

PERHITUNGAN TEGANGAN BACK *FLASHOVER* AKIBAT SAMBARAN PETIR LANGSUNG PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV BENGKAYANG-SINGKAWANG

Hizkia Anggri¹, Usman A. Gani², Rudi Kurnianto³
d1021201083@student.untan.ac.id¹, usmanagani@ymail.com²,
rudi.kurnianto@ee.untan.ac.id³
Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Petir merupakan penyebab utama gangguan pada saluran transmisi udara tegangan tinggi, terutama di Indonesia yang memiliki aktivitas petir tinggi. Salah satu gangguan yang sering terjadi adalah back flashover, yaitu loncatan api pada isolator akibat tegangan lebih dari sambaran petir ke menara atau kawat tanah yang melampaui kekuatan isolasi. Penelitian ini bertujuan mengetahui probabilitas back flashover dan jumlah gangguan akibat sambaran petir langsung pada saluran transmisi 150 kV Bengkayang–Singkawang menggunakan metode gelombang berjalan dengan mempertimbangkan parameter petir, karakteristik menara, konfigurasi saluran, dan variasi tahanan pentanahan kaki menara. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai probabilitas jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan back flashover (P_{FL}) pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara adalah identik, yaitu $0\Omega - 10.25\Omega = 0\%$; $10.5\Omega = 0.04\%$; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.31\%$; $11.25\Omega = 0.43\%$; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.56\%$; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 1.42\%$; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 1.82\%$; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 2.23\%$; $24\Omega - 31.75\Omega = 2.36\%$; $32\Omega - 36\Omega = 7.43\%$; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 9.75\%$; $44.75\Omega - 45\Omega = 18.88\%$; $45.25\Omega - 50\Omega = 21.31\%$. Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi adalah sebagai berikut: $0\Omega - 10.25\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.5\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.07$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.25\Omega = 0.09$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.11$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 0.28$ gangguan /73.653 km saluran/tahun; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 0.36$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 0.43$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $24\Omega - 31.75\Omega = 0.47$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $32\Omega - 36\Omega = 1.46$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 1.90$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $44.75\Omega - 45\Omega = 3.69$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $45.25\Omega - 50\Omega = 4.17$ gangguan/73.653 km saluran/tahun.

Kata Kunci: Etir, *Back Flashover*, Gelombang Berjalan, Saluran Transmisi 150 Kv, Gangguan Petir.

PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik adalah salah satu aspek kunci dalam perkembangan dan kemajuan sebuah masyarakat. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan urbanisasi, serta peningkatan standar hidup, kebutuhan akan energi listrik terus meningkat. Di Indonesia, penyaluran listrik menghadapi tantangan dan peluang yang unik, mengingat kekayaan geografi, demografi, dan kebutuhan energi yang beragam. Dan diantara sekian banyak gangguan yang terjadi, petir merupakan salah satu penyebabnya.

Indonesia adalah salah satu negara yang letaknya di sekitar garis khatulistiwa (equatorial bolt) dengan kondisi geografis yang berdekatan dengan laut, menjadikan Indonesia termasuk daerah dengan hari guruh tertinggi di dunia yaitu 180-260 hari guruh per tahun dengan kerapatan sambaran petir mencapai 30 sambaran per tahun [1]. Kejadian petir dapat melibatkan arus yang sangat besar, dalam waktu yang sangat singkat namun bahaya yang ditimbulkan dapat sangat besar [2].

Petir secara umum dapat diartikan sebagai fenomena alam yang terjadi akibat pelepasan muatan oleh awan karena adanya perbedaan potensial antara awan dengan permukaan bumi. Petir dapat mengenai peralatan dengan beberapa cara, pertama melalui

sambaran langsung ke komponen, kedua melalui sambaran tidak langsung ke komponen. Tetapi, petir menyambar objek di sekitarnya [3].

Sambaran petir pada saluran transmisi dapat menyebabkan terjadinya tegangan lebih (over voltage) yang dapat menimbulkan gangguan dalam penyaluran tenaga listrik. Selain itu, sambaran petir ini juga dapat merusak berbagai peralatan isolasi dan komponen lain dalam sistem tenaga listrik karena menghasilkan tegangan dan arus yang sangat tinggi [4].

Petir yang menerpa kawat tanah saluran transmisi menimbulkan tegangan lebih surja berupa gelombang berjalan yang merambat dari titik sambaran menuju tower transmisi berikutnya, selanjutnya akan merambat sampai ke pembumian tower tersebut [5]. Ketika sambaran petir terjadi pada saluran transmisi, terjadi tegangan lebih, menyebabkan gangguan tanah dan kegagalan isolasi (back flashover) [6]. Fenomena back flashover terjadi apabila tegangan pada isolator saluran lebih besar atau sama dengan tegangan kritis lompatan api (critical flashover) sehingga lompatan api terjadi pada isolator tersebut [7].

METODOLOGI

Metode yang digunakan untuk penelitian ini yaitu perhitungan menggunakan metode Gelombang Berjalan dengan mempertimbangkan parameter petir, karakteristik menara, konfigurasi saluran, dan variasi tahanan pentanahan kaki menara. berdasarkan data tersebut, akan dilakukan perhitungan sehingga dapat diketahui probabilitas back flashover dan jumlah gangguan akibat sambaran petir langsung pada saluran transmisi 150 kV Bengkayang–Singkawang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Probabilitas *Back Flashover*

Untuk menghitung probabilitas *back flashover*, digunakan teori gelombang berjalan dan langkah-langkah perhitungannya diberikan di bawah ini [12]:

1. Menghitung kemungkinan jumlah lompatan api pada isolator renteng

Dik: $W = 2.61$ m (dari Tabel 3.4)

$t = 2 \mu\text{det}$ (dari Tabel 3.2)

$$\begin{aligned} V_{50\%} &= \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \\ &= \left(0.4 W + \frac{0.71 W}{t^{0.75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \\ &= \left(0.4 (2.61) + \frac{0.71(2.61)}{2^{0.75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \\ &= 2145.8599 \text{ kV} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan lompatan api balik (*back flashover*) besar tegangan yang diterapkan V diambil 1.8 kali tegangan lompatan api isolator pada 2 μdet .

$$V = 1.8 \times V_{2\mu\text{det}} \text{ kV}$$

$$V = 1.8 \times 2145.8599 \text{ kV}$$

$$V = 3862.5478 \text{ kV}$$

2. Menghitung impedansi surja kawat tanah dan faktor gandengan kawat

Untuk menghitung impedansi surja kawat tanah dan faktor gandeng kawat, terlebih dahulu menghitung radius amplop korona kawat tanah dengan metode iterasi Newton-Raphson. Harga E_0 biasanya diambil 1500kV/meter atau 15kV/cm.

Dik: $h_t = 52.1$ m

$$V = 3862.5478 \text{ kV}$$

$$E_0 = 1500 \text{ kV/m}$$

$$R \ln \left(\frac{2h_t}{R} \right) = \frac{V}{E_0}$$

$$R \ln \left(\frac{2 \times 52.1}{R} \right) = \frac{3862.5478}{1500}$$

$$R \ln \left(\frac{104.2}{R} \right) = 2.5750$$

$$R = 0.478280 \text{ m}$$

Impedansi surja satu kawat tanah, dimana r merupakan radius kawat

$$\text{Dik: } r = 10.89 \text{ mm} = 0.01089 \text{ m}$$

$$R = 0.478280 \text{ m}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_t}{r} \times \ln \frac{2h_t}{R}} \Omega$$

$$= 60 \sqrt{\ln \frac{2 \times 52.1}{0.01089} \times \ln \frac{2 \times 52.1}{0.478280}} \Omega$$

$$= 421.4963 \Omega$$

Faktor gandengan antara kedua kawat tanah

$$\text{Dik: } a_{12} = 14.25 \text{ m}$$

$$b_{12} = 105.1699 \text{ m}$$

(Terlampir di lampiran B)

$$Z_{12} = 60 \ln \left(\frac{b_{12}}{a_{12}} \right) \Omega$$

$$= 60 \ln \left(\frac{105.1699}{14.25} \right) \Omega$$

$$= 119.9292 \Omega$$

Impedansi surja ekivalen kawat tanah

$$Z_g = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2} \Omega$$

$$= \frac{421.4963 + 119.9292}{2} \Omega$$

$$= 270.7128 \Omega$$

Faktor gandengan antara kawat tanah dengan kawat fasa paling bawah

$$\text{Dik: } a_{c1} = 23.2109 \text{ m}$$

$$a_{c2} = 27.1313 \text{ m}$$

$$b_{12} = 80.9902 \text{ m}$$

$$b_{c2} = 82.1997 \text{ m}$$

(Terlampir di lampiran B)

$$K = \frac{Z_{a1} + Z_{a2}}{Z_{11} + Z_{12}}$$

$$Z_{a1} = 60 \ln \left(\frac{b_{c1}}{a_{c1}} \right) \Omega$$

$$= 60 \ln \left(\frac{80.9902}{23.2109} \right) \Omega$$

$$= 74.9824 \Omega$$

$$Z_{a2} = 60 \ln \left(\frac{b_{c2}}{a_{c2}} \right) \Omega$$

$$= 60 \ln \left(\frac{82.1997}{27.1313} \right) \Omega$$

$$= 66.5078 \Omega$$

Sehingga

$$K = \frac{Z_{a1} + Z_{a2}}{Z_{11} + Z_{12}}$$

$$= \frac{74.9824 + 66.5078}{421.4963 + 119.9292}$$

$$= 0.2613$$

3. Menghitung impedansi surja menara, dimana r merupakan radius kaki menara

Dik: $r = 5.25 \text{ m}$

$$Z_t = 30 \ln \left[\frac{2(h_t^2 + r^2)}{r^2} \right] \Omega$$

$$= 30 \ln \left[\frac{2(52.1^2 + 5.25^2)}{5.25^2} \right] \Omega$$

$$= 158.7937 \Omega$$

4. Menghitung koefisien terusan a pada puncak menara untuk gelombang dari dasar menara

$$a = \frac{2 Z_g}{Z_g + 2 Z_t}$$

$$= \frac{2 \times 270.7128}{270.7128 + (2 \times 158.7937)}$$

$$= 0.9203$$

5. Menghitung koefisien pantulan b pada puncak menara untuk gelombang dari dasar menara

$$b = a - 1$$

$$= 0.9203 - 1$$

$$= -0.0797$$

6. Menghitung tegangan pada puncak menara

$$e_0 = \frac{Z_g Z_t}{Z_g + 2 Z_t} I_s$$

$$I_s = A, A = \frac{I}{T}$$

Sehingga

$$e_0 = \frac{270.7128 \times 158.7937}{270.7128 + (2 \times 158.7937)} \frac{I}{T} \text{ kV}$$

$$= 73.0707 \frac{I}{T} \text{ kV}$$

7. Menghitung koefisien pantulan d pada dasar menara untuk gelombang dari puncak menara

Untuk $R = 0 \Omega$.

$$d = \frac{R - Z_t}{R + Z_t}$$

$$= \frac{0 - 158.7937}{0 + 158.7937}$$

$$= -1.0000$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan hasil sebagai berikut:

Untuk tahanan $0\Omega = -1.0000$; $10\Omega = -0.8815$; $20\Omega = -0.7763$; $30\Omega = -0.6822$; $40\Omega = -0.5976$; $50\Omega = -0.5211$.

8. Menghitung waktu kritis

Untuk $T = 2$

$$t_c = T + \frac{X_1}{C} \mu\text{det}$$

$$= 2 + \frac{23.21}{300} \mu\text{det}$$

$$= 2.0774 \mu\text{det}$$

9. Menghitung tegangan pada isolator

$$V_i = e_0 \left\{ (1-K)T + d \left[\left\{ T - 2 \left(\frac{h_t}{c} - \frac{X_1}{c} \right) \right\} + (b-Ka) \left(T - \frac{2h_t}{c} \right) \right] + d^2 b \left[\left\{ T - 2 \left(\frac{2h_t}{c} - \frac{X_1}{c} \right) \right\} + (b-Ka) \left(T - \frac{4h_t}{c} \right) \right] + d^3 b^2 \left[\left\{ T - 2 \left(\frac{3h_t}{c} - \frac{X_1}{c} \right) \right\} + (b-Ka) \left(T - \frac{6h_t}{c} \right) \right] \right\}$$

Untuk $R = 10 \Omega$, berdasarkan perhitungan sebelumnya didapat:

$a = 0.9203$; $b = -0.0797$; $d = -0.8815$;

$K = 0.2613$; $X_1 = 23.21$; $h_t = 52.1$

Tegangan pada isolator untuk $T = 2 \mu\text{det}$ adalah:

$$V_i = 73.0707 \frac{60}{2} \left\{ (1 - 0.2613) \times 2 + (-0.8815) \left[\left\{ 2 - 2 \left(\frac{52.1}{300} - \frac{23.21}{300} \right) \right\} + ((-0.0797) - (0.2613 \times 0.9203)) \left(2 - \frac{2 \times 52.1}{300} \right) + (-0.8815)^2 (-0.0797) \left[\left\{ 2 - 2 \left(\frac{2 \times 52.1}{300} - \frac{23.21}{300} \right) \right\} + ((-0.0797) - (0.2613 \times 0.9203)) \left(2 - \frac{4 \times 52.1}{300} \right) + (-0.8815)^3 (-0.0797)^2 \left[\left\{ 2 - 2 \left(\frac{3 \times 52.1}{300} - \frac{23.21}{300} \right) \right\} + ((-0.0797) - (0.2613 \times 0.9203)) \left(2 - \frac{6 \times 52.1}{300} \right) \right] \right] \right\}$$

$$V_i = 619.4249 \text{ kV}$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan hasil sebagai berikut:

$V_i (60) = 619.4249 \text{ kV}$

$V_i (80) = 825.8998 \text{ kV}$

$V_i (100) = 1032.3748 \text{ kV}$

$V_i (160) = 1651.7997 \text{ kV}$

$V_i (200) = 2064.7496 \text{ kV}$

10. Menghitung probabilitas *back flashover* pada menara

Probabilitas jumlah lompatan api (P_{FL}) terjadi bila tegangan (V_i) sama atau lebih besar dari tegangan lompatan api kritis ($V_{50\%}$). Perhitungan probabilitas *back flashover* pada menara dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 1 Perhitungan Probabilitas *Back Flashover* Pada Menara, Untuk $R = 10 \text{ Ohm}$

T (μdet)	I_0 (kA)	Seringnya terjadi (%)	V_i (kV)	$V_{50\%}$ (kV)	Probabilitas terjadi (%)
0.5 (7%)	60	90	1236.4234	4160.5303	-
	80	8	1648.5645		-
	100	1.2	2060.7056		-
	160	0.5	3297.1290		-
	200	0.3	4121.4112		-
1 (23%)	60	90	825.0910	2897.1000	-
	80	8	1100.1214		-
	100	1.2	1375.1517		-
	160	0.5	2200.2428		-
	200	0.3	2750.3035		-
1.5 (22%)	60	90	687.9803	2411.1948	-
	80	8	917.3070		-
	100	1.2	1146.6338		-
	160	0.5	1834.6140		-
	200	0.3	2293.2676		-
2 (48%)	60	90	619.4249	2145.8599	-
	80	8	825.8998		-
	100	1.2	1032.3748		-
	160	0.5	1651.7997		-
	200	0.3	2064.7496		-

$$P_i = e^{-\frac{I}{34}}$$

$$= 0 \%$$

$$P_{FL} = 2[\sum(Prob T \times P_i)]$$

$$= 2[(0.07 \times 0) + (0.23 \times 0) + (0.22 \times 0) + (0.48 \times 0)]$$

$$= 0 \%$$

11. Menghitung andongan

Perhitungan untuk menentukan andongan dua menara yang sama tinggi

Diketahui:

W = Berat konduktor per satuan Panjang: 947.6 kg/km = 0.9476 kg/m

T = Kuat Tarik dari kawat penghantar: 103.4 kN = 10.543,86 kg

S = Panjang span: 355.8 m

Koefisiensi muai Panjang konduktor α (°C): 0.0000188/°C

Menurut Buletin Iklim Kalbar Edisi November 2024 dari BMKG, Suhu maksimum (t_m) di kalimantan Barat adalah 36.3°C dan suhu normal (t) adalah 27.1°C – 28.3°C.

Sehingga,

Andongan normal: $t = 28^\circ\text{C}$

$$SAG_1 = \frac{W.S^2}{8T} \text{ m}$$

$$= \frac{0.9476 \times (355.8)^2}{8 \times 10543.86} \text{ m}$$

$$= 1.4222 \text{ m}$$

Panjang penghantar normal

$$L_0 = S + \frac{W.S^2}{24T^2} \text{ m}$$

$$= 355.8 + \frac{0.9476 \times (355.8)^2}{24 \times (10543.86)^2} \text{ m}$$

$$= 355.8000 \text{ m}$$

Panjang penghantar maksimal

$$L_t = L_0[1 + \alpha(t_m - t)] \text{ m}$$

$$= 355.8000[1 + 0.0000188 (36.3 - 28)] \text{ m}$$

$$= 355.8555 \text{ m}$$

Andongan maksimal: $t_m = 36.3^\circ\text{C}$

$$SAG_2 = \sqrt{\frac{3S(L_t - S)}{8}} \text{ m}$$

$$= \sqrt{\frac{3 \times 355.8(355.8555 - 355.8)}{8}} \text{ m}$$

$$= 2.7212 \text{ m}$$

12. Menghitung probabilitas *back flashover* pada seperempat jarak dan setengah jarak dari menara

Perhitungan untuk menentukan jarak antara kawat tanah dan kawat fasa pada seperempat jarak dari menara:

$$b_q = \left(h_t - \frac{d_0}{4}\right) - \left(h_t' - \frac{d_0'}{4}\right) \text{ m}$$

$$= \left(52.1 - \frac{2.7212}{4}\right) - \left(28.89 - \frac{2.7212}{4}\right) \text{ m}$$

$$= 23.2100 \text{ m}$$

$$d_q = \sqrt{b_q^2 + p^2} \text{ m}$$

$$= \sqrt{(23.2100)^2 + (0.2)^2} \text{ m}$$

$$= 23.2109 \text{ m}$$

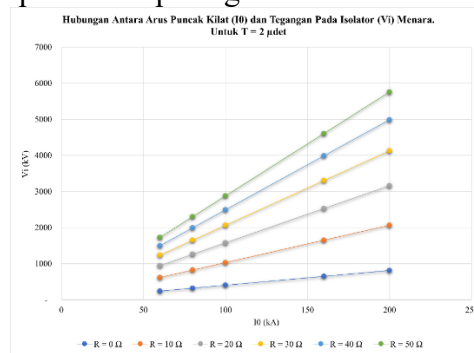
Perhitungan untuk menentukan jarak antara kawat tanah dan kawat fasa pada setengah jarak dari menara:

$$\begin{aligned}
 b_m &= (h_t - d_0) - (h_t' - d_0') \text{ m} \\
 &= (52.1 - 2.7212) - (28.89 - 2.7212) \text{ m} \\
 &= 23.2100 \text{ m} \\
 d_m &= \sqrt{b_m^2 + p^2} \text{ m} \\
 &= \sqrt{(23.2100)^2 + (0.2)^2} \text{ m} \\
 &= 23.2109 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, jarak antara kawat tanah dan kawat fasa untuk seperempat jarak dan setengah jarak dari menara adalah 23.2109 m.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan cara yang sama, probabilitas *back flashover* pada seperempat dan setengah jarak dari menara untuk tahanan $0\Omega - 10.25\Omega = 0\%$; $10.5\Omega = 0.04\%$; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.31\%$; $11.25\Omega = 0.43\%$; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.56\%$; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 1.42\%$; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 1.82\%$; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 2.23\%$; $24\Omega - 31.75\Omega = 2.36\%$; $32\Omega - 36\Omega = 7.43\%$; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 9.75\%$; $44.75\Omega - 45\Omega = 18.88\%$; $45.25\Omega - 50\Omega = 21.31\%$.

Dari hasil perhitungan probabilitas *back flashover* yang tertera pada tabel untuk probabilitas yang terjadi pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara. Peningkatan arus puncak kilat (I_0) menyebabkan kenaikan tegangan pada isolator (V_i), hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

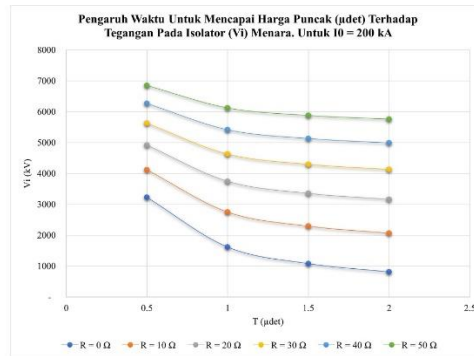


Gambar 1 Hubungan antara arus puncak kilat (I_0) dan tegangan pada isolator (V_i) menara. Untuk $T = 2 \mu\text{det}$

Dari hasil perhitungan probabilitas *back flashover* yang tertera pada tabel untuk probabilitas yang terjadi pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara. Tegangan yang timbul pada isolator (V_i) dan lompatan api kritis ($V_{50\%}$) menjadi berkurang seiring dengan bertambahnya durasi waktu untuk mencapai harga puncak (μdet). Hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

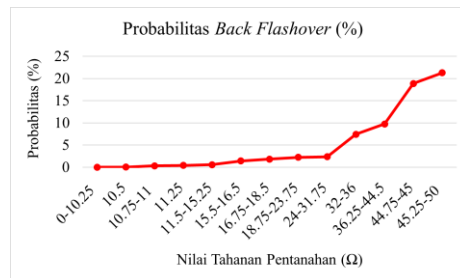


Gambar 2 Pengaruh waktu untuk mencapai harga puncak (μdet) terhadap tegangan lompatan api kritis ($V_{50\%}$)



Gambar 3 Pengaruh waktu untuk mencapai harga puncak (μdet) terhadap tegangan pada isolator (V_i) menara. Untuk (I_0) = 200 kA

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai probabilitas *back flashover* (P_{FL}) identik pada menara, seperempat jarak dari menara, maupun setengah jarak dari menara. Probabilitas sambaran petir yang menyebabkan *back flashover* (P_{FL}) memiliki ketergantungan pada nilai tahanan pentanahan (R). Probabilitas *back flashover* (P_{FL}) akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai tahanan pentanahan (R). Hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4 Probabilitas *back flashover*

Perhitungan Jumlah Gangguan Akibat Sambaran Petir Langsung Pada Saluran Transmisi

Untuk menghitung jumlah gangguan akibat sambaran petir langsung pada saluran transmisi, digunakan teori gelombang berjalan dan langkah-langkah perhitungannya sebagai berikut[12]:

1. Menghitung daerah yang dilindungi kawat tanah

Tinggi rata-rata kawat tanah di atas tanah untuk lintasan bergelombang;

$$h = h_t$$

$$h = 52.1 \text{ m}$$

Luas bayang-bayang untuk 100 km panjang saluran transmisi:

$$A = 0.1 (b + 4h^{1.09})$$

$$= 0.1 (14.25 + 4(52.1)^{1.09})$$

$$= 31.1699 \text{ km}^2 \text{ per } 100 \text{ km saluran}$$

2. Menghitung jumlah sambaran kilat pada saluran transmisi

Jumlah sambaran di Bengkayang adalah 6684 sambaran/km²/tahun, luas wilayahnya adalah 5396.30 km².

$$\text{Sehingga } N = \frac{6684}{5396.30} = 1 \text{ sambaran/km}^2/\text{tahun}$$

Jumlah sambaran di Singkawang adalah 554 sambaran/km²/tahun, luas wilayahnya adalah 504 km².

$$\text{Sehingga } N = \frac{554}{504} = 1 \text{ sambaran/km}^2/\text{tahun}$$

Jadi, jumlah sambaran di wilayah Bengkayang dan Singkawang:

$$N = \frac{1+1}{2} = 1 \text{ sambaran/km}^2/\text{tahun}$$

Jumlah sambaran kilat pada saluran transmisi sepanjang 100 km:

$$\begin{aligned} N_L &= N \times A \\ &= 1 \times 31.1699 \\ &= 31 \text{ sambaran/100 km/tahun} \\ &= 23 \text{ sambaran/73.653 km saluran/tahun} \end{aligned}$$

3. Menghitung gangguan kilat pada menara

Pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT): $\eta = 0.85$. Dengan anggapan bahwa sambaran pada menara 60% dari seluruh sambaran, maka jumlah gangguan pada menara:

$$N_t = 0.85 \times 0.6 \times N_L \times P_{FL}$$

Untuk tahanan $10.75\Omega - 11\Omega$, $P_{FL} = 0.31\%$, jumlah gangguan pada menara:

$$\begin{aligned} N_t &= 0.85 \times 0.6 \times N_L \times P_{FL} \\ &= 0.85 \times 0.6 \times 23 \times 0.0031 \\ &= 0.04 \text{ gangguan/73.653 km saluran/tahun} \end{aligned}$$

4. Menghitung gangguan kilat pada seperempat jarak dari menara

Pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT): $\eta = 0.85$. Dengan anggapan bahwa sambaran pada seperempat jarak dari menara 30% dari seluruh sambaran, maka jumlah gangguan pada seperempat jarak dari menara:

$$N_q = 0.85 \times 0.3 \times N_L \times P_{FL}$$

Untuk tahanan $10.75\Omega - 11\Omega$, $P_{FL} = 0.31\%$, jumlah gangguan pada seperempat jarak dari menara:

$$\begin{aligned} N_q &= 0.85 \times 0.3 \times N_L \times P_{FL} \\ &= 0.85 \times 0.3 \times 23 \times 0.0031 \\ &= 0.02 \text{ gangguan/73.653 km saluran/tahun} \end{aligned}$$

5. Menghitung gangguan kilat pada setengah jarak dari menara

Pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT): $\eta = 0.85$. Dengan anggapan bahwa sambaran pada setengah jarak dari menara 10% dari seluruh sambaran, maka jumlah gangguan pada setengah jarak dari menara:

$$N_m = 0.85 \times 0.1 \times N_L \times P_{FL}$$

Untuk tahanan $10.75\Omega - 11\Omega$, $P_{FL} = 0.31\%$, jumlah gangguan pada setengah jarak dari menara:

$$\begin{aligned} N_m &= 0.85 \times 0.1 \times N_L \times P_{FL} \\ &= 0.85 \times 0.1 \times 23 \times 0.0031 \\ &= 0.01 \text{ gangguan/73.653 km saluran/tahun} \end{aligned}$$

6. Menghitung jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi

Untuk menghitung jumlah gangguan pada SUTT, digunakan persamaan berikut:

$$N_0 = N_{SF} + N_t + N_q + N_m$$

Untuk tahanan $10.75\Omega - 11\Omega$, $P_{FL} = 0.31\%$, jumlah gangguan pada saluran transmisi:

$$\begin{aligned} N_0 &= N_{SF} + N_t + N_q + N_m \\ &= 0 + 0.04 + 0.02 + 0.01 \\ &= 0.07 \text{ gangguan/73.653 km saluran/tahun} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, jumlah gangguan kilat pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai probabilitas *back flashover* (P_{FL}) akibat meningkatnya nilai tahanan pentanahan (R). Distribusi gangguan menunjukkan bahwa menara merupakan lokasi dengan tingkat kejadian tertinggi, kemudian menurun pada posisi seperempat jarak, dan mencapai titik minimum pada posisi setengah jarak dari menara.



Gambar 5 Jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi

Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan, peningkatan pada arus puncak kilat (I_0) berbanding lurus dengan besarnya nilai tegangan pada isolator (V_i). Tegangan yang timbul pada isolator (V_i) dan lompatan api kritis ($V_{50\%}$) menjadi berkurang seiring dengan bertambahnya durasi waktu untuk mencapai harga puncak (μdet). Perhitungan tegangan pada isolator (V_i) menggunakan data besar arus puncak kilat (tabel 3.1) dan waktu untuk mencapai harga puncak (tabel 3.2). Nilai pentanahan yang digunakan adalah $0\Omega - 50\Omega$ dengan interval 0.25Ω , hal tersebut dilakukan agar mengetahui nilai probabilitas *back flashover*. Perhitungan dilakukan pada tiga titik: menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara. berdasarkan hasil perhitungan, nilai probabilitas jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan *back flashover* (P_{FL}) pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara adalah identik, yaitu $0\Omega - 10.25\Omega = 0\%$; $10.5\Omega = 0.04\%$; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.31\%$; $11.25\Omega = 0.43\%$; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.56\%$; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 1.42\%$; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 1.82\%$; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 2.23\%$; $24\Omega - 31.75\Omega = 2.36\%$; $32\Omega - 36\Omega = 7.43\%$; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 9.75\%$; $44.75\Omega - 45\Omega = 18.88\%$; $45.25\Omega - 50\Omega = 21.31\%$. Probabilitas sambaran petir yang menyebabkan *back flashover* (P_{FL}) memiliki ketergantungan pada nilai tahanan pentanahan (R). Probabilitas *back flashover* (P_{FL}) akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai tahanan pentanahan (R).

Perhitungan jumlah sambaran pada saluran transmisi (N_L) didasarkan pada data rata-rata jumlah sambaran petir per tahun di wilayah Bengkayang dan Singkawang dari tahun 2018-2021 dan luas bayang-bayang untuk 100 km saluran transmisi menggunakan persamaan (3.26). Nilai ini kemudian disesuaikan dengan panjang transmisi yang sebenarnya yaitu 73.653 km saluran, menghasilkan 23 sambaran per 73.653 km saluran per tahun. Perhitungan jumlah gangguan kemudian dilakukan pada tiga titik: menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara dengan menggunakan nilai probabilitas jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan *back flashover* (P_{FL}) yang telah diketahui dari perhitungan sebelumnya. Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api atau arus susulan (*power follow current*) yang menimbulkan gangguan pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT): $\eta = 0.85$. Dengan anggapan bahwa sambaran pada menara adalah 60% dari seluruh sambaran, sambaran pada seperempat jarak dari menara adalah 30% dari seluruh sambaran, dan sambaran pada setengah jarak dari menara adalah 10% dari seluruh sambaran.

Jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi diketahui dengan menjumlahkan gangguan kilat pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara. Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi adalah sebagai berikut: $0\Omega - 10.25\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.5\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.07$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.25\Omega = 0.09$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.11$ gangguan/73.653 km

saluran/tahun; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 0.28$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 0.36$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 0.43$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $24\Omega - 31.75\Omega = 0.47$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $32\Omega - 36\Omega = 1.46$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 1.90$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $44.75\Omega - 45\Omega = 3.69$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $45.25\Omega - 50\Omega = 4.17$ gangguan/73.653 km saluran/tahun.

KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dan analisis yang telah dilakukan mengenai perhitungan tegangan back flashover akibat sambaran petir langsung pada saluran transmisi 150 kV Bengkayang – Singkawang, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Peningkatan arus puncak kilat (I_0) menyebabkan kenaikan tegangan pada isolator (V_i).
2. Tegangan yang timbul pada isolator (V_i) dan tegangan lompatan api krtis ($V_{(50\%)}$) menjadi berkurang seiring dengan bertambahnya durasi waktu untuk mencapai harga puncak (μ_{det}).
3. Probabilitas sambaran petir yang menyebabkan back flashover (P_{FL}) memiliki ketergantungan pada nilai tahanan pentanahan (R). Probabilitas back flashover (P_{FL}) akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai tahanan pentanahan (R).
4. Nilai probabilitas jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan back flashover (P_{FL}) pada menara, seperempat jarak dari menara, dan setengah jarak dari menara adalah identik, yaitu $0\Omega - 10.25\Omega = 0\%$; $10.5\Omega = 0.04\%$; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.31\%$; $11.25\Omega = 0.43\%$; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.56\%$; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 1.42\%$; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 1.82\%$; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 2.23\%$; $24\Omega - 31.75\Omega = 2.36\%$; $32\Omega - 36\Omega = 7.43\%$; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 9.75\%$; $44.75\Omega - 45\Omega = 18.88\%$; $45.25\Omega - 50\Omega = 21.31\%$.
5. Jumlah gangguan kilat pada saluran transmisi adalah sebagai berikut: $0\Omega - 10.25\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.5\Omega = 0$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $10.75\Omega - 11\Omega = 0.07$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.25\Omega = 0.09$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $11.5\Omega - 15.25\Omega = 0.11$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $15.5\Omega - 16.5\Omega = 0.28$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $16.75\Omega - 18.5\Omega = 0.36$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $18.75\Omega - 23.75\Omega = 0.43$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $24\Omega - 31.75\Omega = 0.47$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $32\Omega - 36\Omega = 1.46$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $36.25\Omega - 44.5\Omega = 1.90$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $44.75\Omega - 45\Omega = 3.69$ gangguan/73.653 km saluran/tahun; $45.25\Omega - 50\Omega = 4.17$ gangguan/73.653 km saluran/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Pangestu, S. Hardi, and Rohana, "Pengaruh Sambaran Petir Terhadap Kinerja Rele Jarak Dalam Menentukan Titik Gangguan Pada Saluran Transmisi," Jurnal Darma Agung, 2022.
- A. Yuana Dewi, Y. Warmi, Peprizal, and A. Effendi, "STUDI PENGARUH BACK FLASHOVER PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV PAYAKUMBUH-KOTO PANJANG," Ensiklopedia of Journal, vol. 2, 2020, [Online]. Available: <http://jurnal.ensiklopediaku.org>
- B. C. Rahmono, R. Kurnianto, and U. A. Gani, "STUDI PERHITUNGAN TEGANGAN BACK FLASHOVER DI TERMINAL ISOLATOR PADA SUTET 275 KV BENGKAYANG-MAMBONG AKIBAT SAMBARAN PETIR LANGSUNG," 2019.
- B. Hasudungan Sirait, A. Tanjung, and Arlenny, "Studi Penempatan Lightning Arrestter Pada Transformator #2 Gardu Induk PLTG Teluk Lembu PT. PLN (Persero)Pekanbaru," SENKIM: Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin, vol. 1, no. 1, 2021.
- C. A. Santjiatodjaja, L. S. Patras, and G. Mangindaan, "Analisa Gelombang Berjalan Pada Saluran Transmisi 70 kV Gardu Induk Teling," Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 2019.

- D. Messelinus Christian, "EVALUASI SISTEM PROTEKSI PETIR EKSTERNAL PADA PABRIK PT PUPUK SRIWIJAYA," 2017.
- E. Erhaneli and A. Afriliani, "Analisa Pengaruh Perilaku Petir pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Menggunakan Metode Burgsdorf," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 29–34, Jan. 2018, doi: 10.21063/JTE.2018.3133705.
- Erhaneli, Z. Anthony, and R. Vandeska, "Analisis Jumlah Gangguan Petir Akibat Back flashover Dengan Metode Hilemen Pada SUTT 150 kV Gardu Induk Payakumbuh-Koto Panjang," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 11, no. 2, 2022, doi: 10.21063/JTE.2022.31331109.
- G. Geri, M. Rajagukguk, and Danial, "STUDI PENENTUAN KEPADATAN SAMBARAN PETIR DI KALIMANTAN BARAT MENGGUNAKAN DATA SAMBARAN BMKG," 2025.
- M. Gazali and I. Syarif, "Back Flash Over Sambaran Petir Di Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv," 2019.
- N. H. Utomo, *Perencanaan Dan Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb - Sabah Sehubungan Dengan Ekspor Energi Listrik*. 2019.
- R. P. Luntungan, L. S. Patras, and G. MCh Mangindaan, "Analisa Daerah Lindung dan Grounding Pada Tower Transmisi Akibat Terjadinya Back Flashover," 2018.
- T. Arfianto and A. I. Salam, "Analisis Tahanan Pentanahan Kaki Tower SUTT 70 kV Rute Cigereleng-Majalaya," 2019.
- T. S. Hutaeruk, *Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1991.
- T. S. Hutaeruk, *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1985.