

Analisa *Rating Lightning Arrester* Pada Jaringan Transmisi 70 kV Tomohon-Teling

M. S. Paraisu, F. Lisi, L. S. Patras, S. Silimang

Jurusan Teknik Elektro-FT. UNSRAT, Manado-95115, Email: hiroz5431@gmail.com

Abstrak— Penyaluran energi listrik pada jaringan transmisi 70 kV yang menghubungkan antara GI Tomohon dan GI Teling perlu diperhatikan, karena pada daerah ini sering terjadi gangguan akibat sambaran petir. Dimana berdasarkan hasil analisa pada tahun 2011, jumlah sambaran petir pada jaringan transmisi ini kurang lebih sebanyak 89 kali sambaran dan salah satu sambarannya mengakibatkan terjadinya *black out* pada Sistem Minahasa. Oleh karena itu, diperlukan alat proteksi untuk melindungi jaringan transmisi ini.

Proteksi utama terhadap sambaran petir pada jaringan transmisi adalah *lightning arrester*. Dimana, untuk menentukan atau memilih arester yang handal untuk digunakan, perlu diperhatikan nilai pengenalan/*rating* dari arester tersebut apakah tepat untuk digunakan pada jaringan transmisi 70 kV Tomohon – Teling. Dari penelitian ini, hasil analisa dan perhitungan nilai pengenalan/*rating* dari arester yang akan digunakan pada jaringan transmisi ini adalah sebagai berikut: tegangan pengenalan arester(U_C) = 57,94 kV, tegangan kerja arester(U_A) = 208,79 kV, arus kerja arester(I_A) = 2,99 kA, dan faktor perlindungan(FP) = 29%.

Kata Kunci: Jaringan Transmisi, Lightning Arrester, Nilai -pengenal, Petir, Proteksi

I. PENDAHULUAN

Didalam penyaluran energi listrik pada jaringan transmisi dan distribusi tidak lepas dari adanya gangguan yang dapat mengganggu proses penyaluran energi listrik, baik itu gangguan dari dalam atau gangguan dari luar. Untuk itu diperlukan alat-alat proteksi untuk memproteksinya. Salah satu gangguan dari luar yang menyebabkan kegagalan pada peralatan di jaringan transmisi yaitu sambaran petir.

Peralatan yang biasa digunakan untuk memproteksi gangguan akibat sambaran petir di sebut *Lightning Arrester*. Alat ini biasanya dipasang pada gardu-gardu induk dan juga di jaringan-jaringan transmisi. Yang berfungsi untuk melindungi peralatan-peralatan di gardu induk dan jaringan-jaringan transmisi dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir) dan pengaruh *follow current*.

Pada Sistem Minahasa terdapat beberapa daerah yang sering mengalami sambaran petir, salah satunya daerah antara Gardu Induk Tomohon dan Gardu induk Teling. GI Teling merupakan salah satu gardu induk di sistem Minahasa dengan sistem tegangan 70 kV, sedangkan GI Tomohon merupakan gardu induk yang memiliki 2 sistem tegangan yaitu sistem tegangan 70 kV dan sistem tegangan 150 kV serta berfungsi sebagai penghubung 2 sistem tegangan pada sistem Minahasa karena mempunyai trafo IBT (*Inter Bus Transformator*).

Karena jumlah sambaran petir yang tinggi pada daerah ini, mengakibatkan terjadinya sambaran pada jaringan transmisi sehingga membuat sistem Minahasa menjadi *collapse/Black Out*. Hal ini dikarenakan, tidak dipasangnya alat proteksi terhadap sambaran petir atau *Lightning Arrester* pada jaringan. Oleh karena itu, saya mengajukan judul tugas akhir “Analisa *Rating Lightning Arrester* di Jaringan Transmisi 70kV Tomohon – Teling”.

II. LANDASAN TEORI

A. Penangkapan Petir di Saluran Transmisi

Suatu saluran transmisi di atas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Lebar bayang-bayang listrik untuk suatu saluran transmisi telah ditentukan oleh Whitehead, yaitu:

$$W = (b + 4h^{1,09}) \text{ meter}^{[5]} \quad (1)$$

Dimana,

b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah, meter (bila kawat tanah hanya satu, $b=0$)

h = tinggi rata-rata kawat tanah di atas tanah, meter

h_t = tinggi kawat tanah pada menara, meter.

Sesuai pada gambar 1, dengan keadaan geometris lintasan, Whitehead⁶ membagi tiga jenis lintasan terhadap tinggi rata-rata kawat di atas tanah yaitu:

(a) Tanah Datar :

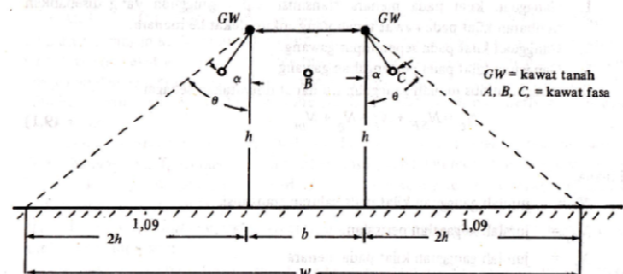
$$h = h_t - 2/3 \text{ andongan}$$

(b) Tanah Bergelombang :

$$h = h_t$$

(c) Tanah Bergunung-gunung

$$h = 2h_t$$



Gambar 1 Lebar jalur perisai terhadap sambaran kilat.^[5]

Jadi, untuk luas bayang-bayang untuk 100 km panjang saluran transmisi,

$$A = 100 \text{ (km)} \times (b + 4h^{1,09}) \times 10^{-3} \text{ (km)}^{[5]} \quad (2)$$

Atau,

$$A = 0,1 (b + 4h^{1,09}) \text{ km}^2 \text{ per 100 km saluran}^{[5]} \quad (3)$$

B. Jumlah Sambaran Petir ke Bumi

Dalam perencanaan pengaman terhadap sambaran petir, angka kepadatannya harus ditinjau dulu, untuk menentukan mutu pengaman yang akan dipasang. Hal tersebut dapat diketahui dengan mempergunakan peta hari guruh pertahun (*Iso Keraunic Level*). Kemudian cari harga korelasinya dengan kepadatan petir ditanah.

Semakin besar harga kepadatan sambaran petir pada suatu daerah, maka kegagalan perlindungan dari saluran transmisi atau gardu induk semakin besar. Banyak para penyelidik memberikan perhatian dengan memberikan rumus-rumus tersendiri. Untuk indonesia digunakan rumus sebagai berikut:

$$N = 0,15 IKL^{[5]} \quad (4)$$

Dimana,

- N = Jumlah sambaran per km^2 per tahun
- IKL = Jumlah hari guruh per tahun

Untuk jumlah sambaran pada saluran transmisi sepanjang 100 km adalah,

$$N_L = N \times A^{[5]} \quad (5)$$

Atau

$$N_L = 0,015 IKL (b + 4h^{1,09}) \text{ sambaran per 100 km per tahun} \quad (6)$$

C. Kecepatan Rambat Gelombang

Suatu gelombang yang merambat dengan konstanta L dan C di sepanjang kawat, membuat gelombang tegangan dan arus merambat dengan dengan kecepatan yang sama. Selain itu, kecepatan rambat dari gelombang tersebut juga dipengaruhi oleh suatu faktor proporsional, yaitu karakteristik dari kawat yang dilalui. Maka didapat kecepatan rambat gelombang untuk kawat udara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} v &= 1/\sqrt{LC} = \frac{18 \ln 2h/r \cdot 10^{11}}{2 \ln 2h/r \cdot 10^{-9}} \\ &= 3 \times 10^{10} \text{ cm/detik} \\ &= 300 \text{ m}/\mu\text{det} \end{aligned} \quad (7)$$

Dimana, r merupakan jari-jari kawat dan h adalah tinggi kawat diatas tanah.

Dari persamaan diatas didapat nilai kecepatan rambat gelombang (v) pada kawat udara ada sebesar 300 m/ μ det.

D. Impedansi Surja

Impedansi surja merupakan nilai impedansi yang didapat pada saat terjadi surja baik itu merupakan surja petir ataupun surja hubung. Impedansi surja juga dipengaruhi oleh konstanta L dan C yang merambat pada kawat penghantar, dimana kedua konstanta itu juga dipengaruhi oleh karakteristik dari kawat itu juga.

Impedansi surja untuk kawat udara adalah sebagai berikut:

$$z = \sqrt{L/C} = 60 \ln 2h/r \text{ } (\Omega)^{[5]} \quad (8)$$

Dimana, r merupakan jari-jari kawat dan h adalah tinggi kawat diatas tanah.

E. Tegangan Tembus Isolator Udara

Besaran tegangan yang timbul pada isolator transmisi tergantung pada kedua parameter petir, yaitu puncak dan kecuraman muka gelombang petir. Tidak semua sambaran petir dapat mengakibatkan lompatan api (*flashover*) pada isolator karena juga bergantung dari besar tegangan yang timbul dan tidak melebihi tegangan tembus pada isolator ($U_{50\%}$).

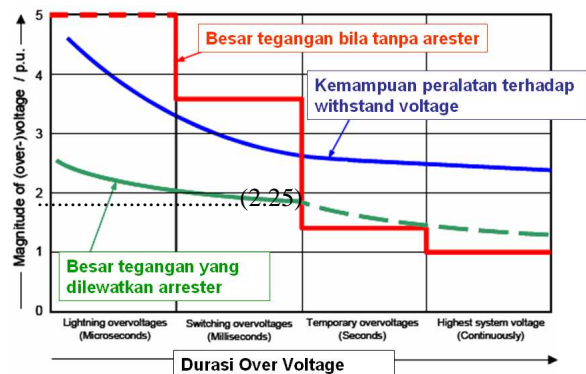
$$U_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t} \right) \times 10^3 \text{ kV}^{[5]} \quad (9)$$

Dimana,

- $U_{50\%}$ = tegangan tembus isolator, kV
- K_1 = 0,4 W
- K_2 = 0,71 W
- W = panjang rentengan isolator, meter
- t = waktu tembus atau waktu lompatan api pada isolator, μ det

F. Lightning Arrester

Lightning Arrester merupakan peralatan yang didesain untuk melindungi peralatan lain yang ada didalam sistem tenaga listrik dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir) dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ketanah serta harus dapat melakukan surja arus ke tanah tanpa mengalami kerusakan.



Gambar 2 Skematik diagram level tegangan yang mungkin timbul pada peralatan gardu induk, menggunakan LA ataupun tidak.^[2]

G. Pengenal Arester

Pada umumnya pengenal atau “rating” arester hanya pengenal tegangan. Pada beberapa jenis arester perlu juga disebut pengenal arusnya yang menentukan kapasitas termal arester tersebut.

Supaya pemakaian arester lebih efektif dan ekonomis, perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi yaitu :

1. Perkiraan Besarnya Tegangan Nominal/ Pengenal Arestor (U_C) (*Nominal Voltage Arestor*)

Rating dari arester biasanya dinyatakan dalam dalam frekuensi dan nilai tegangan dalam kV. Dimana tegangannya adalah tegangan nominal atau tegangan pengenal (U_C) yang juga merupakan tegangan disaat penangkap petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Penangkap petir tidak dapat bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif.

Tegangan pengenal dari suatu penangkap petir (*rating arester*) adalah :

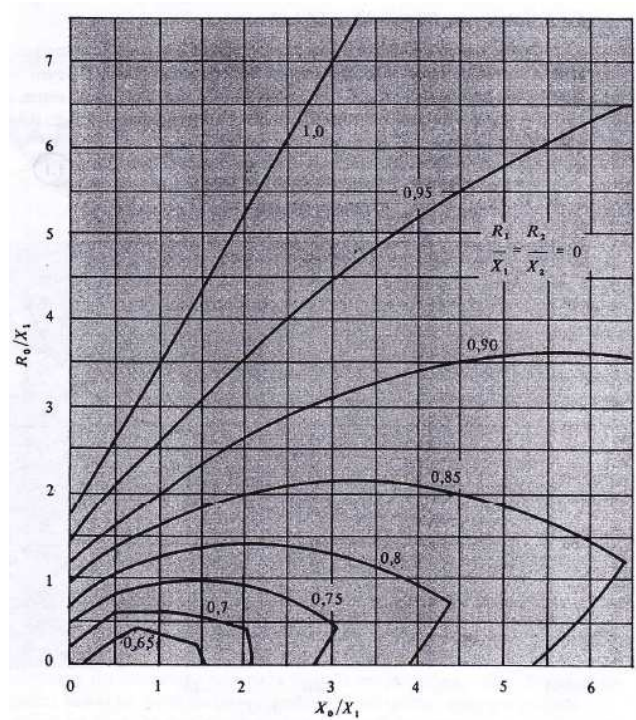
$$\begin{aligned}
 U_C &= \text{Tegangan rms fasa ke fasa tertinggi} \times \text{koefisien pentanahan} \\
 &= \text{Tegangan rms fasa} \times 1,10 \times \text{koefisien Pentanahan}^{[3]}
 \end{aligned}$$

(10)

- Dimana :
- Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110% dari harga tegangan nominal sistem.
 - Koefisien pentanahan merupakan perbandingan antara tegangan rms fasa ke tanah dalam keadaan gangguan pada tempat dimana penangkap petir dipasang, dengan tegangan rms fasa ke fasa tertinggi dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan.

Pengaruh koefisien pentanahan terhadap tegangan maksimum yang mungkin timbul pada kawat dalam gangguan kawat ke tanah adalah sebagai berikut :

- ✓ Sistem yang tidak diketanahkan atau sistem terisolasi
 Pada sistem ini, tegangan yang mungkin timbul pada arester dapat lebih besar dari tegangan jala-jala. Arestor dengan tegangan ini dinamakan arester 100%.
- ✓ Sistem yang diketanahkan dengan impedansi.
 Pada sistem ini terbagi lagi atas 2 kelas yaitu diketanahkan efektif dan tidak efektif. Pengenal arester yang dipakai tergantung dari harga-harga R_0/X_1 dan X_0/X_1 di tempat arester.
 Umumnya arester dibagi dalam 3 macam angka pengenal tegangan: 100%, 80%, dan 75%. Untuk tegangan arester yang lebih rendah dari 75% harus ditambahkan 7,5% sebagai faktor keselamatan.



Gambar 3 lekung-lekung tegangan maksimum tanah untuk sistem yang diketanahkan dengan impedansi^[5]

2. Penentuan Arus Pelepasan Nominal (*Nominal Discharge Current*)

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arester sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya.

Berikut merupakan spesifikasi dari *Nominal Discharge Current*:

- Menurut standar Inggris/Eropa (IEC) $8\mu\text{det}/20\mu\text{det}$.
- Menurut standar Amerika $10\mu\text{s}/20\mu\text{s}$ dengan kelas PP 10 kA; 2.5 kA dan 1.5 kA.
 - a. Kelas arus 10 kA, untuk perlindungan gardu induk yang besar dengan frekuensi sambaran petir yang cukup tinggi dengan tegangan sistem diatas 70kV.
 - b. Kelas arus 5 kA, untuk tegangan sistem dibawah 70kV.
 - c. Kelas arus 2.5 kA, untuk gardu-gardu kecil dengan tegangan sistem dibawah 22 kV, dimana pemakaian kelas 5 kA tidak lagi ekonomis.
 - d. Kelas arus 1.5 kA, untuk melindungi trafo-trafo kecil.

Untuk arus pelepasan dalam peristiwa gelombang berjalan dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

[3]

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{Z} \quad (11)$$

Dimana: I_a = Arus Pelepasan Arrester [kA]
 U_d = Tegangan gelombang datang [kV]
 U_A = Tegangan kerja / Tegangan Sisa [kV]
 Z = Impedansi surja [Ω]

3. Tegangan Pelepasan/Tegangan Kerja (U_A) dari *Lightning Arrester*

Tegangan kerja atau tegangan pelepasan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir. Jika tegangan kerja penangkap petir ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka faktor keamanan yang cukup untuk perlindungan peralatan yang optimum dapat diperoleh.

Tegangan kerja tergantung pada :

- Arus pelepasan dari arrester
- Kecuraman gelombang arus (di/dt)

4. Faktor Perlindungan (*Protection Margin*)

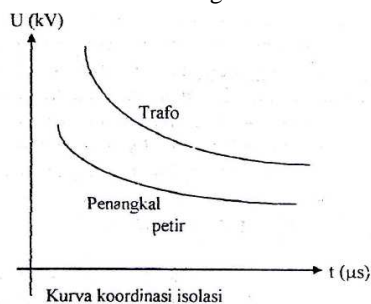
Faktor perlindungan adalah besar perbedaan tegangan antara BIL dari peralatan yang dilindungi dengan tegangan kerja dari arrester. Pada waktu menentukan tingkat perlindungan peralatan yang dilindungi oleh arrester umumnya diambil harga 10% diatas tegangan kerja dari arrester, tujuannya untuk mengatasi kenaikan tegangan pada kawat penghubung dan toleransi pabrik. Besar faktor perlindungan ini umumnya 20% dari BIL peralatan untuk arrester yang dipasang dekat peralatan yang dilindungi.

$$FP = BIL \text{ peralatan} - \text{Tingkat perlindungan arrester}^{[3]}$$

Dimana : Tingkat perlindungan arrester = $U_A + 10\%$
 (panjang kawat + toleransi pabrik)

H. Koordinasi Isolasi

Hubungan antara kemampuan isolasi peralatan-peralatan listrik dan sirkuit listrik di satu pihak dan alat-alat pelindung dilain pihak membuat isolasi dari peralatan terlindung dari bahaya-bahaya tegangan lebih hal ini disebut sebagai koordinasi isolasi dari sistem tenaga listrik.



Gambar 4 Kurva Koordinasi Isolasi^[3]

Koordinasi Isolasi yang baik akan menjamin kurva dari peralatan harus selalu berada diatas kurva alat pelindung (*Lightning Arrester / Penangkap Petir*) pada seluruh daerah pada kurva tersebut.

I. Jarak maksimum arrester dengan transformator yang dihubungkan dengan saluran udara.

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

Sebuah gelombang terpa yang berjalan menuju gardu akan dipotong amplitudonya oleh arrester hingga hanya mempunyai amplitudo sebesar tegangan kerja dari arrester itu sendiri. Dapat dilihat pada gambar 5.

Tegangan gelombang datang maksimum yang terjadi pada trafo setelah pantulan pertama adalah :

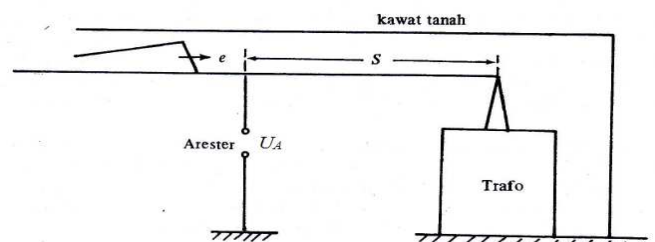
$$U_t = U_A + 2 \frac{du}{dt} \times \frac{S}{v} \quad [5] \quad (12)$$

- U_t = tegangan pada jepitan tranformator [kV]
- U_A = tegangan kerja arrester/penangkap petir [kV]
- du/dt = kecuraman dari gelombang datang [kV/ μ det]
- v = kecepatan rambat gelombang [di udara : 300 m/ μ det]
- S = jarak antara trafo ke penangkap petir [m]

III. METODE PENELITIAN

A. Prosedur Penelitan

- Mengumpulkan dan mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan analisa sistem tenaga listrik dan penentuan pengenalan/ rating arrester.
- Menentukan data-data atau parameter-parameter apa saja yang diperlukan dalam perbandingan dan perhitungan untuk penentuan pengenalan/ rating dari arrester.
- Mengumpulkan data melalui pengukuran langsung, mengumpulkan data langsung dari instansi terkait dan dokumentasi terhadap objek dari penelitian.
- Mengolah data dan mengevaluasi data-data yang telah diperoleh berdasarkan teori-teori yang ada.
- Melakukan penulisan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 5 arrester dan transformator terpisah jarak (S)^[5]

B. Data Teknis

Adapun data-data yang dikumpulkan didalam penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Data-data teknis peralatan seperti data teknis dari transformator yang ada di gardu induk Tomohon, gardu induk Teling, serta transformator pembangkit yang ada di PLTP Lahendong unit 4. Dapat dilihat pada tabel I.
2. Data teknis saluran transmisi, meliputi data panjang saluran, dan nilai impedansi dari saluran. Dapat dilihat pada tabel II.
3. Data Teknis Generator, meliputi data daya terpasang, tegangan, dan reaktansi. Dapat dilihat pada tabel III.
4. Data *Thunderstorm* atau hari guruh pada tahun 2011. Data ini diambil dari stasiun geofisika Manado. Dapat dilihat pada lampiran
5. Data untuk menentukan tegangan kerja (U_c) dari arester dan kecuraman dari gelombang datang (du/dt) dapat dilihat pada tabel IV berikut.
6. Jarak rentengan isolator yang ada pada jaringan transmisi 70 kV. Dimana digunakan isolator pin dengan jumlah piringan 6 buah
Berdasarkan pengukuran jarak rentengan isolator dengan jumlah piringan 6 buah adalah 88,6 cm.
7. Data besar jari-jari kawat penghantar, dimana kawat penghantar yang digunakan adalah jenis ACSR.
8. Data untuk menentukan Tingkat Isolasi Dasar (TID) / *Basic Insulation Level (BIL)* peralatan yang dilindungi. Didalam hal ini peralatan yang dilindungi adalah trafo. Dapat dilihat pada tabel V.

Tabel I. Data Teknis Transformator

No	Lokasi Transformator	Daya Terpasang (MVA)	Tegangan (kV)	Nilai Reaktansi (X) %	Hubungan Belitan
1.	PLTP Lahendong 4	25	11/150	12,5	ΔY_1
2.	GI. Tomohon IBT unit 1	60	150/70	12,93	$Y_1 Y_1$
3.	GI. Tomohon IBT unit 2	60	150/70	12	$Y_1 Y_1$
4.	GI. Tomohon Unit 1	10	70/20	7,39	$Y_1 Y_1$
5.	GI. Tomohon Unit 2	10	70/20	9,41	$Y_1 Y_1$
6.	GI. Teling Unit 1	20	70/20	12,2	$Y_1 Y_1$
7.	GI. Teling Unit 2	10	70/20	7,36	$Y_1 Y_1$
8.	GI. Teling Unit 3	20	70/20	11,77	$Y_1 Y_1$

Tabel II. Data Teknis Saluran Transmisi

No.	Lokasi	Panjang (km)	Impedansi Urutan Positif (Z_1) per km	Impedansi Urutan Nol (Z_0) per km
1.	PLTP Lahendong 4 – GI Tomohon	7,695	$0,118 + j0,41$	$0,342 + j1,231$
2.	GI Tomohon – GI Teling	17,00	$0,168 + j0,474$	$0,571 + j2,05$

Tabel III. Data Teknis Generator

Lokasi	Daya Terpasang (MW)	Tegangan (kV)	Nilai Reaktansi (X)	
			Positif	Nol
PLTP Lahendong 4	20	11	0,26	0,13

Tabel IV. *Maximum Impulse Sparkover Test Voltages*

Arrester rating	F.O.W	10 kA Light and Heavy-duty and 5 kA Series A #		5 kA, Series B #		2.5 kA		1.5 kA
		Std.** kV, peak	F.O.W.* kV, peak	Std.** kV, peak	F.O.W.* kV, peak	Std.* kV, peak	F.O.W.* kV, peak	F.O.W.* kV, peak
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.175	10	-	-	-	-	2.2	3.3	3.3
0.280	10	-	-	-	-	2.5	3.0	4.3
0.500	10	-	-	-	-	3.0	4.3	4.3
0.660	10	-	-	-	-	5.0	6.0	6.0
3	25	15	15	21	26	15	15	
4.5	37	17.5	20	-	36	17.5	20	
6	50	22.6	26	40	44	22.6	26	
7.5	62	27	31	-	52	27	31	
9	75	32.5	38	58	59	32.5	38	
10.5	87	38	44	-	-	38	44	
12	100	43	50	70	73	43	50	
15	125	54	62	80	83	54	62	
18	150	65	75	85	91	65	75	
21	175	76	88	###	106	76	88	
24	200	87	100	###	121	87	100	
27	225	97	112	###	133	97	112	
30	250	108	125	###	143	108	125	
33	275	119	137	###	###	119	137	
36	300	130	150	###	###	130	150	
39	325	141	162	###	###			
42	350	151	174					
51	425	184	212					
54	450	195	224					
60	500	216	250					
75	625	270	310					
84	700	302	347					
96	790	324	371					
102	830	343	394					
108	870	363	418					
120	940	400	463					
126	980	420	483					
138	1050	460	530					
150	1080	500	577					
174	1160	570	660					
186	1180	610	702					
198	1200	649	746					
To 225	1200	3.28U _R **	3.78U _R **					

Tabel V Penetapan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkap Petir

SPESIFIKASI	TEGANGAN NOMINAL SISTEM		
	150 kV	66 kV	20 kV
Tegangan Tertinggi untuk Peralatan	170 kV	72,5 kV	24 kV
Pentanahan Netral	Efektif	Tahanan	Tahanan
Transformator Tegangan pengenal (sisi tegangan tinggi)	150 kV	66 kV	20 kV
Tingkat Isolasi Dasar (TID)	650 kV	325 kV	125 kV
Penangkap petir Tegangan pengenalan	138 kV ¹⁾ 150 kV ¹⁾	75 kV ¹⁾	21 kV ¹⁾ 24 kV ¹⁾
Arus pelepasan nominal	10 kA	10 kA 5kA	5 kA ²⁾
Tegangan pelepasan	460 kV ¹⁾ 500 kV ¹⁾	270 kV ¹⁾	76 kV ¹⁾ 87 kV ¹⁾
Tegangan percikan denyut muka gelombang (MG)	530 kV 577 kV	310 kV	88 kV 100 kV
Tegangan percikan denyut Standar *)	460 kV 500 KV	270 kV	76 kV 87 kV
Kelas	10 kA tugas berat 10 kA tugas ringan	10 kA tugas ringan 5 kA seri A	5 kA Seri A

C. Urutan Analisa Data

Setelah mendapatkan data-data yang diperlukan, maka langkah selanjutnya adalah menganalisa data-data tersebut.

- Langkah pertama, melakukan analisa data untuk menentukan jumlah sambaran petir di bumi yang terjadi didaerah disekitar saluran transmisi GI Teling – GI Tomohon, dengan memperhatikan IKL (*Iso Keraunic Level*) dan pengaruh keadaan geografis dimana penempatan diletakan tiang transmisi.
- Melakukan analisa sistem sebagian dari sistem minahasa untuk mencari nilai impedansi urutan positif dan impedansi urutan nol dari rangkaian. Dimana untuk daerah yang dianalisa berada di sekitar GI Tomohon dan GI Teling, atau dari PLTP Lahendong 4 ke gardu induk Teling.
- Mencari nilai pengenalan dari arester dengan memperhatikan nilai impedansi urutan positif dan urutan nol dari analisa yang dilakukan.
- Menentukan jarak lindung arester terhadap peralatan yang akan dilindungi. Didalam hal ini peralatan yang dilindungi adalah transformatorPerhitungan termis dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu:

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam menentukan jumlah atau banyaknya sambaran petir yang terjadi disaluran transmisi 70 kV GI Tomohon – GI Teling, maka diperlukan beberapa data atau parameter-parameter yang digunakan untuk menghitungnya. Diantaranya adalah luas bayang-bayang listrik, dan jumlah hari guruh per tahun atau IKL (*Iso Keraunic Level*)

A. Luas Bayang-Bayang Listrik(A)

Untuk menentukan luas bayang-bayang listrik di saluran transmisi 70 kV GI Tomohon – GI Teling digunakan persamaan 2, namun untuk panjang saluran transmisi adalah 17 km sesuai panjang saluran transmisi Tomohon-Teling.

$$A = 0,017 (b + 4h^{1,09}) km^2 \text{ per } 17 \text{ km saluran}$$

Dimana : $b = 0$ (untuk satu kawat tanah)
 $h =$ tinggi rata-rata kawat tanah diatas tanah.
 Untuk keadaan geometris lintasan saluran transmisi GI Tomohon – GI Teling merupakan lintasan jenis tanah bergunung-gunung $h = 2h_t$. dimana $h_t = 28,5$ meter (sesuai lampiran).
 $h = 2h_t$
 $= 2(28,5)$
 $= 57$ meter.

Maka,

$$\begin{aligned} A &= 0,017 (0 + 4 \cdot 57^{1,09}) km^2 \text{ per } 17 \text{ km saluran} \\ &= 0,017 (4 \cdot 82,01) \\ &= 0,017 (328,06) \\ &= 5,57 km^2 \text{ per } 17 \text{ km saluran} \end{aligned}$$

B. Jumlah sambaran petir (N_L) pada saluran transmisi

Untuk menentukan jumlah sambaran petir (N_L) pada saluran transmisi 70 kV Tomohon-Teling diperlukan data *thunderstorm* atau hari guruh untuk mencari banyaknya jumlah hari guruh atau IKL (*Iso Keraunic Level*) pada daerah sekitar saluran transmisi ini. Berdasarkan data hari guruh pada tahun 2011 (sesuai lampiran) maka nilai IKL = 107.

Berdasarkan persamaan 5,

$$\begin{aligned} N_L &= N \times A \\ &= (0,15 \times 107)(5,57) \\ &= (16,05)(5,57) \\ &= 89,39 \text{ kali sambaran per } 17 \text{ km per tahun} \end{aligned}$$

C. Impedansi Surja (z)

Untuk kawat transmisi 70 kV pada saluran transmisi tomohon teling menggunakan kawat jenis ASCR. Dimana untuk diameter dari kawat tersebut adalah 17,1 mm

$$\begin{aligned} r \text{ (jari-jari kawat)} &= D(\text{diameter kawat}) / 2 \\ &= 17,1 / 2 = 8,55 \text{ mm} = 8,55 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 8,

$$z = \sqrt{L/C} = 60 \ln 2h/r (\Omega)$$

$$\begin{aligned} z &= 60 \ln 2(28,5) / 8,55 \times 10^{-3} \\ &= 60 \ln 57/8,55 \times 10^{-3} \\ &= 60 \ln 6666,667 \\ &= 60 \cdot 8,8 \\ &= 528 \Omega \end{aligned}$$

D. Tegangan Tembus Isolator Udara

Berdasarkan persamaan 9, maka tegangan tembus isolator dapat ditentukan. Namun diperlukan data-data untuk menentukannya, yaitu sebagai berikut:

Dimana,

W = panjang rentangan isolator untuk tegangan 70 kV
0,886 meter (lampiran)

$K_1 = 0,4 W = 0,4 \times 0,886 = 0,35$

$K_2 = 0,7 W = 0,7 \times 0,886 = 0,62$

t = tegangan yang dihitung berdasarkan waktu muka gelombang, 1,2 μ det

maka,

$$\begin{aligned}
 U_{50\%} &= \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \\
 &= \left(0,35 + \frac{0,62}{1,2^{0,75}} \right) \times 10^3 \\
 &= \left(0,35 + \frac{0,62}{1,14} \right) \times 10^3 \\
 &= (0,35 + 0,544) \times 10^3 \\
 &= 894 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

E. Penentuan Pengenal / Rating Arester

Seperti yang dijelaskan pada landasan teori, pengenal/ rating arester umumnya hanya pengenal tegangan, namun pada skripsi untuk pengenal/ rating dari arester dibahas 4 hal yang sangat diperlukan dalam menentukan arester yang ekonomis dan efektif yang akan digunakan pada saluran transmisi 70 kV antara GI Tomohon dan GI Teling.

1. Tegangan Pengenal Arester (U_C)

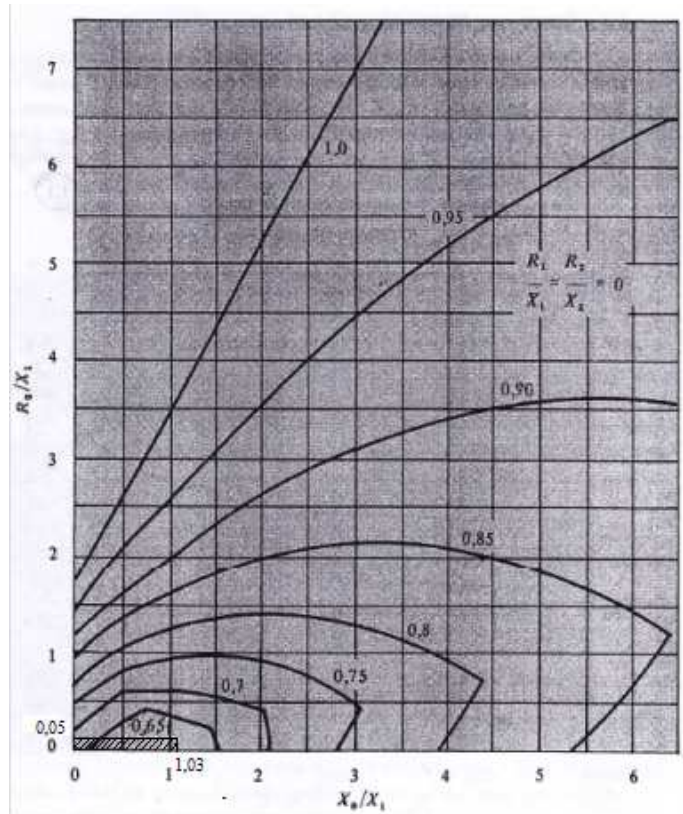
Didalam mencari nilai tegangan pengenal arester diperlukan beberapa parameter, diantaranya tegangan tertinggi sistem dan koefisien pentanahan. Dimana koefisien pentanahan sangat penting dalam menentukan kelas dari arester yang akan digunakan. Pada saluran transmisi 70 kV antara GI Tomohon dan GI Teling merupakan saluran yang diketanahkan dengan impedansi. Untuk itu diperlukan nilai R_0/X_1 dan X_0/X_1 untuk menentukan kelas dari arester yang akan digunakan.

Berdasarkan analisa sistem, didapatkan nilai impedansi urutan positif dan impedansi urutan nol sebagai berikut :

- Z_{eq} urutan positif = $0,008 + j0,155 \Omega$
- Z_{eq} urutan nol = $0,008 + j0,16 \Omega$

Dari data diatas maka kita dapat menentukan nilai dari R_0/X_1 dan X_0/X_1 yang sebentar akan digunakan dalam menentukan koefisien pentanahan.

$$R_0 / X_1 = \frac{0,008}{0,155} = 0,05 \quad ; \quad X_0 / X_1 = \frac{0,16}{0,155} = 1,03$$



Setelah diperoleh nilai R_0/X_1 dan X_0/X_1 , maka nilai koefisien pentanahannya sudah bisa ditentukan dan dapat ditentukan dengan menggunakan pendekatan lewat gambar 3.

Berdasarkan gambar diatas, maka dapat diperoleh nilai koefisien pentanahan atau kelas dari arester yang digunakan pada saluran transmisi tomohon-teling yaitu 70% atau 0,7. Maka untuk menentukan nilai pengenal dari arester digunakan persamaan 2.9.

$$\begin{aligned}
 U_C &= \text{Tegangan sistem} \times 1,1 \times \text{Koefisien pentanahan} \\
 &= 70 \times 1,1 \times 0,7 \\
 &= 53,9 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Karena kelas atau koefisien pentanahan arester dibawah 75%, maka perlu ditambahkan 7,5% untuk faktor keselamatan. Jadi pengenal arester adalah

$$\begin{aligned}
 U_C &= 53,9 \times 1,075 \\
 &= 57,94 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

2. Tegangan pelepasan/ tegangan kerja arester (U_A)

Berdasarkan tegangan pengenal (U_C) dari arester maka kita dapat menentukan tegangan pelepasan / tegangan kerja dari arester itu. Berdasarkan Tabel 3.4 dan lampiran nilai tegangan kerja dari arester adalah 208,79 kV.

3. Arus pelepasan/ arus kerja arester (I_A)

Dalam penentuan arus pelepasan/ arus kerja dari arester, maka diperlukan beberapa parameter yang digunakan diantaranya tegangan gelombang datang (U_d), tegangan pelepasan/ tegangan kerja (U_A) arester dan impedansi surja (z). Untuk tegangan gelombang datang diambil nilai tegangan tembus isolator ($U_{50\%}$), karena tegangan yang muncul dari tegangan tembus isolator akan sama dengan tegangan kawat penghantar sehingga tegangan dari kawat juga merupakan tegangan gelombang yang datang.

Dimana,

$$U_d = 894 \text{ kV (berdasarkan tegangan tembus isolator } U_{50\%} \text{)}$$

$$U_A = 208,79 \text{ kV}$$

$$z = 528 \Omega$$

maka,

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{z} \text{ kA}$$

$$= \frac{2(894) - 208,79}{528}$$

$$= \frac{1788 - 208,79}{528}$$

$$= \frac{1579,21}{528} = 2,99 \text{ kA}$$

Dari hasil perhitungan arus pelepasan (I_A) diatas, maka untuk pemilihan kelas arus pelepasan dari arester yang digunakan adalah kelas arus 10 kA dan 5 kA. Dimana, untuk arus 10 kA tugas ringan dan 5 kA seri A (berdasarkan Tabel 5).

4. Faktor perlindungan (*Protection Margin*)

Seperti yang telah dijelaskan pada landasan teori dimana, Faktor perlindungan adalah besar perbedaan tegangan antara BIL dari peralatan yang dilindungi dengan tegangan kerja dari arester, dan pada umumnya besar faktor perlindungan adalah 20% dan untuk faktor perlindungan yang baik tidak boleh kurang dari 20%.

FP = BIL peralatan – Tingkat perlindungan arester

Dimana,

- Tingkat perlindungan arester = $U_A + 10\%$ (panjang kawat + toleransi pabrik)
 - = $208,79 \times 1,1$
 - = $229,6 \text{ kV}$
- Tingkat Isolasi Dasar (TID) berdasarkan peralatan yang dilindungi yaitu transformator. Maka TID untuk transformator berdasarkan tabel 5 adalah 325 kV

Maka,

$$FP = 325 - 229,6$$

$$= 95,4$$

$$= 95,4/325$$

$$= 0,29 = 29 \%$$

Sehingga, pemilihan penangkap petir sudah memberikan faktor perlindungan (FP) yang baik.

Berdasarkan hasil perhitungan untuk pengenalan arester/ rating arester, maka didapatkan nilai-nilai pengenalan untuk arester yang akan digunakan pada jaringan transmisi 70 kV Tomohon – Teling dapat dilihat pada tabel VI

F. Jarak arester dan transformator yang dihubungkan dengan saluran udara

Perlindungan yang baik diperoleh bila arester ditempatkan sedekat mungkin pada jepitan transformator. Tetapi didalam praktek sering arester itu harus ditempatkan sejarak S dari transformator yang dilindungi. Untuk itu dalam menentukan jarak arester yang akan diletakkan untuk melindungi transformator, maka diperlukan parameter-parameter untuk menentukannya diantaranya tegangan kerja arester (U_A), tegangan pada jepitan transformator (U_t), kecuraman gelombang yang datang (du/dt), dan kecepatan merambat gelombang (v). Untuk mendapatkan nilai jarak yang tepat diletakkannya arester untuk melindungi transformator, maka digunakan persamaan 12..

Dimana,

- U_t = nilai tegangannya diambil dari TID transformator pada tabel V yaitu 325 kV .
- U_A = tegangan kerja arester yaitu $208,79 \text{ kV}$
- du/dt = $482,83 \text{ kV}/\mu\text{s}$ berdasarkan Tabel 4 dan pendekatan pada lampiran.
- v = kecepatan rambat gelombang [di udara : $300 \text{ m}/\mu\text{s}$]

maka,

$$S = \frac{U_t - U_A}{2 \cdot \frac{du}{dt}} \cdot v = \frac{325 - 208,79}{2(482,83)} \cdot 300$$

$$= \frac{116,21}{965,66} \cdot 300$$

$$= \frac{34863}{965,66}$$

$$= 36,10 \text{ m}$$

Tabel VI Hasil Perhitungan Untuk Pengenal/ Arestor pada jaringan transmisi 70 kV Tomohon - Teling

Arestor Jaringan Transmisi	Tegangan Sistem kV	Tegangan Pengenal (U_c), kV	Tegangan Kerja (U_A), kV	Arus Pelepasan (I_A), kA	Faktor Perlindungan (FP)%
Tomohon - Teling	70	57,94	208,79	2,99	29

Dari perhitungan, batas jarak maksimum arester untuk perlindungan transformator yang dihubungkan dengan saluran udara adalah 36,10 meter.'

[9] SPLN 41-7_1981, *Hantaran Aluminium Berpenguat Baja (ACSR)*.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan:

Berdasarkan dari hasil analisa dan pembahasan diperoleh kesimpulan adalah sebagai berikut :

1. Untuk jumlah sambaran petir (N_L) pada saluran transmisi 70 kV Tomohon - Teling pada tahun 2011 berdasarkan data *thunderstorm* atau hari guruh dan luas bayang-bayang listrik (A) didapatkan jumlah sambaran sebesar 89,39 kali atau 89 kali dalam setahun.
Dari jumlah sambaran petir pada saluran transmisi 70 kV Tomohon – Teling pada tahun 2011 sebesar 89 kali, jadi ada sekitar 89 hari atau 24,39% hari dalam tahun 2011 terjadi sambaran petir pada saluran transmisi ini.
2. Dari hasil perhitungan nilai pengenalan atau *rating* arester pada saluran transmisi tomohon – teling dengan tegangan system 70 kV , didapatkan nilai-nilainya adalah sebagai berikut :
 - Tegangan Pengenal(U_C) = 57,94 kV
 - Tegangan Kerja(U_A) = 208,79 kV
 - Arus Pelepasan(I_A) = 2,99 kA
 - Faktor Perlindungan(FP) = 29%
3. Hasil perhitungan untuk jarak maksimum arester dan transformator yang dihubungkan dengan saluran udara untuk saluran transmisi 70 kV Tomohon – Teling adalah 36,10 meter.

B. Saran

1. Dari hasil analisa dan pembahasan untuk nilai pengenalan atau *rating* arester pada saluran transmisi 70 kV Tomohon – Teling, kiranya dapat digunakan sebagai referensi untuk jenis arester yang digunakan.
2. Untuk pengembangan penelitian ini kiranya dapat diaplikasikan pada jaringan transmisi yang lain

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi., *Operasi Sistem Tenaga Listrik* , Balai Penerbit & HUMAS ISTN, Jakarta, 1990.
- [2] Anonimous., *Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan*, Perusahaan Listrik Negara, Jakarta, 1984.
- [3] Z. Reynaldo., *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, Penerbit ITB, Bandung.
- [4] Anonimous, *Diklat Teknik Tegangan Tinggi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [5] T.S. Hutaaruk., *Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja* , Penerbit Erlangga, Jakarta, 1991.
- [6] W, Stevenson., *Elements Of Power System Analysis Third Edition* – Terjemahan indonesia, Lembaga Penerbitan Universitas Brawijaya, Malang, 1982
- [7] T. Gonen., *Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*. California State University Sacramento: A Wiley-Interscience Publication, California, 1988.
- [8] SPLN 7_1978, *Pedoman Pemilihan Tingkat Isolasi Transformator Dan Penangkal Petir*.