

Pemodelan Perlindungan Gardu Induk dari Sambaran Petir Langsung di PT. PLN (Persero) Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan

Nina Dahliana Nur, I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, dan R. Wahyudi
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: dahliana_nina@yahoo.com, didit@ee.its.ac.id, wahyudi@ee.its.ac.id

Abstrak—Sambaran petir bisa menyebabkan kegagalan perlindungan pada gardu induk seperti terjadinya *flashover* dan kerusakan peralatan di gardu induk. Akibatnya adalah terjadinya gangguan pasokan listrik dan kerugian ekonomi cukup besar. Oleh karena itu diperlukan sistem proteksi sambaran petir untuk meminimalisir sambaran petir langsung ke peralatan dan bus di dalam gardu induk. Pada tugas akhir ini dibahas mengenai pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung menggunakan metode bola bergulir di Gardu Induk 150 kV Ngimbang Lamongan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan konfigurasi pemakaian kawat tanah setinggi 18 m dengan jarak pisah 14 m seperti yang sudah ada di GI 150 kV Ngimbang Lamongan telah aman dari sambaran petir langsung. Kemudian diberikan alternatif perlindungan lain yaitu dengan memasang *lightning mast* (tiang penangkal petir). *Lightning mast* yang dibutuhkan sebanyak 23 buah dengan tinggi 26 m.

Kata Kunci—Gardu Induk, Kawat Tanah, *Lightning Mast*, Metode Bola Bergulir, Petir .

I. PENDAHULUAN

Di zaman yang modern ini dengan semakin berkembangnya teknologi, kebutuhan akan tenaga listrik sangatlah penting. Oleh karena itu dibutuhkan sistem keandalan tenaga listrik, pelayanan, dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang maksimum. Pada penyaluran daya dari suatu sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh kemampuan gardu induk dalam menahan tegangan lebih yang berasal dari sambaran petir langsung yang datang ke gardu induk. Hal ini memungkinkan adanya gangguan sambaran petir yang besar pada gardu induk. Gangguan ini dapat menyebabkan tidak berfungsinya gardu induk untuk waktu yang lama. Oleh karena itu agar gardu induk dapat berfungsi seperti yang diharapkan, gangguan sambaran petir langsung ini perlu diproteksi.

Salah satu metode yang digunakan untuk memodelkan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung adalah metode bola bergulir dimana perlindungannya menggunakan kawat tanah dan tiang penangkal petir. Gardu induk yang dianalisis perlindungannya adalah Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan.

PENGARUH SAMBARAN PETIR PADA SISTEM TENAGA

Fenomena Petir

Fenomena petir merupakan peristiwa pelepasan muatan

listrik yang menyambar ke bumi dimana melibatkan arus yang sangat besar dan terjadi dalam waktu singkat dengan dampak yang sangat berbahaya. Petir dapat terjadi antara awan dengan awan, di dalam awan, dan antara awan dengan tanah.

Terjadinya petir adalah hasil dari terkumpulnya muatan pada awan. Awan terbentuk karena adanya ketidakstabilan atmosfer bumi. Muatan awan pada bagian atas bermuatan positif dan pada bagian bawah bermuatan negatif. Awan bagian bawah letaknya beberapa kilometer di atas tanah sehingga medan listrik tembus kritis dari udara pada awan bagian bawah lebih rendah daripada tanah. Ini menyebabkan untuk sambaran ke tanah atau objek yang lebih rendah pelepasan/peluahan selalu dimulai dari awan bagian bawah.

A. Parameter-parameter Petir

Parameter petir menunjukkan karakteristik atau penggambaran petir itu sendiri. Parameter petir berfungsi untuk studi efek perusakan akibat sambaran petir dan kemungkinan pemanfaatannya. Parameter-parameter tersebut diantaranya adalah :

a. Bentuk gelombang petir

Bentuk gelombang arus petir menggambarkan besarnya arus, kecuraman, dan lamanya kejadian atau durasi gelombang yang dinyatakan oleh waktu ekor.

b. Kerapatan sambaran (N_g)

Ground Flash Density atau kerapatan sambaran awan-tanah didefinisikan sebagai jumlah petir yang menyambar tanah per km² per tahun. Rata-rata angka kegagalan saluran tenaga karena sambaran petir berbanding lurus dengan kerapatan *ground flash*.

c. Arus puncak (I_{max})

Pelepasan listrik dimulai pada bagian bawah awan untuk sambaran ke tanah atau ke objek rendah. Menurut Golde, jarak sambaran tidak dipengaruhi oleh struktur bangunan vertikal dengan ketinggian yang rendah (≤ 20 m). Untuk bangunan yang tinggi, partikel positif dihasilkan di ujung bangunan seiring dengan *leader* yang termuati partikel negatif.

Kontribusi Golde yang terbesar terhadap jarak sambar adalah hipotesanya tentang jarak sambar r_s yang merupakan fungsi arus *return stroke*. Whitehead memformalkan hubungan tersebut dengan persamaan [7]:

$$r_s = 8(I_{max})^{0,65} \text{ (meter)} \quad (1)$$

dimana I_{max} = arus puncak return stroke (kA). Persamaan lain yang diberikan Whitehead :

$$r_s = 10(I_{max})^{0,65} \text{ (meter)} \quad (2)$$

Dua persamaan alternatif yang lain adalah :

$$r_c = 6,4(I_{max})^{0,75} \text{ (meter)} \quad (3)$$

$$r_c = 7,1(I_{max})^{0,75} \text{ (meter)} \quad (4)$$

dimana :

r_c = jarak sambar ke bumi, r_c = jarak sambar ke konduktor fasa d. Kecuraman gelombang atau *steepness* (di/dt).

Parameter ini menyatakan kecepatan kenaikan arus petir dalam setiap satuan waktu (di/dt). Semakin besar nilai arus dalam setiap satuan waktu, berarti semakin curam bentuk gelombang arusnya dan semakin pendek durasi muka gelombang.

B. Sambaran Langsung Pada Gardu Induk

Sambaran langsung pada gardu induk bisa menyebabkan kerusakan peralatan sehingga pelayanan daya dapat terhenti dalam waktu lama. Untuk menghindari hal tersebut maka gardu induk memerlukan :

- a. Kawat tanah atau tiang penangkal petir yang berfungsi untuk menarik petir atau menerima sambaran petir.
- b. Kawat penghantar atau bagian dari konstruksi dengan impedansi rendah yang berfungsi menyalurkan pelepasan muatan dari petir ke tanah.
- c. Tahanan tanah yang rendah.

C. Sistem Proteksi Petir

Berdasarkan cara kerjanya, sistem proteksi petir dapat dibagi menjadi dua yaitu sebagai berikut :

- a. Sistem dengan penangkap petir

Prinsip kerjanya adalah harus menyediakan titik pada ujung bangunan yang diamankan untuk sasaran sambaran petir, saluran untuk menyalurkan arus petir ke tanah, dan sistem pembumian untuk mendistribusikan arus petir yang masuk ke tanah dengan merata agar tidak menimbulkan kerusakan atau bahaya.

- b. Sistem Disipasi (*Dissipation Array System*)

Pada prinsipnya DAS tidak bertujuan untuk mengundang arus petir agar menyambar terminasi udara yang sudah disediakan melainkan membuyar arus petir agar tidak mengalir ke daerah yang dilindungi.

Berdasarkan tempatnya sistem proteksi petir dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu :

- a. Proteksi eksternal

Proteksi eksternal merupakan instalasi dan alat-alat di luar suatu struktur untuk menangkap dan menghantarkan arus surja petir ke pembumian. Sistem proteksi eksternal yang sering digunakan terdiri dari tiga bagian yaitu *Air Terminal*, *Down Conductor*, dan *Earthing System*.

- b. Proteksi Internal

Proteksi petir internal adalah perlindungan terhadap sistem elektronika di dalam bangunan/gedung akibat tegangan lebih yang ditimbulkan oleh induksi elektromagnetik akibat sambaran petir langsung.

II. PEMODELAN PERLINDUNGAN GARDU INDUK TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG

Perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung dapat dianalisa menggunakan metode bola bergulir. Tiang penangkal petir (*lightning mast*) dan kawat tanah digunakan untuk melindungi gardu induk dari sambaran petir langsung.

A. Perlindungan Dengan Satu Tiang Penangkal Petir

Gambar 1. Menampilkan metode bola bergulir menggunakan satu tiang penangkal petir untuk melindungi objek. Lingkaran tersebut adalah bola yang bergulir yang merupakan sambaran petir.

Untuk menentukan besarnya impedansi surja dari konduktor dengan korona (Z_s) terlebih dahulu harus dicari nilai radius korona dari konduktor.

$$R_c = \ln\left(\frac{2xh}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_0} \quad (5)$$

Dimana :

R_c = radius korona (meter)

h = tinggi rata-rata dari konduktor (meter)

V_c = BIL untuk post insulator (kV)

E_0 = Batas gradien korona, besarnya sama dengan 1500 kV/m

Dengan menggunakan iterasi Newton-Raphson, persamaan tersebut berubah menjadi :

$$R_c \cong 1,2 \times 10^{-4} V_c \quad (6)$$

Sehingga besarnya impedansi surja dari konduktor adalah :

$$Z_s = 60x \sqrt{\ln\left(\frac{2xh}{R_c}\right) \times \ln\left(\frac{2xh}{r}\right)} \quad (7)$$

Dimana r = radius dari konduktor (meter)

Dengan mengetahui nilai Z_s (impedansi surja) dalam satuan ohm dan I_s yaitu arus sambaran (kA) yang diijinkan dalam gardu induk dapat ditentukan besarnya jarak sambaran yang menjadi nilai dari radius bola (S).

$$I_s = 2,2 \times \frac{BIL}{Z_s} \quad (8)$$

$$S = 8kI^{0,65} \quad (9)$$

$$C = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (10)$$

$$T = S - C \quad (11)$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter.

S = radius bola

H = Tinggi Tiang penangkal petir

A = Tinggi bus

C = jarak horisontal dari titik asal bola ke bus

T = Jarak maksimum dari tiang penangkal petir ke bus untuk perlindungan

B. Jarak Maksimum Antara Dua Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum antara dua tiang penangkal petir adalah untuk melindungi gardu induk dari sambaran samping.

$$W = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (12)$$

$$Z = W - Y \quad (13)$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \quad (14)$$

$$X = 2L \quad (15)$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter

S = Radius bola

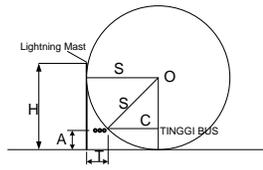
W = jarak horisontal dari titik asal bola ke bus

Z = Jarak horisontal antara OOS dan garis batas bola antara dua tiang penangkal petir

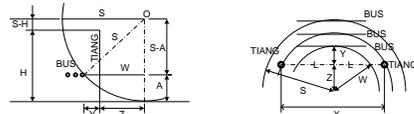
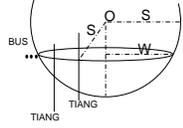
Y = jarak antara tiang penangkal petir ke bus

L = Setengah jarak antara dua tiang penangkal petir

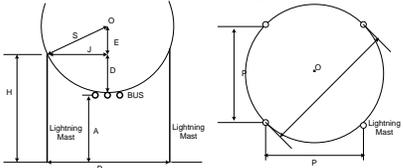
X = Jarak maksimum antara dua tiang penangkal petir



Gambar 1. Perlindungan Satu Tiang Penangkal Petir

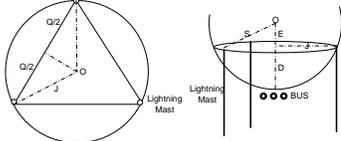


Gambar 2. Proteksi Dua Tiang Penangkal Petir



Gambar 3. Proteksi Empat Tiang Penangkal Petir

$$Q = 2 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{30}{180}\right) \cdot J \tag{21}$$



Gambar 4. Proteksi Tiga Tiang Penangkal Petir

Dimana :

Semua satuan dalam meter

Q = Jarak antara tiang penangkal petir ketika perlindungan dengan tiga tiang penangkal petir.

J = Jarak horisontal antara OOS dan tiang penangkal petir

C. Jarak Maksimum Untuk Empat Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir untuk melindungi gardu induk dari sambaran vertikal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$D = H - A \tag{16}$$

$$E = S - D \tag{17}$$

$$J = \sqrt{S^2 - E^2} \tag{18}$$

$$K = 2 \cdot J \tag{19}$$

$$P = \frac{K}{\sqrt{2}} \tag{20}$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter

D = Perbedaan elevasi antara tiang penangkal petir dan bus

E = Perbedaan elevasi antara tiang penangkal petir dan OOS

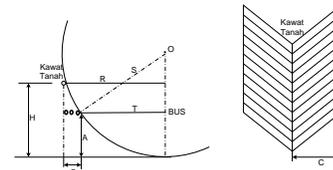
J = Jarak horisontal antara OOS dan tiang penangkal petir

K = Jarak diagonal antara tiang penangkal petir untuk empat tiang penangkal petir

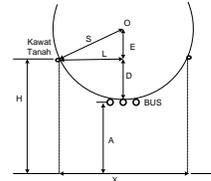
P = Jarak antara tiang penangkal petir untuk empat tiang penangkal petir

D. Jarak Maksimum Untuk Tiga Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum untuk tiga tiang penangkal petir adalah pada gambar 4.



Gambar 5. Proteksi Satu Kawat Tanah



Gambar 6. Proteksi Dua Kawat Tanah

E. Perlindungan Dengan Satu Kawat Tanah

Dengan mengetahui nilai Z_s dan I_s dapat ditentukan besarnya jarak sambaran yang menjadi nilai dari radius bola. Besarnya jarak pisah horisontal maksimum dari kawat tanah dan bus untuk perlindungan pada bus dengan tinggi A adalah :

$$R = \sqrt{S^2 - (S - H)^2} \tag{22}$$

$$T = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \tag{23}$$

$$C = R - T \tag{24}$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter

S = radius bola

H = Tinggi kawat tanah

A = Tinggi bus

R = Jarak horisontal antara OOS dan kawat tanah

T = Jarak horisontal antara OOS dan bus

C = Jarak horisontal antara kawat tanah dan bus

F. Jarak Maksimum Antara Dua Kawat Tanah

Perhitungan jarak maksimum antara dua kawat tanah sebagai perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung adalah sebagai berikut :

$$D = H - A \tag{25}$$

$$E = S - D \tag{26}$$

$$L = \sqrt{S^2 - E^2} \tag{27}$$

$$X = 2L \tag{28}$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter

D = Jarak elevasi antara kawat tanah dan bus

H = Tinggi kawat tanah

A = Tinggi bus

S = radius bola

E = Perbedaan elevasi antara kawat tanah dan OOS

L = Setengah dari jarak antara dua kawat tanah

X = jarak maksimum antara dua kawat tanah

III. ANALISA PEMODELAN PERLINDUNGAN GARDU INDUK TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG

A. Profil Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan

Gardu induk yang dianalisis terhadap sambaran petir langsung adalah gardu induk 150 kV Ngimbang Lamongan. Data-data yang diambil untuk menentukan perlindungan dari sambaran petir langsung dengan metode Bola bergulir adalah :

Tabel 1.
Data Profil Gardu Induk 150 kV Ngimbang Lamongan

Tegangan Nominal	150 kV
BIL Bus	650 kV
BIL peralatan	650 kV
Diameter konduktor fasa	32,9 mm
Tinggi konduktor fasa	13 m
Tinggi objek yang dilindungi	13 m
Tinggi Tiang Penangkal Petir	30 m
Tinggi Kawat Tanah	18 m

B. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Tiang Penangkal Petir

Untuk perlindungan menggunakan Tiang penangkal Petir :

- Menentukan nilai Radius korona dari konduktor
Dengan persamaan (6) dapat dihitung besarnya nilai radius korona dari konduktor.

$$R_c \cong 1,2 \times 10^{-4} V_c \tag{6}$$

$$R_c \cong 1,2 \times 10^{-4} \times 650$$

$$R_c \cong 0,078 \text{ meter}$$

- Menentukan impedansi surja dengan korona
Dengan tinggi konduktor (h) yang nilainya 13 m, radius dari konduktor (r) 0,01645 m, dan nilai Rc yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya adalah 0,078 meter maka besarnya Impedansi surja dari konduktor dengan korona dapat dihitung dengan persamaan (7)

$$Z_s = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{R_c}\right) \times \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \tag{7}$$

$$Z_s = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2 \times 13}{0,078}\right) \times \ln\left(\frac{2 \times 13}{0,01645}\right)}$$

$$Z_s = 393 \text{ ohm}$$

Jadi besar impedansi surja dari konduktor adalah 393 ohm.

- Menghitung arus sambaran kritis (Is) dimana BIL untuk gardu induk 150 kV = 650 kV dengan persamaan (8)

$$I_s = 2,2 \times \frac{BIL}{Z_s} \tag{8}$$

$$I_s = 2,2 \times \frac{650}{393} = 3,64 \text{ kA}$$

- Menghitung jarak sambaran (S) yang akan menjadi sphere radius dengan menggunakan persamaan (9)

$$S = 8kI^{0,65} \tag{9}$$

Dimana nilai k = 1,2 untuk tiang penangkal petir

$$S = 8 \times 1,2 \times 3,64^{0,65} = 22,23 \text{ m}$$

- Perlindungan dengan 1 tiang penangkal petir :

Dengan persamaan (9), (10), dan (11) dapat dihitung nilai T dimana T adalah jarak horisontal maksimum dari tiang ke sebuah objek yang dilindungi dengan tinggi A, dari sambaran petir langsung. Berdasarkan data didapat bahwa tinggi objek yang akan dilindungi adalah 13 m yang merupakan tinggi konduktor. Sebagai catatan ketika mendesain perlindungan terhadap sambaran petir langsung pada gardu induk direkomendasikan didasarkan pada parameter dari bus tertinggi.

$$H = 30 \text{ m.}$$

$$A = 13 \text{ m}$$

$$C = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \tag{10}$$

$$= \sqrt{22,23^2 - (22,23 - 13)^2}$$

$$= \sqrt{408,98} = 20,22 \text{ m}$$

$$C = S - T$$

$$T = S - C$$

$$(11)$$

$$= 22,23 - 20,22 = 2,01 \text{ m}$$

- Jarak maksimum antara dua tiang untuk sambaran samping

Untuk menentukan jarak maksimum antara dua tiang menggunakan persamaan (12), (13), (14), (15).

$$W = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \tag{12}$$

$$= \sqrt{22,23^2 - (22,23 - 13)^2}$$

$$= 20,22 \text{ m}$$

$$Y = 4 \text{ m}$$

$$Z = W - Y \tag{13}$$

$$Z = 20,22 - 4 = 16,22 \text{ m}$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \tag{14}$$

$$L = \sqrt{22,23^2 - 16,22^2}$$

$$L = 15,2 \text{ m}$$

$$X = 2L$$

$$(15)$$

$$X = 2 \times 15,2 = 30,4 \text{ m}$$

- Jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir:

Jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir dapat dihitung dengan persamaan (16), (17), (18), (19), dan (20) sebagai berikut :

$$D = H - A \tag{16}$$

$$D = 30 - 13 = 17 \text{ m}$$

$$E = S - D \tag{17}$$

$$E = 22,23 - 17 = 5,23 \text{ m}$$

$$J = \sqrt{S^2 - E^2} \tag{18}$$

$$J = \sqrt{22,23^2 - 5,23^2} = 21,6 \text{ m}$$

$$K = 2J \tag{19}$$

$$K = 2 \times 21,6 = 43,19 \text{ m}$$

$$P = \frac{K}{\sqrt{2}} \tag{20}$$

$$P = \frac{43,2}{\sqrt{2}} = 30,54 \text{ m}$$

- Jarak Maksimum antara tiga tiang penangkal petir

Jarak maksimum antara tiga tiang penangkal petir dapat dihitung dengan persamaan (21).

$$Q = 2 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{30}{180}\right) \cdot J \tag{21}$$

$$Q = 37,4 \text{ m}$$

Maka, berdasarkan data-data dari perhitungan sebelumnya pada gambar 7.



Jarak pisah untuk 2 tiang Jarak pisah untuk 3 tiang Jarak pisah untuk 4 tiang

Gambar 7. Jarak Pisah Maksimum Untuk 2,3, dan 4 Tiang Penangkal Petir

Tabel 2.
Jarak Pisah Maksimum Tiang Penangkal petir

Jarak	Jarak Pisah Maksimum Tiang Penangkal Petir
X	43,19 m
Y	37,4 m
Z	30,4 m

Tabel 3.
Jarak Pisah Maksimum Untuk Penggunaan Tiang Penangkal Petir dengan tinggi bus 13 m dan jarak sambaran 22,23 m

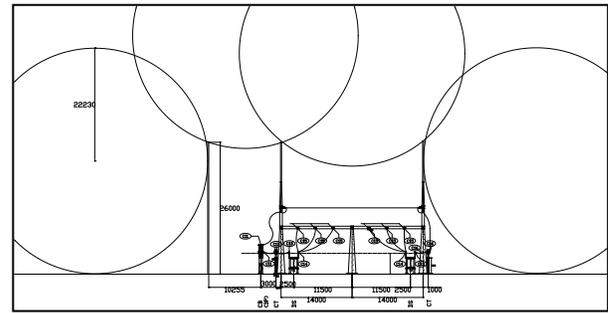
Tinggi Tiang (meter)	Empat Tiang (meter)				
	Satu Tiang (meter)	Dua Tiang (Z) (meter)	Tiga Tiang (Y) (meter)	Jarak antar Tiang	Jarak Diagonal (x)
19	1.77	30.40	26.31	21.48	30.38
20	1.89	30.40	28.05	22.90	32.39
21	1.97	30.40	29.58	24.15	34.16
22	2.01	30.40	30.94	25.26	35.73
23	2.01	30.40	32.15	26.25	37.13
24	2.01	30.40	33.23	27.13	38.37
25	2.01	30.40	34.18	27.91	39.47
26	2.01	30.40	35.03	28.60	40.45
27	2.01	30.40	35.77	29.20	41.30
28	2.01	30.40	36.41	29.73	42.04
29	2.01	30.40	36.96	30.18	42.68
30	2.01	30.40	37.42	30.56	43.21
31	2.01	30.40	37.80	30.86	43.65
32	2.01	30.40	38.09	31.10	43.99
33	2.01	30.40	38.31	31.28	44.24
34	2.01	30.40	38.44	31.39	44.39
35	2.01	30.40	38.50	31.44	44.46

Hasil perhitungan jarak pisah maksimum untuk tinggi bus 13 meter, jarak sambaran 22,23 meter, dan tinggi tiang penangkal petir 30 meter ditunjukkan pada tabel 2.

Untuk menentukan tinggi tiang penangkal petir yang optimum maka dilakukan perhitungan dengan mencoba menentukan jarak maksimum pada berbagai tinggi tiang penangkal petir.

Hasil perhitungan untuk jarak pisah maksimum untuk satu, dua, tiga dan empat tiang penangkal petir dari berbagai ketinggian tiang penangkal petir dengan Tinggi bus (A) = 13 m dan Jarak sambaran (S) = 22,23 meter ditunjukkan pada tabel 3.

Dengan daerah yang ingin dilindungi untuk tiap section maksimumnya adalah 28 m x 28 m maka berdasarkan tabel di atas, tinggi tiang yang optimum digunakan untuk jarak tersebut



Gambar 8. Perlindungan Gardu Induk Dengan Tiang Penangkal Petir

adalah 26 m.

Gambar di bawah ini menunjukkan salah satu lay out section yang dilindungi dengan tiang penangkal petir setinggi 26 m dengan S=22,23 m menggunakan metode bola bergulir.

C. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Kawat Tanah Untuk perlindungan menggunakan kawat tanah:

1) Menentukan nilai impedansi surja (Zs) dimana nilai ini dapat diambil dari perhitungan dengan persamaan (7) dengan Zs= 393 ohm

2) Menghitung arus sambaran kritis (Is) dimana BIL = 650 kV

Dengan persamaan (8) dapat dihitung arus sambaran kritisnya yang mana telah dihitung pada saat menentukan arus sambaran kritis dengan perlindungan tiang penangkal petir. Didapatkan

$$I_s = 3,64 \text{ kA}$$

3) Menghitung jarak sambaran (S) yang akan menjadi sphere radius.

Menghitung sphere radius menggunakan persamaan (9)

$$S = 8kI^{0,65}$$

Dimana nilai k = 1,0 untuk kawat tanah

$$S = 8 \times 1,0 \times 3,64^{0,65} = 18,53 \text{ m}$$

4) Jarak horisontal maksimum untuk satu kawat tanah Untuk menghitung jarak horisontal maksimum satu kawat tanah dengan menggunakan persamaan (22), (23), dan (24) seperti berikut :

H = Tinggi kuncup dari gardu induk adalah 18 m

A = 13 m

$$R = \sqrt{S^2 - (S - H)^2} \tag{22}$$

$$R = \sqrt{18,53^2 - (18,53 - 18)^2}$$

$$R = 18,52 \text{ m}$$

$$T = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \tag{23}$$

$$T = \sqrt{18,53^2 - (18,53 - 13)^2}$$

$$T = 17,69 \text{ m}$$

$$C = R - T \tag{24}$$

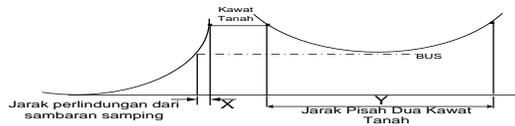
$$C = 18,52 - 17,69 = 0,83 \text{ m}$$

5) Jarak maksimum antara dua kawat tanah

Jarak maksimum antara dua kawat tanah dapat dihitung dengan persamaan (25), (26), (27), dan (28) seperti berikut :

$$D = H - A \tag{25}$$

$$D = 18 - 13 = 5 \text{ m}$$



Gambar 9. Jarak Perlindungan Dengan Satu Dan dua Kawat Tanah

Tabel 4.
Jarak Pisah Maksimum Kawat Tanah

Jarak	Jarak Pisah Maksimum Kawat Tanah
X	0,83 m
Y	26,34 m

$$E = S - D \tag{26}$$

$$E = 18,53 - 5 = 13,03 \text{ m}$$

$$L = \sqrt{S^2 - E^2} \tag{27}$$

$$L = \sqrt{18,53^2 - 13,03^2} = 13,17 \text{ m}$$

$$X = 2L \tag{28}$$

$$X = 2 \times 13,17 = 26,34 \text{ m}$$

Penempatan kawat tanah pada gardu induk terlihat bahwa :

Pada gardu induk dipasang kawat tanah setinggi 18 m dengan jarak pisah antara dua kawat tanah adalah 14 m. Jarak pisah maksimum untuk dua kawat tanah pada perhitungan adalah 26,34 m sehingga gardu induk terlindungi.

Dengan kondisi existing yang ada pada Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan dimana tinggi kawat tanah adalah 18 m dengan jarak pisah antara dua kawat tanah adalah 14 m maka gardu induk tersebut aman dari sambaran petir langsung apabila dilakukan analisa perlindungan dengan metode bola bergulir.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan perhitungan dan analisa pada bab sebelumnya, berdasarkan data-data yang didapat maka dapat disimpulkan :

1. Dari analisa yang dilakukan di GI 150 kV Ngimbang-Lamongan, perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung sudah aman. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung menggunakan metode bola bergulir dimana pada gardu induk tersebut dipasang kawat tanah setinggi 18 m sehingga jarak pisah maksimumnya adalah 26,34 m, untuk pemasangan kawat tanah dengan jarak pisah 14 m sudah aman dari sambaran petir langsung.
2. Diberikan alternatif lain untuk perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung yaitu dengan menggunakan tiang penangkal petir. Dengan memodelkan perlindungan gardu induk menggunakan metode bola bergulir, untuk Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan membutuhkan sebanyak 23 tiang penangkal petir dengan tinggi 26 m.
3. Untuk penggunaan satu tiang penangkal petir, semakin tinggi tiang untuk tinggi bus (A) yang sama dan jarak sambaran atau radius bola (S) yang sama maka jarak pisah antara tiang penangkal petir dengan bus semakin besar, tapi nilai jarak pisah akan tetap (tidak berubah) ketika tinggi

tiang sama dengan atau lebih besar dari jarak sambarannya atau sama dengan besarnya radius bola (S).

4. Tinggi tiang penangkal petir tidak berpengaruh pada jarak pisah maksimum antara dua tiang penangkal petir karena petir menyambar dari samping.
5. Semakin tinggi tiang penangkal petir, pada tinggi bus (A) yang sama dan jarak sambaran atau radius bola (S) yang sama maka jarak pisah maksimum antara tiga tiang penangkal petir dan empat tiang penangkal petir akan semakin besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ABB Calor Emag Schaltanlagen AG Mannheim and ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH Ratingen, "ABB Switchgear Manual", ABB, 2004.
- [2] Farouk A.M. Rizk, "Modeling of Substation Shielding Againsts Direct Lightning Strikes", *IEEE Trans.On Electromagnetic Compatibility*, vol.52, No. 3, August 2010.
- [3] Hutahuruk, T.S, "Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja", Penerbit Erlangga, Jakarta, 1989.
- [4] *IEEE Guide for Direct Lightning Lightning Stroke Shielding of Substations*, IEEE Standard 998-1996.
- [5] Leon Kempner, "Substations Structure Design Guide", ASCE Publications, 2008.
- [6] Mousa, A.M., "A Computer Program For Designing The Lightning Shielding System of Substations", *IEEE Trans.Power Del.*, vol.6, No.1, January, 1991.
- [7] Pritindra Chowdhuri, "Electromagnetic Transient in Power System", Research Studies Press, Taunton, 2004.
- [8] Ravindra P. Singh, "Switchgear and Power System Protection", PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2009.
- [9] Shoaib Khan, Sheeba Khan, and Ghariani Ahmed, "Industrial Power Systems", CRC Press, Boca Raton, 2007.
- [10] Soli Akbar Hutagaol, "Studi Tentang Sistem Penangkal Petir Pada BTS", Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatra Utara, Medan, 2009.
- [11] Taufiq Alif Kurniawan dan Achmad Bambang Sumadiyana, "Sistem Proteksi Petir Internal dan Eksternal", Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Jakarta, Oktober, 2007.