem

Tegangan sistem adalah tegangan pada terminal arrester.

3. Arus hubung singkat

Arus hubung singkat sistem ini hanya diperlukan pada arrester jenis ekspulsi.

4. Faktor kondisi luar

Faktor kondisi luar apakah normal atau tidak normal (200 meter atau lebih di atas permukaan laut), temperatur atau kelembapan yang tinggi serta pengotoran.

5. Faktor ekonomi

Faktor ini adalah perbandingan antara biaya pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester atau dipasang arrester yang lebih rendah mutunya.

Pengenal Arrester

Pada umumnya pengenalan atau (rating) arrester hanya pengenalan tegangan. Pada beberapa jenis arrester perlu juga diketahui pengenalan arusnya untuk menentukan kapasitas thermal arrester tersebut.

Supaya pemakaian arrester lebih efektif dan ekonomis, perlu diketahui 4 karakteristiknya :

1. Pengenal tegangan ini paling sedikit sama dengan tegangan maksimum yang mungkin timbul selama terjadi gangguan.
2. Karakteristik perlindungan atau karakteristik karakteristik impuls ini adalah untuk koordinasi yang baik antara arrester dan peralatan yang dilindungi.
3. Kemampuan pemutus arus frekuensi dasar.

Penentuan Tegangan Dasar Arrester

Tegangan dasar arrester ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan ini dipilih berdasarkan kenaikan tegangan dari fasa-fasa yang sehat pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah ditambah suatu toleransi :

$$E_r = \alpha \beta U_m$$

dengan :

E_r : Tegangan dasar arrester (kV)

α : Koefisien pembumian

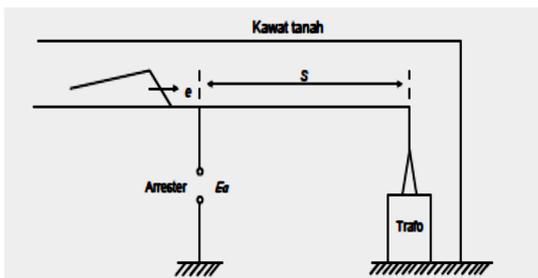
β : Toleransi guna memperhitungkan fluktuasi tegangan, efek ferranti, dan sebagainya

U_m : Tegangan sistem maksimum (kV)

Koefisien α menunjukkan kenaikan tegangan dari fasa yang sehat pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah, tergantung dari impedansi-impedansi urutan positif, negatif dan nol dilihat dari titik gangguan.

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 4. Transformator dan arrester terpisah sejauh S

Perlindungan yang baik diperoleh bila arrester ditempatkan sedekat mungkin pada jepitan transformator. Tetapi, dalam praktek sering arrester itu harus ditempatkan sejauh S dari transformator yang dilindungi. Karena itu, jarak tersebut harus ditentukan agar perlindungan dapat berlangsung dengan baik.

Keterangan gambar :

E_a : Tegangan percik arrester (kV)

E_p : Tegangan pada jepitan transformator (kV)

$A : \frac{de}{dt}$: Kecuraman gelombang datang, dan dianggap konstan ($kV/\mu s$)

S : Jarak arrester dan transformator (m)

v : Kecepatan merambat gelombang $m/\mu s$

$$E_p = E_a + 2 A S/v$$

Dalam pembahasan penggunaan data komputer dalam gambar 2 dan tabel 2.1 digunakan symbol-simbol sebagai berikut :

E : Harga puncak tegangan surja yang masuk gardu

$\frac{de}{dt}$: Kecuraman muka gelombang $kV/\mu det$

Z : Impedansi surja kawat transmisi (Ω)

E_0 : Tegangan arrester dalam pada arus nol,

ditentukan dari karakteristik arrester (kV)

R : Tahanan arrester, ditentukan dari

Ihwan Ernanto W, Luqman A, M. Tony P

karakteristik (Ω)

$\frac{di}{dt}$: Laju kenaikan maksimum arus arrester

($\text{kA}/\mu\text{s}$)

I : Arus maksimum arrester yang terletak diujung suatu saluran (**kA**), yang terletak di ujung suatu saluran

$$\frac{2e - e_a}{Z}$$

Dimana e_a adalah tegangan arrester yang tergantung dari arrester **I** itu sendiri. Untuk menghindari kesulitan tersebut dibuatkan

asumsi bahwa arrester itu mempunyai karakteristik V-I yang linier antara 5.000 amper dan 10.000 amper.

Jadi: $e_a = E_0 + RI$
maka,

$$I = \frac{2e - (E_0 + RI)}{Z}$$

atau ,

$$I = \frac{2e - E_0}{Z + R}$$

Keterangan :

$L \frac{di}{dt}$: Tegangan pada kawat arrester (**kV**)

E_d : Harga puncak tegangan sistem, fasa netral (**kV**)

E_s : Perubahan tegangan maksimum pada lokasi arrester (**kV**)

E_r : Perubahan tegangan maksimum pada transformator

: $E_d +$ tegangan uji gelombang terpotong, **kV**

F :Tegangan maksimum pada lokasi arrester dibagi laju kenaikan surja yang datang $\frac{E_s}{\frac{de}{dt}}$

E_s : $E_0 + RI + L \frac{di}{dt} + E_d$

L : Induktansi kawat arrester (0,4 mikro-henry pert kaki)

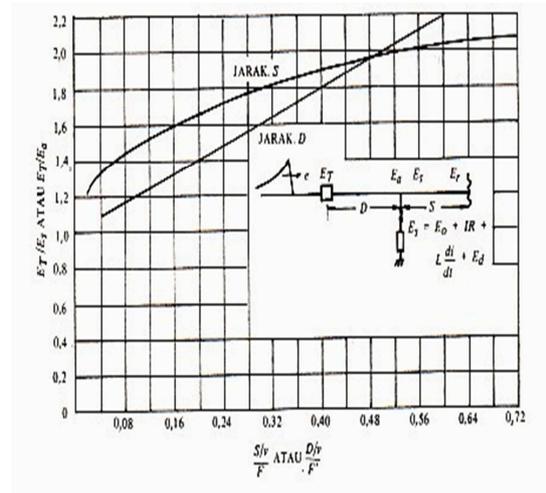
$$\frac{di}{dt} = 2 \frac{de/dt}{Z}$$

$$F' = \frac{E_a}{\frac{de}{dt}}, \text{dimana}$$

$$E_a = E_s - E_d$$

$$= E_0 + IR + L \frac{di}{dt}$$

$$E_T = E_r - E_d$$



Gambar 5. Tegangan maksimum peralatan yang dilindungi dinyatakan sebagai perbandingan terhadap tegangan arrester. (Menurut Clayton-Powell)

Tabel 1. Karakteristik perlindungan arrester jenis gardu induk dan jenis saluran, serta tegangan pelepasan maksimum untuk gelombang arus pelepasan 10 x 20 μdet

Penge- nal te- gan- an ar- res- ter (pun- cak)	Tegangan impuls maksimum kV (puncak)	kV (puncak)										
		3.000 amper		5.000 amper		10.000 amper		E_0 (kV)		R (ohm)		
ar- res- ter kV (pun- cak)	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I		
97	310	310	242	278	258	296	280	328	36	264	4,4	6,4
109	360		264		282		306		258		4,8	
121	390	390	301		320	375	350	415	290	335	6	8
133	430		328		350		380		320		6	
145	460		350		375		408		342		6,6	
169	540		423		450		490		410		8	
182	585		440		470		510		430		8	
195	610		470		500		545		455		9	
285	830		645		685		745		625		12	
276	900		685		730		795		665		13	

S = Arrester jenis gardu induk (station type arrester)
I = Arrester jenis saluran (intermediate type arrester)

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian mengambil lokasi di Gardu Induk 150 kV Pandean Lamper yang

beralamat di JL. Unta Raya komp. PLN 2 Semarang Timur, Jawa Tengah. Dari adanya gangguan surja petir pada gardu induk 150 kV Pandean Lamper, memperoleh kesimpulan untuk menghitung dan menganalisa jarak aman antara arrester dengan transformator sebagai dasar pengukuran untuk melindungi transformator daya pada gardu induk.



Gambar 6. Lokasi Gardu Induk 150 kV Pandean Lamper

Alat dan bahan penelitian antara lain:

1. Data spesifikasi arrester tipe exlim P
2. Data spesifikasi arrester tipe 2 MBA 4
3. Data Transformator daya
4. Meteran
5. Program Matlab versi 9.00

Variabel Data

Variabel data yang diukur dalam penelitian untuk arrester tipe 2 MBA 4 :

- a.) Harga puncak tegangan surja yang masuk ke gardu (e)
- b.) Impedansi transmisi (Z)

- c.) Induktansi kawat arrester (L)
- d.) Laju kenaikan maksimum arrester

$$\left(\frac{di}{dt}\right)$$

- e.) Tegangan peluahan arrester (E_a)
- f.) Tegangan pada jepitan transformator (E_p)

Variabel data yang diukur dalam penelitian untuk arrester tipe exlim P :

- a.) Tingkat isolasi dari isolator (x)
- b.) Harga puncak tegangan surja yang masuk ke gardu (e)

- c.) Induktansi kawat arrester (L)
- d.) Laju kenaikan maksimum arrester

$$\left(\frac{di}{dt}\right)$$

- e.) Tegangan peluahan arrester (E_a)
- f.) Tegangan pada jepitan transformator (E_p)

Tahapan Penelitian

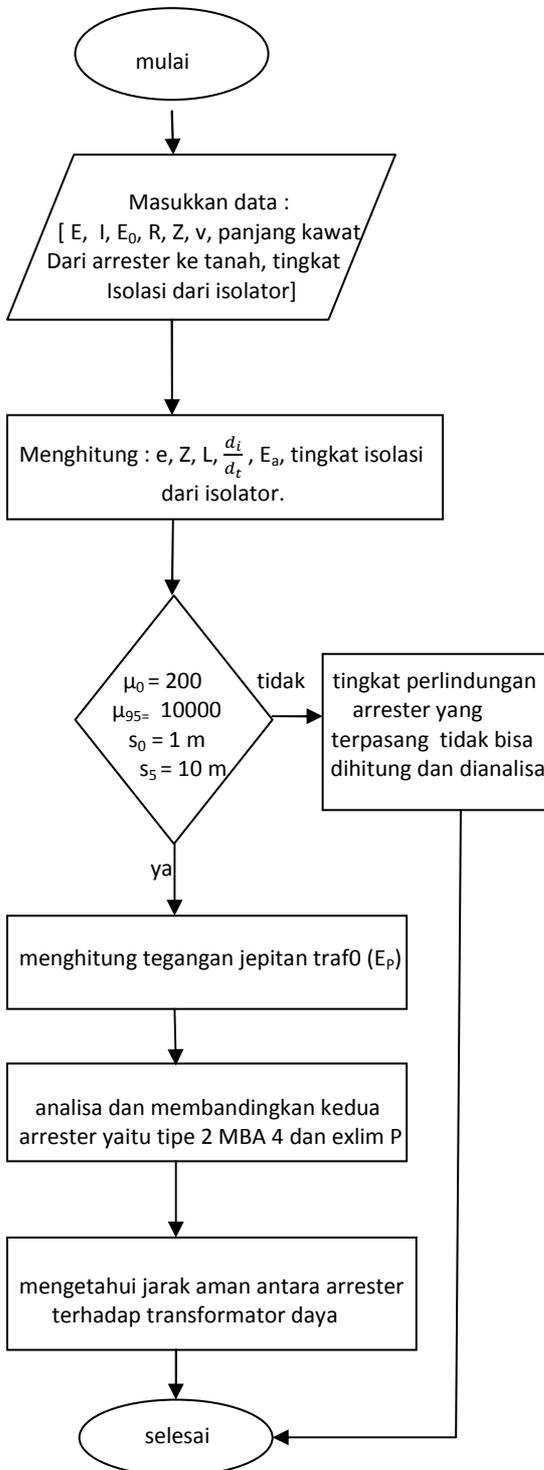
Untuk menyelesaikan penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Studi literatur tentang gangguan surja petir pada gardu induk 150 kV, perlindungan arrester yang terpasang pada gardu induk 150 kV terhadap transformator.
2. Pengambilan data-data arrester dan transformator daya guna untuk menghitung parameter-parameter yang ada.
3. Perhitungan tegangan pada jepitan transformator menggunakan batuan program software matlab yang mana

untuk tingkat kecuraman gelombang dan jarak dibuat variabel.

4. Penarikan Kesimpulan.

Jalan Penelitian



Gambar 7. Jalan penelitian

Hasil Dan Pembahasan

Perhitungan Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator

Evaluasi perlindungan gardu induk 150 kV Pandean Lamper dapat ditinjau dengan mengevaluasi jarak maksimum arrester dengan transformator melalui perbandingan jarak yang terpasang di lapangan dan jarak dengan menganalisa hubungan antara tingkat kecuraman muka gelombang terhadap tegangan pada jepitan transformator.

Menurut hasil pengamatan, jarak terpasang antara arrester dengan transformator adalah 6 meter dan jarak arrester ke tanah adalah 3 meter. Adapun hasil analisa jarak maksimum arrester dengan transformator berdasarkan parameter-parameter yang diperoleh dari data-data peralatan di gardu induk Pandean Lamper menggunakan perhitungan adalah sebagai berikut.

Metode Perhitungan Untuk arrester tipe 2 MBA 4

- a. Arus maksimum arrester (I) = 10 kA
- b. Tegangan arrester pada arus nol (E₀) = 290 kV
- c. Tahanan arrester (R) = 6 Ω
- d. Panjang kawat dari arrester ke tanah = 3 meter
- e. Tingkat isolasi dari isolator 950 kV
- f. Kecepatan rambat surja (v) = 300 m/μs

Sedangkan untuk tingkat kecuraman gelombang dan jarak dibuat variabel.
Metode Perhitungan Untuk arrester tipe 2 MBA 4

- Arus maksimum arrester (I) = 10 kA
- Tegangan arrester pada arus nol (E_0) = 342 kV
- Tahanan arrester (R) = 6,6 Ω
- Panjang kawat dari arrester ke tanah = 3 meter
- Impedansi transmisi 735 Ω
- Kecepatan rambat surja (v) = 300 m/ μ s.

Perhitungan Tegangan Jepitan Trafo Untuk Jarak 6 Meter

Untuk jarak (S) = 6 m dan $\frac{de}{dt} =$ variabel antara 200 hingga 10000 kV/ μ s (diambil 3 perhitungan sebagai contoh) pada arrester tipe 2 MBA 4, maka tegangan pada jepitan transformator adalah :

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 200, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 474,36 + 2 \cdot 200 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 482,36 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 500, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 474,36 + 2 \cdot 500 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 494,36 \text{ kV} \end{aligned}$$

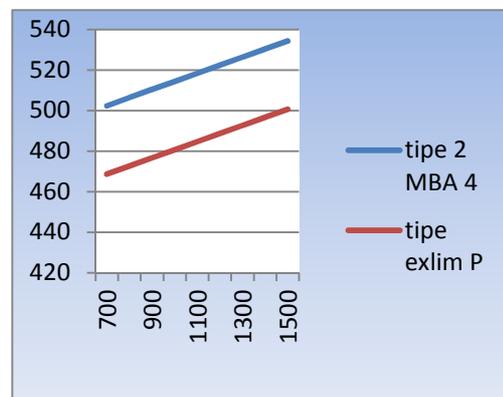
$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 1000, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 474,36 + 2 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 514,36 \text{ kV} \end{aligned}$$

Untuk jarak (S) = 6 m dan $\frac{de}{dt} =$ variabel antara 200 hingga 10000 kV/ μ s (diambil 3 perhitungan sebagai contoh) pada arrester tipe Exlim P, maka tegangan pada jepitan transformator adalah

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 200, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 440,65 + 2 \cdot 200 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 448,65 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 500, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 440,65 + 2 \cdot 500 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 460,65 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = 1000, \text{ maka } E_p &= E_a + 2 \cdot \frac{de}{dt} \cdot \left(\frac{S}{v}\right) \\ &= 440,65 + 2 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{6}{300}\right) \\ &= 480,65 \text{ kV} \end{aligned}$$

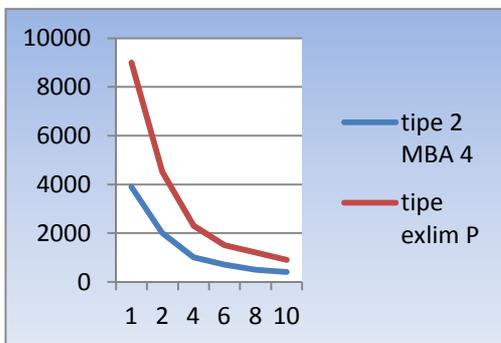


Gambar 8. Hubungan antara tegangan jepitan trafo dengan kecuraman muka gelombang surja untuk jarak 6 meter

Tabel 2. Perhitungan antara fungsi kecuraman muka gelombang surja dengan jarak keseluruhan (1, 2, 4, 6, 8, 10 meter)

Jarak (m)	$\frac{d_e}{d_t} 1$ (kV/ μ s)	$\frac{d_e}{d_t} 2$ (kV/ μ s)
1	3900	9000
2	2000	4500
4	1000	2300
6	700	1500
8	500	1200
10	400	900

Ket : $\frac{d_e}{d_t} 1$ = kecuraman muka gelombang surja tipe 2 MBA 4
 $\frac{d_e}{d_t} 2$ = kecuraman muka gelombang surja untuk tipe exlim P
 Untuk teganga pada jepitan trafo kedua arrester = 500 kV.



Gambar 9. Hubungan antara kecuraman muka gelombang surja dengan jarak keseluruhan

Tabel 3. perhitungan antara fungsi tegangan pada jepitan trafo dengan jarak keseluruhan (1, 2, 4, 6, 8, 10 meter)

Jarak (m)	E_p1 (kV)	E_p2 (kV)
1	500.352	500.648
2	501.019	500.648
4	501.019	501.981
6	502.352	500.648
8	501.019	504.648
10	501.019	500.648

Ket : $E_p 1$ = Tegangan jepit trafo untuk arrester tipe 2 MBA 4
 $E_p 2$ = Tegangan jepit trafo untuk arrester tipe exlim P
 Untuk kecuraman muka

gelombang surja dibuat variabel 200-10000(kV/ μ s).

Dari hasil perhitungan tegangan jepitan pada transformator berdasarkan jarak dan tingkat kecuraman muka gelombang, diperoleh hasil bahwa jarak antara arrester terhadap transformator sepanjang 6 meter pada Gardu Induk Pandean Lamper 150 kV, kurang maksimal untuk melindungi transformator dari sambaran surja petir. Hal tersebut dapat dilihat dari hasil perhitungan untuk jarak = 6 meter pada arrester tipe 2 MBA 4 dan tegangan pada jepitan transformator = 500 kV, kecuraman muka gelombang yang mampu ditahan oleh arrester adalah 700 kV/ μ s, pada arrester tipe exlim P dan tegangan pada jepitan transformator = 500 kV, kecuraman muka gelombang

yang mampu ditahan oleh arrester adalah $1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Bahkan untuk jarak 1 meter pada arrester tipe 2 MBA 4 dan tegangan pada jepitan transformator = 500 kV, kecuraman muka gelombang yang mampu ditahan oleh arrester adalah $3900 \text{ kV}/\mu\text{s}$, pada arrester tipe exlim P dan tegangan pada jepitan transformator = 500 kV, kecuraman muka gelombang yang mampu ditahan adalah $9000 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Pada jarak 1 meter untuk arrester tipe 2 MBA 4 apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $3900 \text{ kV}/\mu\text{s}$ transformator daya yang terpasang akan kebakaran atau meledak, sedangkan untuk arrester tipe exlim P apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $9000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ transformator daya yang terpasang akan kebakaran atau meledak.

Pada jarak 6 meter untuk arrester tipe 2 MBA 4 apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $700 \text{ kV}/\mu\text{s}$ transformator daya yang terpasang akan kebakaran atau meledak, sedangkan untuk arrester tipe exlim P apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ transformator daya yang terpasang akan kebakaran atau meledak. Dapat dilihat dari perhitungan diatas dengan jarak yang berbeda-beda dan tegangan pada jepitan transformator yang sama, arrester tipe exlim P ternyata lebih baik kualitasnya daripada arrester tipe 2 MBA 4 karena

arrester tipe exlim P mampu menahan kecuraman muka lebih besar daripada arrester tipe 2 MBA 4. Karena semakin besar arrester mampu menahan kecuraman muka gelombang maka semakin baik pula peralatan pada gardu induk terlindungi. Dapat dilihat juga dari perhitungan diatas membuktikan secara teori menyebutkan bahwa semakin dekat jarak arrester terhadap peralatan listrik, semakin baik arrester tersebut melindungi peralatan listrik dalam hal ini adalah transformator daya, dengan jarak tertentu.

Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengamatan yang ada di gardu induk 150 kV Pandean Lamper, jarak terpasang antara arrester dan transformator adalah 6 m dengan tegangan jepitan pada trafo 500 kV kurang maksimal untuk melindungi peralatan listrik, untuk arrester tipe 2 MBA 4 mampu menahan kecuraman muka gelombang surja sebesar $700 \text{ kV}/\mu\text{s}$, untuk arrester tipe exlim P sebesar $1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Untuk arrester tipe 2 MBA 4 apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $700 \text{ kV}/\mu\text{s}$ transformator daya yang terpasang akan kebakaran atau meledak, untuk arrester tipe exlim P transformator daya akan kebakaran atau meledak apabila kecuraman muka gelombang surja melebihi $1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

2. Jarak aman untuk gardu induk 150 kV Pandean Lamper adalah 1 m dengan tegangan jepitan trafo 500 kV. Untuk arrester tipe 2 MBA 4 mampu menahan kecuraman muka gelombang surja sebesar 3900 kV/ μ s, untuk arrester tipe exlim P sebesar 9000 kV/ μ s.
3. Kualitas arrester tipe exlim P lebih baik daripada arrester tipe 2 MBA 4 karena arrester dengan tipe exlim P mampu menahan kecuraman muka gelombang surja lebih besar daripada arrester dengan tipe 2 MBA 4.

Daftar Pustaka

- Azhari, *Perlindungan Gardu Induk 150 kV Pedan Terhadap Gangguan Surja Petir*, Jurusan Teknik Elektro-Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, 2009.
- Bonggas L. Tobing, 2003, "Peralatan Tegangan Tinggi" Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Dian Saefulloh, *Perencanaan Pengembangan Gardu Induk Untuk 10 Tahun Ke Depan*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik-Universitas Diponegoro, 2004.
- Dasman, Rudy Harman, *Pengaruh Tahanan Kaki Menara Saluran Transmisi 150 kV Terhadap Tegangan Lebih Transient Akibat Surja Petir Dengan Menggunakan Elektromagnetic Transients Program (EMTP) (GI Kilirianjao – GI Muaro Bungo)*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Padang, 2008.
- Yusreni Warmi, *Evaluasi Koordinasi Pada Gardu Induk 150 kV Umbilin – Kiliran Jao Akibat Sambaran Petir Pada Saluran Transmisi*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Padang, 2011.
- Dwi Harjanto, *Optimasi Penempatan Arrester Terhadap Tegangan Lebih Transien Pada Transformator Daya Menggunakan PSO (Particle Swarm Optimization)*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik-Universitas Diponegoro, 2010.
- Hutauruk, T.S, 1989, "Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja" Erlangga, Jakarta.
- Taufiq Alif Kurniawan, Achmad Bambang Sumadiyana, *Sistem Proteksi Petir Internal dan Ekternal*, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- Zoro R dan Mefiarhdi R., 2002. *Evaluasi Gangguan Akibat Sambaran Petir Pada Jaringan Dan Gardu Induk Menggunakan Data Petir*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Bandung.