

PERHITUNGAN GANGGUAN KILAT PADA SALURAN UDARA TEGANGAN MENENGAH

Oleh: *T.S Hutahuruk* *

SARI

Perhitungan gangguan kilat saluran udara tegangan menengah baru dilakukan secara intensif pada tahun-tahun terakhir 1960an, antara lain oleh Uehara dkk. (1968) dan Auer dkk. (1969).

Perhitungan-perhitungan tersebut menggunakan model geometris dari saluran dan generator surja, misalnya yang dilakukan oleh Auer dkk. (1969).

Berdasarkan teori-teori yang sudah dikembangkan oleh Rusck (1958), Whitehead (1977), Razevig (1979), dan lain-lain, penulis mencoba menguraikan suatu metode analitis yang sederhana dengan perhitungan tangan dengan menggunakan alat hitung elektronik.

ABSTRACT

The calculations of lightning outages of medium voltage overhead lines have not been intensively conducted until late in the 1960s, among others by Uehara et al (1968) and Auer et al (1969).

Those calculations use a geometric model of the line and a surge generator as conducted by Auer et al (1969).

Based on the theories developed by Rusck (1958), Whitehead (1977), Razevig (1979), and others, the writer tries to outline a simple analytical method that can be calculated manually by using an electronic calculator.

* Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Pendahuluan

Yang dimaksud dengan gangguan kilat pada saluran udara adalah kilat yang menyambar saluran, baik secara langsung maupun tidak langsung, dan menyebabkan alat pemutus daya membuka untuk mengisolasi saluran yang terganggu dari sistem.

Pada saluran udara tegangan menengah (SUTM), gangguan kilat terdiri dari gangguan akibat sambaran langsung dan gangguan akibat sambaran tidak langsung atau sambaran induksi. Pada saluran udara tegangan tinggi gangguan kilat akibat sambaran induksi sangat kecil dan diabaikan. Tetapi pada saluran udara tegangan menengah, terutama saluran menengah tanpa kawat tanah atau kawat netral, jumlah gangguan kilat akibat sambaran induksi itu dapat lebih banyak dari gangguan kilat akibat sambaran langsung. Hal tersebut disebabkan tingkat ketahanan impuls isolasi ($V_{50\%}$) dari isolator SUTM rendah dan daerah sambaran induksi yang luas.

Jadi jumlah gangguan pada saluran tegangan menengah dapat dituliskan sebagai:

$$N_o = N_i + N_t \quad (1)$$

dengan:

N_o = jumlah gangguan kilat pada saluran

N_i = jumlah gangguan akibat sambaran induksi

N_t = jumlah gangguan akibat sambaran langsung.

Sambaran langsung

Yang dimaksud dengan sambaran langsung adalah kilat yang menyambar langsung pada kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau pada kawat tanah (untuk saluran dengan kawat tanah). Pada saluran udara tegangan menengah yang dilengkapi dengan kawat tanah diasumsikan tidak ada kegagalan perisaian. Asumsi ini dapat dibenarkan karena tinggi kawat di atas tanah relatif rendah (10 sampai 13 meter) dan juga karena dengan sudut perisaian yang biasanya $< 60^\circ$ sudah dapat dianggap semua sambaran kilat mengenai kawat tanah; jadi tidak ada kegagalan perisaian.

Panjang gawang saluran udara tegangan menengah relatif pendek, dan hanya berkisar antara 40 sampai 80 meter dengan panjang rata-rata 50 meter. Pada saluran tanpa kawat tanah semua sambaran kilat dianggap terjadi pada kawat dan pada saluran dengan kawat tanah, di mana pengetanahan dilakukan pada jarak 3 sampai 4 gawang, semua sambaran kilat dianggap terjadi pada tiang atau dekat tiang, baik pada tiang yang diketanahkan maupun pada tiang yang tidak diketanahkan dengan perbandingan yang sama.

Pada waktu kilat menyambar kawat tanah atau kawat fasa akan timbul arus yang besar dan sepasang gelombang berjalan yang merambat pada kawat. Arus yang besar ini dapat membahayakan peralatan yang ada pada saluran. Besarnya arus atau tegangan akibat sambaran ini tergantung pada besar arus kilat, waktu muka, dan jenis tiang saluran. Karena saluran tegangan menengah tidak begitu tinggi di atas tanah, maka jumlah sambaran langsung pun rendah. Makin tinggi tegangan sistem, makin tinggi tiangnya, dan makin besar jumlah sambaran ke saluran itu.

Sambaran tidak langsung atau sambaran induksi

Bila terjadi sambaran kilat ke tanah di dekat saluran, akan terjadi fenomena transien yang diakibatkan oleh medan elektromagnetis dari kanal kilat. Fenomena kilat ini terjadi pada kawat penghantar. Akibatnya timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kedua sisi kawat di tempat sambaran berlangsung.

Fenomena transien pada kawat dapat berlangsung hanya di bawah pengaruh gaya yang memaksa muatan bergerak sepanjang hantaran. Atau dengan perkataan lain, transien dapat terjadi di bawah pengaruh komponen vektor kuat medan yang berarah sejajar dengan arah penghantar. Jadi bila komponen vektor dari kuat medan berarah vertikal, dia tidak akan mempengaruhi atau menimbulkan fenomena transien pada penghantar.

Penangkapan kilat oleh saluran, jumlah sambaran dan probabilitas distribusi arus.

Suatu saluran di atas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Kilat yang biasanya menyambar tanah di dalam bayang-bayang itu akan menyambar saluran sebagai gantinya, sedang kilat di luar bayang-bayang itu sama sekali tidak menyambar saluran.

Lebar bayang-bayang listrik atau disebut 'daerah perisaian' untuk suatu saluran diberikan oleh Whitehead (1977) (gambar 1).

Lebar bayang-bayang W adalah:

$$W = (b + 4h^{1,09}) \text{ meter} \quad (2)$$

dengan

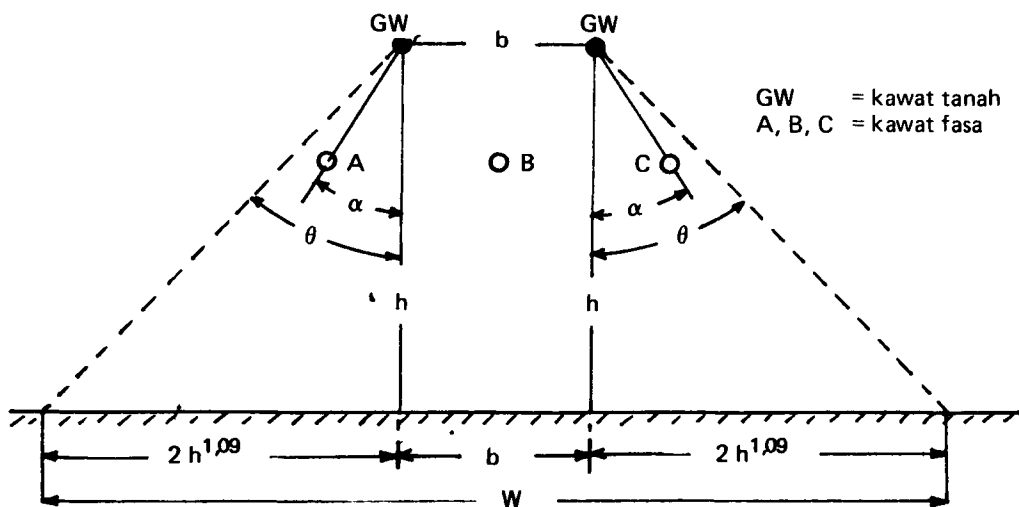
b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah (meter, bila kawat tanah hanya satu, $b = 0$)

h = tinggi rata-rata kawat tanah di atas tanah = $h_t - \frac{2}{3}$ andongan (meter).

h_t = tinggi kawat tanah pada tiang (meter).

Di luar daerah perisaian itu kilat dianggap menyambar langsung ke tanah, atau disebut sambaran induksi.

Pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) lebar bayang-bayang untuk tiga macam konfigurasi diberikan pada gambar 2.



Gambar 1 Lebar bayang-bayang listrik saluran udara terhadap sambaran kilat

Jadi luas bayang-bayang untuk 100 km panjang saluran

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

atau

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

Jumlah sambaran kilat ke bumi

Jumlah sambaran kilat ke bumi sebanding dengan jumlah hari guruh per tahun atau *Iso Keraunic Level* (IKL) di tempat itu. Banyak penyelidik yang memberikan perhatian ke arah ini dan mengemukakan rumus-rumus yang berlainan. Rumus-rumus tersebut diberikan dalam tabel 1 (Anderson, 1982).

Untuk Indonesia, penulis mengusulkan menggunakan

$$N = 0,15 \text{ IKL} \quad (4)$$

dengan

N = jumlah sambaran per km^2 per tahun

IKL = jumlah hari guruh per tahun

Jadi jumlah sambaran pada saluran sepanjang 100 km adalah

$$N_L = N \times A$$

atau

$$N_L = 0,015 IKL (b + 4h^{1,09}) \text{ sambaran per 100 km per tahun} \quad (5)$$

Tabel 1 Relasi empiris antara kerapatan sambaran kilat dan hari guruh tahunan (Anderson, 1982).

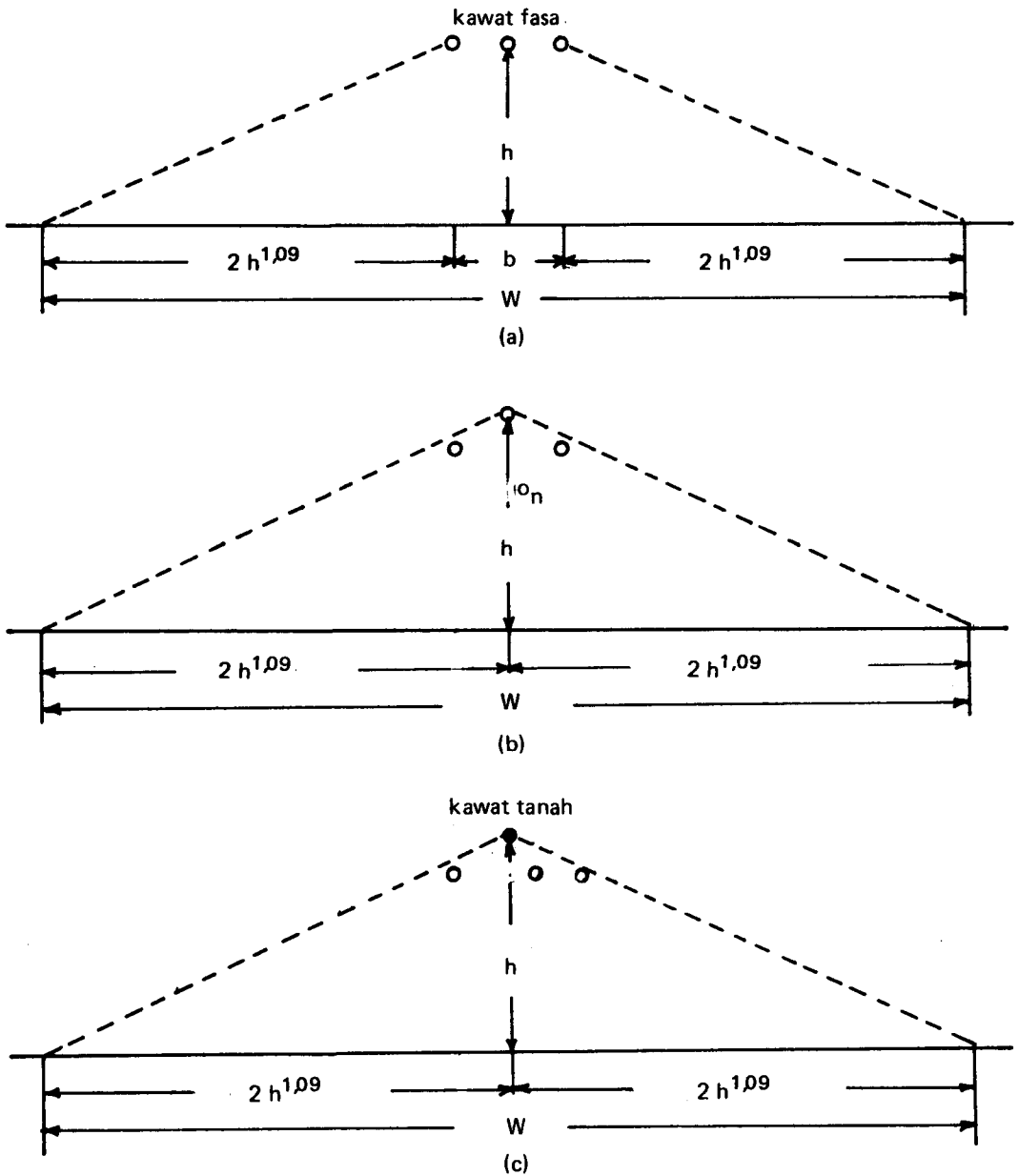
No.	Lokasi	Kerapatan sambaran petir N (per km^2 per tahun)*	Penyelidik
1.	India	0,10 IKL	Aiya (1968)
2.	Rhodesia	0,14 IKL	Anderson & Jenner (1954)
3.	Afrika Selatan	0,023 (IKL) ^{1,3}	Anderson-Eriksson (1954)
4.	Swedia	0,004 (IKL) ²	Muller-Hillebrand (1964)
5.	Inggris	a (IKL) ^b a = $2,6 \pm 0,2 \times 10^{-3}$ b = $1,9 \pm 0,1$	Stringfellow (1974)
6.	AS (bag. Utara)	0,11 IKL	Horn & Ramsey (1951)
7.	AS (bag. Selatan)	0,17 IKL	Horn & Ramsey (1951)
8.	AS	0,1 IKL	Anderson (1968)
9.	AS	0,15 IKL	Brown & Whitehead (1969)
10.	Rusia	0,036 (IKL) ^{1,3}	Kolokolov & Pavlova (1972)
11.	Dunia (iklim sedang)	0,19 IKL	Brooks (1950)
12.	Dunia (iklim sedang)	0,15 IKL	Golde (1966)
13.	Dunia (iklim tropis)	0,13 IKL	Brooks (1950)

* Untuk daerah sekitar katulistiwa dengan iklim tropis seperti di Indonesia dengan IKL antara 60 sampai 150, penulis mengusulkan penggunaan $N = 0,15$ IKL.

Lompatan api dan busur api

Besar tegangan yang timbul pada isolator saluran tergantung pada kedua parameter kilat, yaitu puncak dan kecuraman muka gelombang kilat.

Tidak semua sambaran kilat dapat mengakibatkan lompatan api (*flashover*) pada isolasi saluran. Demikian juga tidak semua lompatan api yang timbul dapat beralih menjadi busur api (*power arc*) yang mengakibatkan gangguan saluran (*line outage*).



Gambar 2 Lebar bayang-bayang listrik saluran udara
 (a) Saluran udara tanpa kawat tanah
 (b) Saluran udara dengan kawat netral n ($b = 0$)
 (c) Saluran udara dengan satu kawat tanah ($b = 0$)
 W = Lebar bayang-bayang listrik.

Terjadinya lompatan api bila saluran disambar kilat tergantung pada besar tegangan yang timbul dan melebihi kekuatan impuls $V_{50\%}$ isolator. Demikian juga terjadinya peralihan dari lompatan api menjadi busur api yang mengakibatkan gangguan saluran tergantung pada sejumlah faktor seperti dijelaskan di bawah ini.

Waktu beraksi rele biasanya tidak kurang dari setengah putaran (*cycle*) atau 0,01 detik (untuk frekuensi sistem 50 Hertz), sedang eksistensi gelombang kilat tidak lebih dari 100 mikrodetik. Jadi lompatan api impuls itu tidak mungkin mengakibatkan pemutusan saluran. Pemutusan saluran hanya terjadi bila lompatan api impuls beralih menjadi pelepasan busur api yang terus bertahan karena tegangan kerja saluran.

Probabilitas beralihnya lompatan api impuls menjadi busur api tergantung pada sejumlah faktor, termasuk daya sumber. Tetapi yang paling berpengaruh adalah intensitas medan yang ditimbulkan oleh tegangan kerja dalam kanal pelepasan impuls (*impulse discharge*). Makin tinggi intensitas medan, makin baik konduktivitas kanal pelepasan impuls, dan makin tinggi probabilitas beralihnya lompatan api menjadi busur api. Yang terakhir ini selalu mengakibatkan gangguan saluran.

Bila gradien tegangan kerja sepanjang jalan lompatan api tidak cukup besar, busur api tidak akan terbentuk dan karenanya gangguan saluran juga tidak terjadi.

Menurut sejumlah penelitian yang dilakukan di Rusia (Razevig, 1979), probabilitas beralihnya lompatan api menjadi busur api pada isolator dihubungkan dengan intensitas medan karena tegangan kerja dan ini kira-kira sama dengan hasil bagi tegangan netral (rms) dengan panjang isolator. Besarnya probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api diberikan dalam tabel 2.

Tabel 2 Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api (Razevig, 1979).

Gradien tegangan E_0 (kV _{rms} /meter)	Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api, η
50	0,6
30	0,45
20	0,25
10	0,10

Makin tinggi tegangan kerja sistem, makin besar gradien tegangan, sehingga makin besar pula probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api.

Jadi, dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa jumlah gangguan pada saluran tergantung pada:

- a. Jumlah sambaran pada saluran, N_L
- b. Probabilitas terjadinya lompatan api, P_{FL}
- c. Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api, η

Dengan demikian jumlah gangguan dapat ditulis sebagai:

$$N_t = 0,015 IKL (b + 4h^{1,09}) \cdot P_{FL} \cdot \eta \quad (6)$$

Untuk mengurangi probabilitas terjadinya lompatan api biasanya dipasang kawat tanah pada saluran. Jadi, bila kilat menyambar kawat tanah, hanya arus kilat yang besar yang dapat menimbulkan lompatan api.

Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api dapat dikurangi dengan memperpanjang jalan lompatan api, misalnya menggunakan tiang kayu.

Probabilitas distribusi arus kilat

Probabilitas distribusi harga puncak arus kilat diberikan oleh beberapa peneliti, antara lain oleh Popolansky (1970), yaitu

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{25}\right)^2} \quad (7)$$

Tetapi untuk memudahkan penggunaannya kelak, terutama dalam perhitungan gangguan kilat karena sambaran induksi, rumus Popolansky itu didekati dengan fungsi eksponensial

$$P_1 = e^{-\frac{I}{34}} \quad (8)$$

Selanjutnya, persamaan (8) inilah yang digunakan dalam perhitungan gangguan kilat akibat sambaran langsung dan sambaran induksi pada saluran udara tegangan menengah.

Perhitungan gangguan kilat akibat sambaran induksi

Sampai saat ini telah banyak dilakukan penelitian, baik perhitungan teoritis maupun percobaan dalam hubungan dengan tegangan induksi akibat sambaran kilat tidak langsung atau sambaran induksi. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan antara lain oleh Bewly (1951) dan Rusck (1958).

Dalam pembahasan-pembahasan di bawah ini akan diberikan secara singkat teori yang dikemukakan oleh Rusck (1958). Ia memperhitungkan potensial skalar dan potensial vektor untuk menghitung tegangan induksi akibat sambaran tidak langsung.

Tegangan pada saluran akibat sambaran induksi

Untuk dapat menghitung tegangan lebih pada saluran akibat sambaran induksi terlebih dahulu harus diketahui medan elektromagnetis dari sambaran kilat. Arus kilat pada tanah mempunyai waktu muka yang kecil dan ekor yang panjang. Selama proses pelompatan kepala (*stepped leader*) suatu muatan q_0 terdistribusi secara merata sepanjang kanal kilat (*lightning channel*). Kemudian sambaran balik yang berupa surja arus dengan bentuk fungsi langkah (*stepped function*) bergerak ke atas dengan kecepatan sama dengan kecepatan sinar dan menetralkan muatan yang ada pada kanal kilat. Bila waktu muka dari arus kilat tidak diperhatikan, pendekatan ini dapat digunakan untuk bagian bawah dari kanal kilat, di mana variasi muatan dan kecepatan pada ketinggian di atas permukaan tanah dapat diabaikan.

Hubungan antara arus I_0 dan muatan q_0 adalah :

$$I_0 = c q_0 \tag{9}$$

dengan

I_0 = harga puncak arus kilat selama sambaran balik

c = kecepatan merambat sambaran balik

q_0 = muatan listrik pada lintasan kilat per satuan panjang

Dengan bantuan persamaan Maxwell, Rusck menurunkan besar potensial skalar penginduksi (penurunan rinci dari persamaan itu tidak diberikan di sini) sbb.:

$$V_{ind} = 2 Z_0 I_0 h (c_0/c) \left[\frac{1}{\sqrt{(L^2 + r_0^2)}} - \frac{1}{\sqrt{(ct)^2 + \{1 - (c/c_0)^2\} r_0^2}} \right] \tag{10}$$

dengan

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} (u_0/\epsilon_0)^{1/2} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1,26 \times 10^{-6}}{8,84 \times 10^{-12}} \right)^{1/2} \tag{11}$$

$$\approx 30 \text{ ohm}$$

h = tinggi kawat di atas tanah

c_0 = kecepatan merambat sinar

c = kecepatan merambat sambaran balik

L = panjang total jalan kilat

r_0 = jarak antara kawat dengan sambaran kilat

t = waktu

Juga diturunkan besar potensial vektor penginduksi,

$$h \frac{\partial A_{ind}}{\partial t} = 2 Z_0 I_0 (c/c_0) h \frac{1}{\sqrt{(ct)^2 + [1 - (c/c_0)^2] r_0^2}} \tag{12}$$

Dari persamaan (10) dan (12) diperoleh harga gelombang tegangan induksi untuk masing-masing komponen, yaitu:

$$V_1 = V_{\text{ind}}(x) + \frac{1}{2} h \frac{\partial A_{\text{ind}}}{\partial t}$$

$$V_2 = V_{\text{ind}}(-x) + \frac{1}{2} h \frac{\partial A_{\text{ind}}}{\partial t} \quad (13)$$

atau

$$V_1 = Z_0 I_0 h(c/c_0) \left[\frac{c_0 t - x}{y^2 + (c/c_0)^2 (c_0 t - x)^2} \right]$$

$$\times \left[1 + \frac{x + (c/c_0)^2 (c_0 t - x)}{\sqrt{(c/c_0)^2 (c_0 t)^2 + (1 - (c/c_0)^2) (x^2 + y^2)}} \right]$$

$$V_2 = V_1(-x) \quad (14)$$

Jadi jumlah gelombang tegangan induksi akibat sambaran kilat tidak langsung adalah

$$V = V_1 + V_2 \quad (15)$$

Dalam persamaan (14),

x = kordinat sepanjang kawat; $x = 0$ adalah titik yang terdekat ke sambaran kilat
 y = jarak kawat dengan sambaran kilat vertikal.

Pada titik $x = 0$, yaitu titik terdekat ke sambaran, setelah substitusi dalam persamaan (14) dan (15), dan mengingat c/c_0 kecil, diperoleh harga maksimum

$$V_{0, \text{maks}} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{c}{c_0} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{1}{2}(c/c_0)^2)^{1/2}} \right] \quad (16)$$

Harga $c/c_0 = 0,1$ sampai $0,5$, jadi

$$V_{0, \text{maks}} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} (1,07 \div 1,38)$$

Dari persamaan (16) nyata kelihatan bahwa tegangan induksi tidak begitu tergantung pada kecepatan merambat dari sambaran balik kilat. Tegangan induksi pada saluran di titik yang jauh dari sambaran dicapai bila $x = \pm \infty$.

Bila harga ini diisikan ke dalam persamaan (14) dan kemudian dihitung tegangan induksi maksimum pada titik terjauh itu, diperoleh

$$V_i = V_{\infty, \text{maks}} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} = \frac{30 I_0 h}{y} \quad (17)$$

Dalam perhitungan selanjutnya, sebagai tegangan induksi akibat sambaran induksi digunakan tegangan induksi yang diberikan oleh persamaan (17). Dari persamaan ini terlihat bahwa harga maksimum tegangan induksi tidak tergantung lagi pada kecepatan merambat dari sambaran balik kilat.

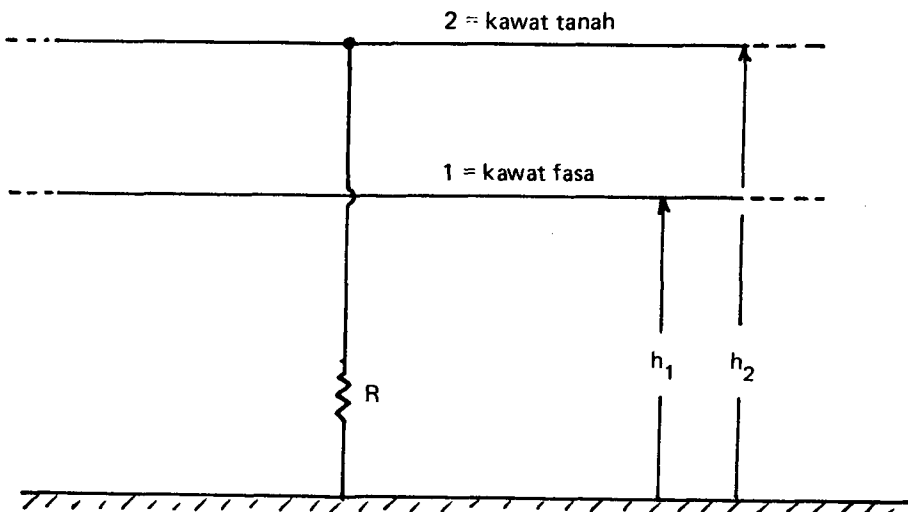
Pengaruh kawat tanah terhadap tegangan induksi

Dalam menghitung pengaruh kawat tanah terhadap tegangan induksi diperkenalkan *Faktor Perisaian* (FP) yang didefinisikan sebagai hasil bagi tegangan induksi dengan kawat tanah dan tegangan induksi tanpa kawat tanah.

Kawat tanah ideal adalah kawat tanah yang mempunyai titik pengetanahan pada setiap titik sepanjang kawat tanah sehingga potensialnya sepanjang kawat adalah nol. Pada kenyataannya tidak ada kawat ideal, jadi kawat tanah itu mempunyai beda tegangan tertentu terhadap tanah.

Pada pasal ini dibahas keadaan dengan satu kawat tanah dan tahanan kontak tiang sebesar R (gambar 3). Diasumsikan tidak terjadi pantulan pada ujung saluran. Bila gelombang tegangan yang timbul pada kawat 2 (kawat tanah) sebelum diketanahkan adalah V_2 , maka arus yang melalui impedansi setelah diketanahkan dengan tahanan R adalah

$$I_2 = \frac{V_2}{R + (Z_{22}/2)} \tag{18}$$



Gambar 3 Saluran dengan satu kawat tanah

dengan

V_2 = tegangan induksi pada kawat 2 sebelum di ketanahkan

Z_{22} = impedansi surja kawat 2

R = tanah kontak ke tanah

I_2 = arus yang mengalir pada hubungan ke tanah.

Arus ini memberikan kenaikan pada gelombang tegangan pada kawat fasa 1 sebesar ΔV_2 , yaitu:

$$\Delta V_2 = Z_{12} \left(-\frac{I_2}{2} \right) = -\frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} V_2 \quad (19)$$

dengan Z_{12} = impedansi surja bersama kawat tanah dengan kawat fasa.

Jadi besar tegangan pada kawat fasa 1 setelah kawat tanah 2 diketanahkan,

$$V_1' = V_1^\bullet + \Delta V_2 \quad \text{atau}$$

$$V_1' = V_1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} V_2 \quad (20)$$

Jadi Faktor Perisaian (FP) adalah

$$FP = \frac{V_1'}{V_1} = 1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{V_2}{V_1} \quad (21)$$

dengan

V_1' = tegangan induksi pada kawat 1 setelah kehadiran kawat tanah 2

V_1 = tegangan induksi pada kawat 1 sebelum kehadiran kawat tanah 2.

Karena tegangan induksi sebelum diketanahkan sebanding dengan tinggi kawat di atas tanah, atau $(V_2/V_1) = (h_2/h_1)$, maka persamaan (21) menjadi

$$FP = 1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{h_2}{h_1} \quad (22)$$

dan persamaan (20) menjadi

$$V_1' = \left(1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{h_2}{h_1} \right) V_1 \quad (23)$$

Dalam persamaan (22) dan (23),

h_1 = tinggi rata-rata kawat fasa 1 di atas tanah

h_2 = tinggi rata-rata kawat tanah 2 di atas tanah.

Pada saluran fasa-tiga dengan empat kawat, yaitu tiga kawat fasa dan satu kawat netral, dan tidak ada kawat tanah, maka pengaruh kawat netral itu terhadap tegangan induksi pada kawat fasa sama seperti pengaruh kawat tanah

pada tegangan induksi pada kawat fasa. Dalam hal ini, tinggi kawat netral di atas tanah h_2 lebih rendah dari tinggi kawat fasa h_1 sehingga besar faktor perisaian lebih besar dibandingkan faktor perisaian dari saluran dengan kawat tanah.

Ada kalanya kawat netral itu dipasang di atas kawat fasa, sama seperti kedudukan kawat tanah. Dalam hal ini faktor perisaian akan lebih kecil, jadi lebih baik. Tetapi kawat netral yang dipasang di atas kawat fasa akan mempertinggi tiang dan dengan demikian akan memperbesar jumlah sambaran langsung.

Bila di samping kawat netral yang dipasang di bawah kawat fasa ada kawat tanah yang dipasang di atas kawat fasa, persamaan (23) tetap dapat digunakan. Dalam hal terakhir ini Z_{12} dan Z_{22} harus dihitung untuk kawat gabungan kawat tanah dan kawat netral dengan tinggi ekuivalen dari kawat gabungan itu.

Perhitungan jumlah gangguan kilat akibat sambaran induksi

Pandanglah suatu kawat setinggi h di atas tanah. Misalkanlah suatu sambaran kilat vertikal menyambar tanah pada jarak y dari kawat (gambar 4).

Besar tegangan induksi pada kawat diberikan oleh persamaan (17), yaitu

$$V_i = \frac{30 I_0 h}{y} \tag{17}$$

dengan

V_i = tegangan induksi pada kawat (kv)

I_0 = besar arus kilat (kA)

h = tinggi rata-rata kawat di atas tanah (m)

y = jarak horisontal antara sambaran kilat dengan kawat (m)

Bila saluran itu dilengkapi dengan kawat tanah, maka besar tegangan induksi pada kawat fasa diberikan oleh persamaan (23), yaitu

$$V_i' = \left(1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{h_2}{h_1}\right) V_i \tag{23}$$

dengan

V_i' = tegangan induksi pada kawat fasa dengan kawat tanah (kv)

V_i = tegangan induksi pada kawat fasa tanpa kawat tanah (kv)

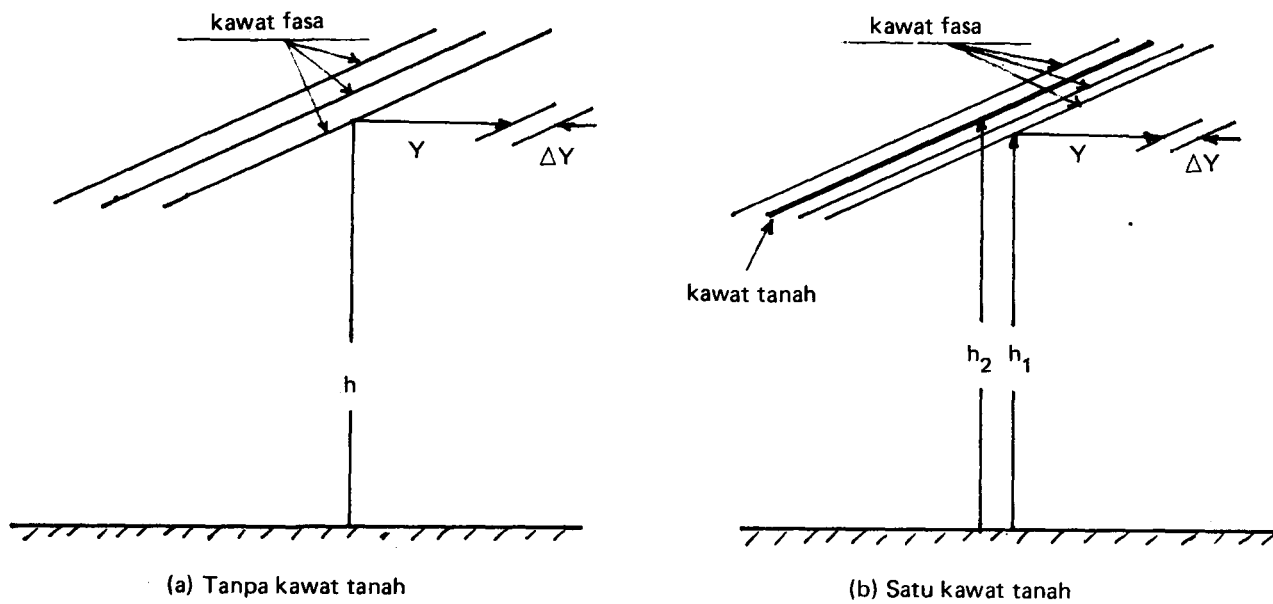
Z_{22} = impedansi surja sendiri kawat tanah 2 (ohm)

Z_{12} = impedansi surja bersama antara kawat tanah 2 dan kawat fasa 1 (ohm)

h_1 = tinggi rata-rata kawat fasa 1 di atas tanah (m)

h_2 = tinggi rata-rata kawat tanah 2 di atas tanah (m)

R = tahanan kontak tiang (ohm).



Gambar 4 Saluran udara tegangan menengah.

Jumlah sambaran pada daerah Δy untuk panjang 100 km saluran (gambar 4a),
 $\Delta N = 0,015 IKL \Delta y$ (24)

Menurut persamaan (17), besar tegangan induksi pada kawat,

$$V_i = \frac{30 I_0 h}{y}$$

Supaya tegangan induksi sama atau melebihi ketahanan impuls isolasi $V_{50\%}$,

$$I_0 \geq \frac{V_{50\%}}{30h} y$$
 (25)

Probabilitas arus yang demikian diperoleh dari persamaan (8), yaitu

$$P_{I_0} = e^{-\left(\frac{I_0}{34}\right)} \quad (8)$$

atau probabilitas terjadinya lompatan api,

$$P_{FL} = e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{1020h} y\right)} \quad (26)$$

Jadi, jumlah sambaran pada bidang Δy yang dapat menimbulkan tegangan melebihi $V_{50\%}$ adalah

$$\Delta N_{FL} = 0,015 IKL e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{1020} \times \frac{y}{h}\right)} \Delta y \quad (27)$$

Bila Δy dibuat kecil sekali, Δy berubah menjadi dy dan ΔN_{FL} berubah menjadi dN_{FL} , dan setelah dilakukan integrasi dari y_{min} ($= 2h^{1,09}$) sampai y_{maks} ($=$ tak terhingga), untuk kedua sisi saluran diperoleh

$$N_{FL} = 2 \cdot \int_{2h^{1,09}}^{\infty} 0,015 IKL e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{1020h} y\right)} dy$$

atau

$$N_{FL} = 30,6 IKL h \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510} h^{0,09}\right)}}{V_{50\%}} \quad (28)$$

Persamaan (28) adalah untuk keadaan tidak ada kawat tanah. Bila ada kawat tanah, maka menurut persamaan (23),

$$\begin{aligned} V_i' &= FP V_i \\ &= FP \times \frac{30 I_0 h}{y} \end{aligned}$$

dengan

FP = Faktor Perisaian, persamaan (22)

$$= \left(1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \cdot \frac{h_2}{h_1}\right)$$

Jadi, jumlah lompatan api adalah

$$N_{FL} = 30,6 IKL.FP.h \cdot \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510 FP} h^{0,99}\right)}}{V_{50\%}} \quad (29)$$

Sebagaimana dijelaskan di muka tidak semua lompatan api dapat beralih menjadi busur api atau gangguan, dan besarnya gangguan itu tergantung pada besarnya probabilitas η . Dengan demikian jumlah gangguan akibat sambaran induksi adalah

a. Tanpa kawat tanah:

$$N_i = 30,6 IKL h \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510} h^{0,99}\right)}}{V_{50\%}} \times \eta \quad (30)$$

gangguan per 100 km per tahun

b. Dengan kawat tanah:

$$N_i = 30,6 IKL.FP.h \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510 FP} h^{0,99}\right)}}{V_{50\%}} \times \eta \quad (31)$$

gangguan per 100 km per tahun.

Persamaan (31) berlaku juga untuk sistem distribusi fasa tiga dengan kawat netral tanpa kawat tanah.

Perhitungan gangguan kilat akibat sambaran langsung

Umum

Tegangan lebih akibat sambaran kilat, selain tergantung pada parameter kilat (arus puncak dan waktu muka), juga dipengaruhi oleh jenis saluran dan tiang penopang. Jenis saluran adalah saluran tanpa kawat tanah dan saluran dengan kawat tanah, dan jenis tiang penopang adalah tiang besi, tiang kayu, dan tiang beton. Tiang kayu atau beton, demikian juga lengan (*cross arm*) kayu mempengaruhi besarnya tingkat ketahanan impuls isolasi saluran.

Perhitungan-perhitungan dilakukan berdasarkan jenis tiang dan lengan besi. Pengaruh penambahan tingkat ketahanan isolasi dari kayu atau beton dapat ditambahkan kepada tingkat ketahanan impuls isolasi dari isolator.

Tahanan kontak tiang pada tiang-tiang yang diketanahkan mempengaruhi juga tegangan yang timbul pada isolator saluran. Dalam perhitungan, besar tahanan kontak tiang yang diketanahkan diambil 20 ohm, tiang besi yang tidak diketanahkan 100 ohm, dan tiang beton yang tidak diketanahkan 500 ohm.

Pada sambaran ke kawat fasa untuk saluran tanpa kawat tanah hanya ditinjau arus puncak kilat, sedang pada sambaran ke kawat tanah pada saluran dengan kawat tanah, kedua parameter kilat, arus puncak, dan waktu muka gelombang, diperhitungkan.

Seperti disebut di muka, dimisalkan bahwa pada saluran dengan kawat tanah tidak ada kegagalan perisaian karena tinggi saluran di atas tanah relatif rendah (± 10 meter) dan juga karena sudut perisaian biasanya tidak terlalu besar (di bawah 60°).

Pada pasal-pasal di bawah ini akan dibahas saluran tanpa kawat tanah dan saluran dengan kawat tanah. Pengaruh tiang beton atau tiang kayu pada jumlah gangguan akan disinggung juga.

Saluran tanpa kawat tanah

Parameter sambaran kilat yang berpengaruh jika terjadi sambaran kilat pada saluran tanpa kawat tanah adalah arus puncaknya, sedangkan pengaruh kecuraman arus dapat diabaikan. Pada saluran tanpa kawat tanah, sebagian besar sambaran kilat terjadi pada konduktor, sementara sambaran langsung pada tiang jarang terjadi. Pada saluran dengan kawat tanah dapat dianggap semua sambaran terjadi pada tiang atau dekat tiang.

Selama terjadi sambaran pada kawat, suatu impedansi yang sama dengan setengah dari impedansi surja kawat $Z_p/2$ dihubungkan pada tempat sambaran. Besar arus kilat pada tempat sambaran (gambar 5) adalah

$$I = I_0 \frac{Z_k}{Z_k + \frac{Z_p}{2}} \quad (32)$$

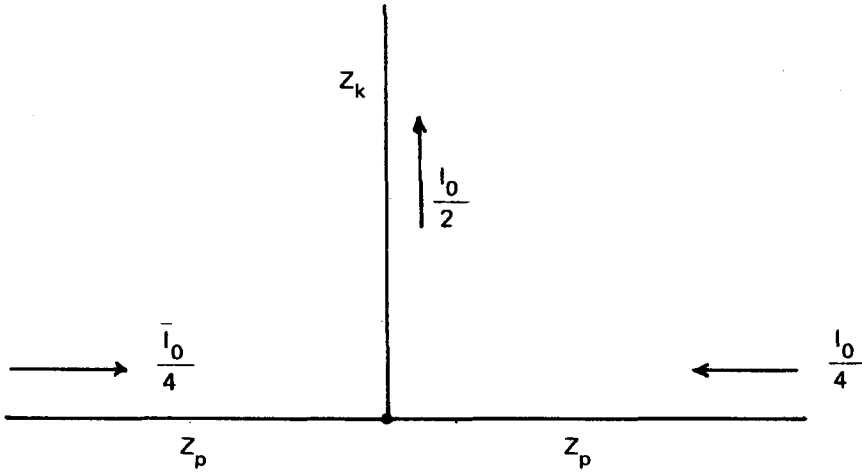
dengan

I = besar arus kilat pada tempat tersambar

I_0 = arus kilat bila kilat menyambar sesuatu objek dengan tahanan nol (*zero resistance ground*)

Z_k = impedansi surja kanal kilat

Z_p = impedansi surja kawat.



Gambar 5 Distribusi arus bila kilat menyambar kawat

Sebagai pendekatan, umumnya diambil $Z_k = Z_p/2$ sehingga persamaan (32) menjadi

$$I = I_0/2 \quad (33)$$

Karena itu, pada tiap sisi dari titik sambaran, besarnya arus adalah $I_0/4$ dan besarnya tegangan yang timbul pada kawat adalah

$$V_p = \frac{I_0}{4} Z_p \quad (34)$$

Untuk menentukan probabilitas lompatan api, tegangan pada persamaan (34) dibandingkan dengan kekuatan isolasi dari semua jalan yang mungkin dari lompatan api isolasi saluran,

$$\frac{I_0}{4} Z_p \geq V_{50\%} \quad (35)$$

Probabilitas arus sama atau melebihi I_0 , atau probabilitas terjadinya lompatan api,

$$P_{FL} = e^{-\frac{I_0}{34}} \\ = e^{-\frac{V_{50\%}}{8,5 Z_p}}$$

Jumlah sambaran kilat pada saluran diberikan pada persamaan (5), yaitu

$$N_L = 0,015 IKL (b + 4 h^{1,09}) \quad (5)$$

sambaran per100 km per tahun

Jumlah lompatan api adalah jumlah sambaran dikalikan probabilitas arus yang sama dengan atau melebihi arus I_0 yang dapat menimbulkan lompatan api,

$$N_{FL} = 0,015 IKL (b + 4 h^{1,09}) e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{8,5 Z_p}\right)}$$

Selanjutnya, bila probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api (*power arc* atau *power follow*) η , maka jumlah gangguan adalah

$$N_t = N_{FL} \times \eta = N_L P_{FL} \eta$$

atau

$$N_t = 0,015 IKL (b + 4 h^{1,09}) e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{8,5 Z_p}\right)} \times \eta \tag{36}$$

Pada saluran udara dengan konfigurasi horisontal hampir semua sambaran terjadi pada kawat yang paling pinggir, sedang pada konfigurasi vertikal pada kawat paling atas.

Pengaruh tiang beton menambah tingkat ketahanan isolasi beberapa puluh kV , dan ini dapat ditambahkan kepada $V_{50\%}$ dari isolator saluran. Tegangan tembus beton basah diambil $20 kV/cm$.

Pada sistem yang netralnya tidak diketanahkan atau pada sistem yang diketanahkan dengan kumparan Petersen dengan derajat tala sempurna, bahkan pada saluran yang menggunakan tiang kayu lompatan api pada satu fasa tidak dapat mengakibatkan gangguan saluran. Jadi, probabilitas gangguan yang terjadi adalah gangguan fasa ke fasa atau gangguan tiga fasa.

Bila pelepasan kilat terjadi pada kawat dekat tiang, arus kilat penuh sebesar yang diperoleh pada objek yang diketanahkan secara sempurna, atau tahanan $R = 0$, mulai mengalir melalui tahanan kontak tiang R dan badan tiang memperoleh tegangan hampir sama dengan $I_0 R$. Kawat yang disambar kilat juga mengalami tegangan sama dengan $I_0 R$, dan tegangan induksi pada kawat disebaliknya menjadi

$$K I_0 R$$

dengan K = faktor gandeng antara kawat luar dan kawat di tengah.

Dalam keadaan ini tegangan yang bekerja pada isolasi kawat kedua adalah

$$I_0 R (1 - K) \tag{37}$$

Lompatan api pada isolasi itu akan terjadi bila

$$I_0 R (1 - K) \geq V_{50\%}$$

atau

$$I_0 \geq \frac{V_{50\%}}{R(1-K)} \quad (38)$$

Jadi, jumlah gangguan fasa ke fasa,

$$N_t = 0,015 IKL (b + 4 h^{1,09}) e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{R(1-K)}\right)^{34}} \times \eta \quad (39)$$

Saluran dengan kawat tanah

Seperti diketahui, pemasangan kawat tanah bertujuan untuk melindungi kawat fasa dari sambaran langsung kilat.

Seperti telah disebutkan, di sini dianggap semua sambaran mengenai kawat tanah pada atau dekat tiang, baik tiang yang diketanahkan maupun tiang yang tidak diketanahkan. Jumlah sambaran pada tiang yang diketanahkan diambil sama dengan jumlah sambaran pada tiang yang tidak diketanahkan.

Juga telah disebutkan bahwa tiang yang diketanahkan mempunyai tahanan kontak rata-rata 20 ohm, tiang besi yang tidak diketanahkan mempunyai tahanan kontak 100 ohm, dan tiang beton yang tidak diketanahkan 500 ohm.

Untuk sambaran pada tiang, kilat seolah-olah menemui impedansi surja kawat tanah dan impedansi surja tiang yang terhubung paralel. Setelah kilat menyambar tiang, gelombang merambat ke dasar tiang. Pada dasar tiang terjadi pantulan dan gelombang pantulan ini merambat ke puncak tiang, tempat ia dipantulkan kembali. Jadi, pada tiang terjadi pantulan ulang.

Sudah jelas perhitungan tersebut sangat banyak dan memakan waktu yang sangat lama (Hutauruk, 1965). Karena itu, dan karena jumlah gangguan pada SUTM akibat kilat tinggi dan juga tidak dibutuhkan perhitungan yang sangat teliti, maka rumus yang diusulkan oleh Razevig (1979) di bawah ini sudah cukup memadai.

$$I_0 = \frac{V_{50\%}}{R + \delta h_t} \quad (40)$$

dengan

I_0 = arus kilat minimum yang mengakibatkan lompatan api, kA

$V_{50\%}$ = kekuatan isolasi minimum, kV

R = tahanan kontak tiang, ohm

y = koefisien yang ditentukan pada dasar perbandingan dengan hasil-hasil perhitungan menurut rumus yang lebih teliti

= 0,3 untuk satu kawat tanah

= 0,15 untuk dua kawat tanah

h_t = tinggi kawat tanah di atas tanah, meter.

Dengan mengetahui besar arus minimum yang dapat menimbulkan lompatan api balik (*back flashover*), dapat dicari probabilitas terjadinya lompatan api, yaitu,

$$P_{FL} = e^{-\frac{V_{50\%}}{(R + \delta h_t)^{34}}}$$

Jadi, jumlah gangguan akibat sambaran kilat langsung pada kawat tanah,

$$N_t = N_L P_{FL} \eta$$

$$= 0,015 IKL (b + 4 h^{1,09}) e^{-\frac{V_{50\%}}{(R + \delta h_t)^{34}}} \times \eta \quad (41)$$

dengan η probabilitas peralihan dari lompatan api menjadi busur api yang menyebabkan gangguan.

Besarnya probabilitas lompatan api balik pada sambaran ke tiang yang diketanahkan tergantung pada tahanan kontak tiang. Pada tiang yang tidak diketanahkan, karena tahanan kontak tiang besar, maka hampir semua sambaran kilat pada tiang yang tidak diketanahkan itu akan menyebabkan lompatan api balik.

5 Gangguan kilat total pada saluran tegangan menengah

Setelah membicarakan sambaran induksi dan sambaran langsung pada kawat fasa atau kawat tanah pada pasal-pasal yang lalu, sekarang kita telah siap untuk menghitung jumlah gangguan pada saluran udara tegangan menengah akibat sambaran kilat,

$$N_0 = N_i + N_t \quad (1)$$

dengan

N_0 = jumlah gangguan kilat

N_i = jumlah gangguan akibat sambaran induksi

N_t = jumlah gangguan akibat sambaran langsung.

Gangguan kilat akibat sambaran induksi diberikan oleh persamaan (30) dan (31), berturut-turut untuk saluran tanpa kawat tanah dan dengan kawat tanah, yang ditulis kembali di bawah ini:

i) Tanpa kawat tanah:

$$N_i = 30,6 IKL \cdot h \cdot \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510} h^{0,09}\right)}}{V_{50\%}} \times \eta \quad (30)$$

ii) Dengan satu kawat tanah:

$$N_t = 30,6 \text{ IKL} \cdot FP \cdot h_t \cdot \frac{e^{-\left(\frac{V_{50\%}}{510 FP} h_t^{0,09}\right)}}{V_{50\%}} \times \eta \quad (31)$$

Dalam persamaan (30) dan (31),

IKL = jumlah hari guruh per tahun

h = tinggi kawat fasa di atas tanah, meter

h_t = tinggi kawat tanah di atas tanah, meter

FP = faktor perisaian, persamaan (22)

η = probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api atau gangguan.

Gangguan kilat akibat sambaran langsung diberikan oleh persamaan (36), (39), dan (41), yaitu:

i) Saluran tanpa kawat tanah:

$$N_t = 0,015 \text{ IKL} (b + 4 h^{1,09}) e^{-\frac{V_{50\%}}{8,5 Z_p}} \times \eta \quad (36)$$

yaitu untuk gangguan satu fasa ke tanah. Untuk gangguan fasa ke fasa,

$$N_t = 0,015 \text{ IKL} (b + 4 h^{1,09}) e^{-\frac{V_{50\%}}{R(1-K) 34}} \times \eta \quad (39)$$

ii) Saluran dengan satu kawat tanah ($b = 0$),

$$N_t = 0,015 \text{ IKL} (4 h_t^{1,09}) e^{-\frac{V_{50\%}}{(R + \delta h_t) 34}} \times \eta \quad (41)$$

Contoh perhitungan gangguan kilat

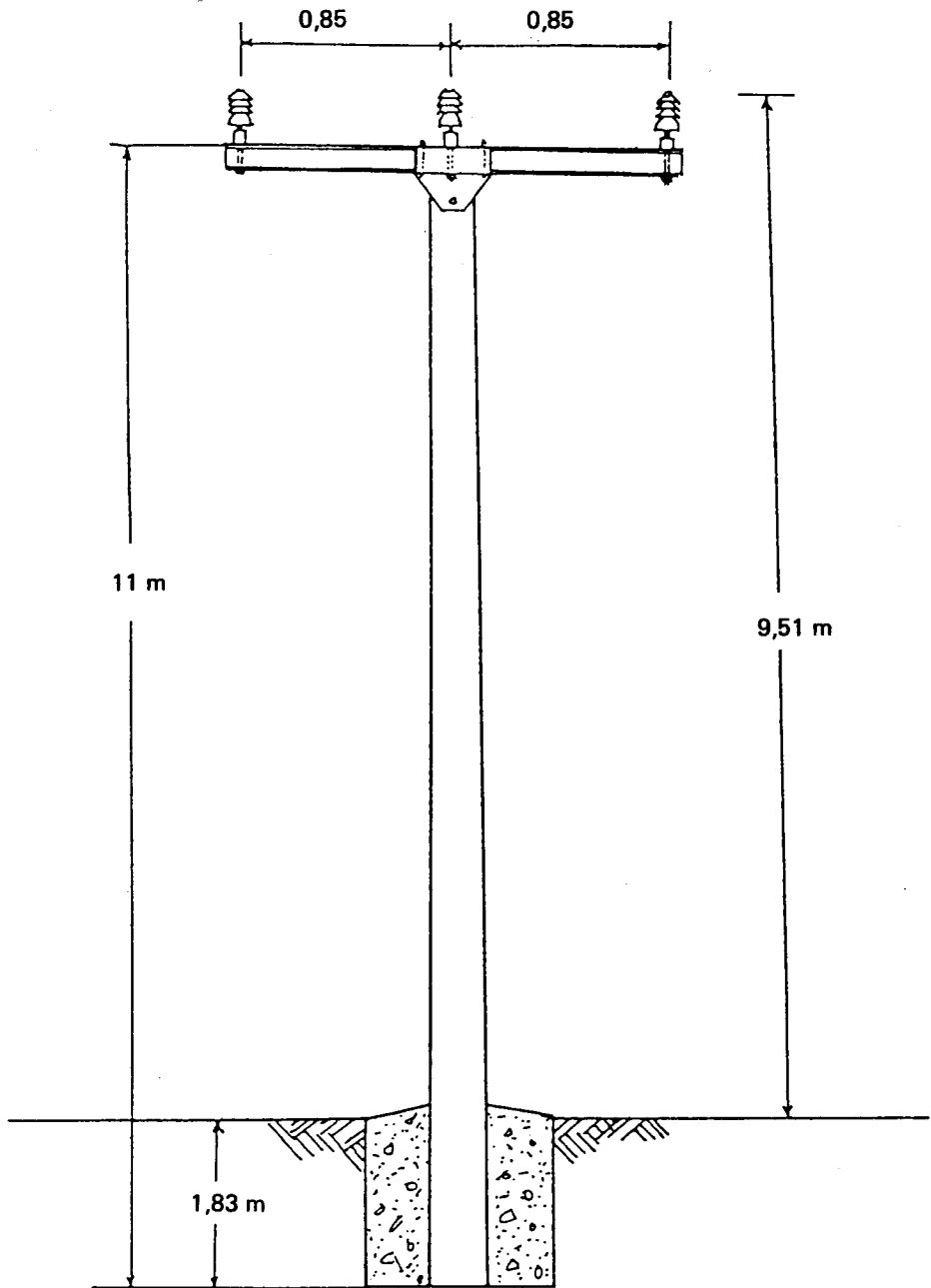
Di sini akan dihitung jumlah gangguan kilat pada tiga macam konfigurasi tiang, yaitu SUTM tanpa kawat tanah (gambar 6), SUTM dengan kawat netral (gambar 7) dan dengan kawat tanah (gambar 8). Semua ukuran diberikan juga pada gambar-gambar tersebut.

Tahanan kontak tiang adalah:

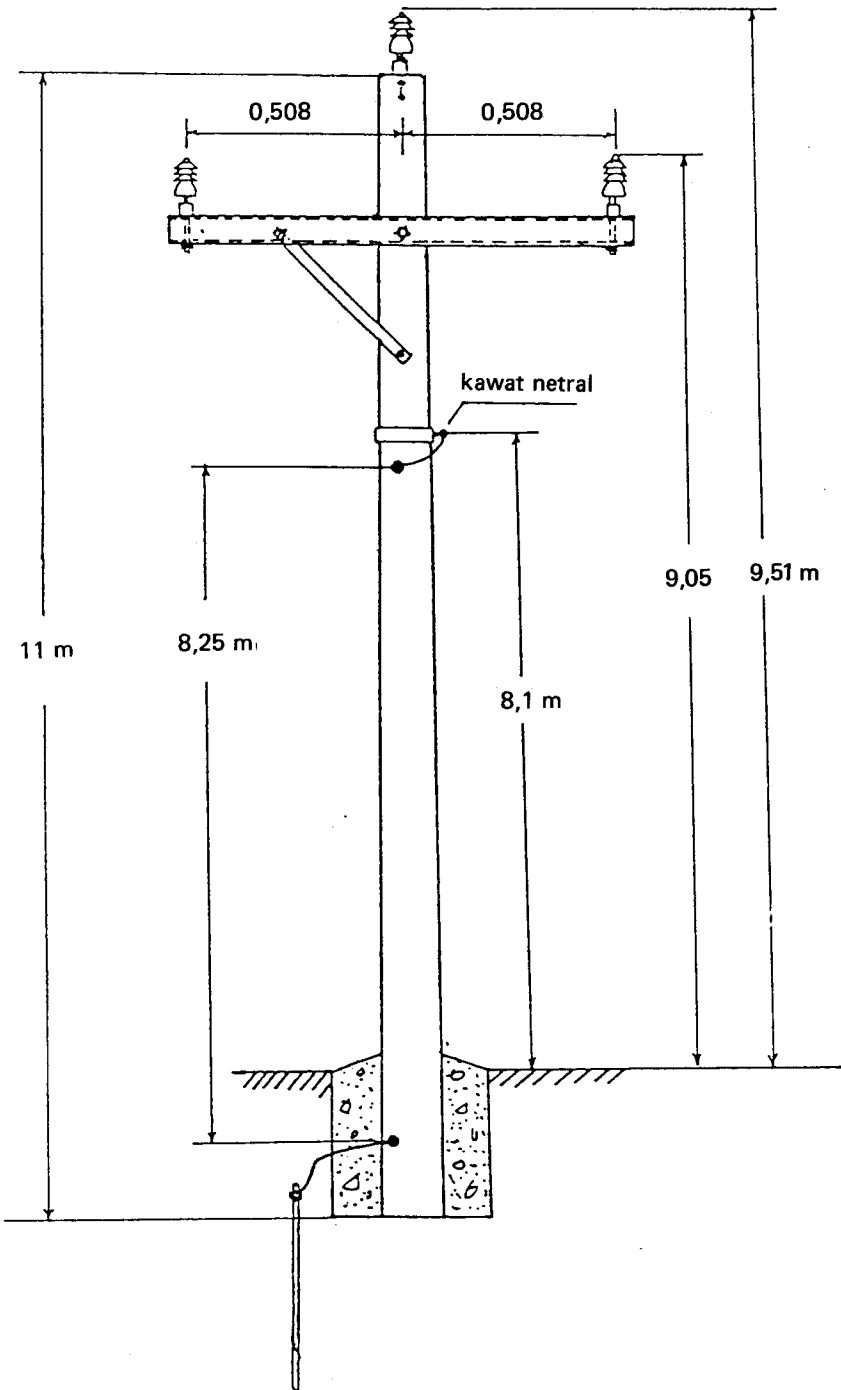
$R = 20$ ohm untuk tiang besi atau beton yang diketanahkan.

$R = 100$ ohm untuk tiang besi yang tidak diketanahkan.

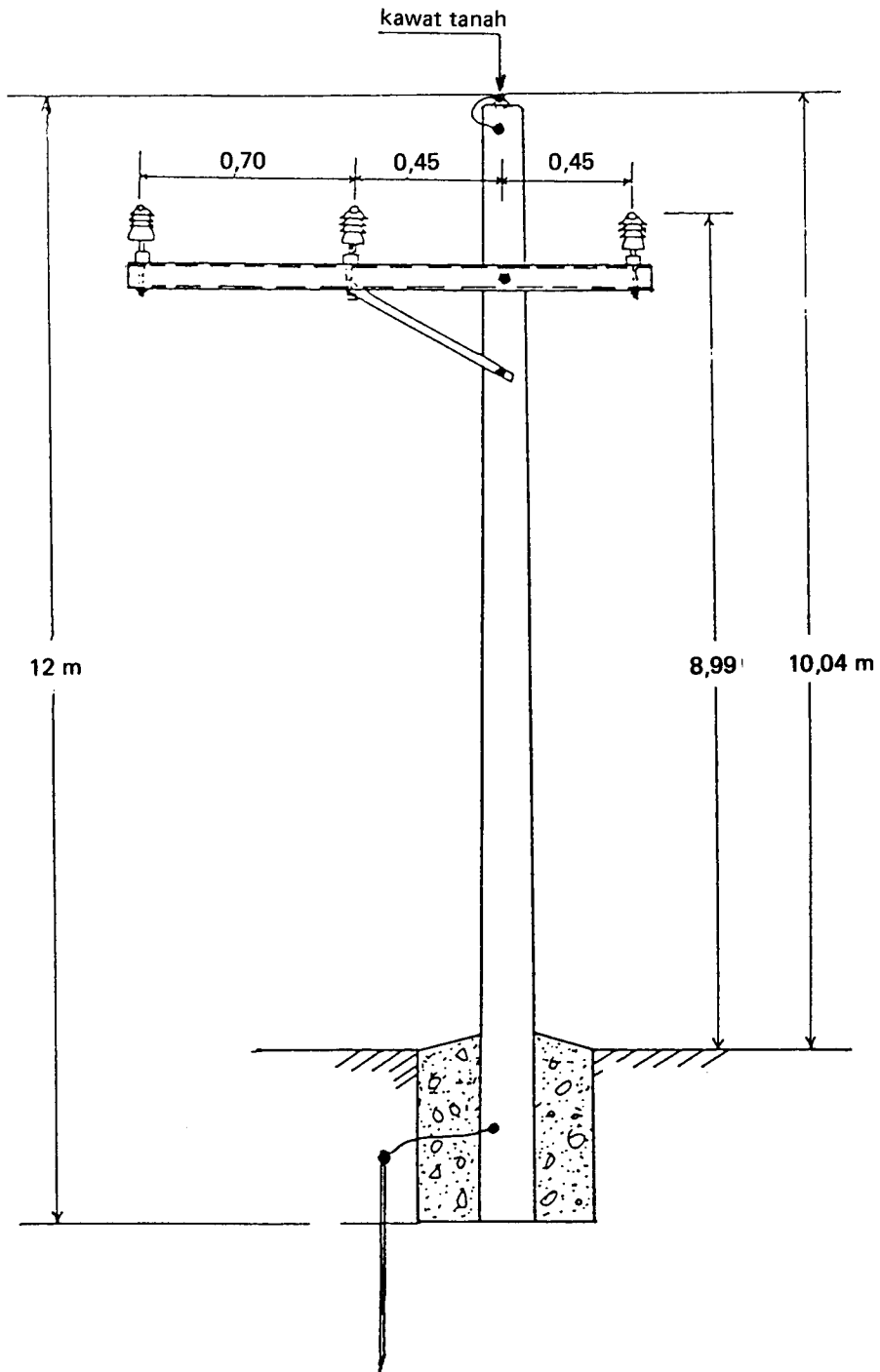
$R = 500$ ohm untuk tiang beton yang tidak diketanahkan.



Gambar 6 Konfigurasi tiang beton SUTM tanpa kawat tanah.



Gambar 7 Konfigurasi tiang beton SUTM dengan kawat netral.



Gambar 8 Konfigurasi tiang beton SUTM dengan kawat tanah.

Tabel 3 Hasil perhitungan gangguan kilat untuk tiga macam konfigurasi tiang (IKL = 100)

Macam tiang	Macam gangguan	Jumlah gangguan untuk konfigurasi tiang			Keterangan
		Tiang Gbr.6	Tiang Gbr.7	Tiang Gbr.8	
Tiang besi	Ni	62	32	38	
	Nt	35	34	32	
	No	97	66	70	
Tiang beton	Ni	39	19	22	
	Nt	34	33	32	
	No	73	52	54	

Catatan:

N_i = jumlah gangguan kilat akibat sambaran induksi per 100 km-tahun.

N_t = jumlah gangguan kilat akibat sambaran langsung per 100 km-tahun.

N_0 = jumlah gangguan kilat pada saluran per 100 km-tahun.

Impedansi surja sendiri kawat netral atau kawat tanah diambil $Z_{22} = 500$ ohm.

Impedansi surja bersama antara kawat fasa dan kawat netral (gambar 7), $Z_{12} = 216$ ohm, dan impedansi surja antara kawat fasa dan kawat tanah (gambar 8), $Z_{12} = 150$ ohm. Ketahanan impuls isolasi isolator $V_{50\%} = 160$ kV, tegangan tembus beton = 20 kV/cm, dan tebal beton pada tutup atas dan tutup bawah diambil masing-masing 1,5 cm. Perhitungan dilakukan untuk tiang besi dan tiang beton. Probabilitas peralihan lompatan api menjadi busur api, $\eta = 0,5$.

Hasil perhitungan gangguan kilat untuk ketiga macam konfigurasi tiang diberikan dalam tabel 3.

Kesimpulan dan saran

Dari pembahasan dan contoh perhitungan yang telah dilakukan dapatlah ditarik kesimpulan di bawah ini:

- 1 Metode perhitungan untuk menentukan jumlah gangguan kilat pada saluran udara tegangan menengah telah dibahas. Metode tersebut sangat sederhana dan hasilnya diharapkan cukup memadai untuk saluran tegangan menengah.
- 2 Jumlah gangguan kilat induksi lebih banyak dari gangguan kilat langsung pada saluran tanpa kawat netral atau saluran tanpa kawat tanah.
- 3 Kawat netral atau kawat tanah mengurangi gangguan kilat induksi sampai kira-kira 50%.

- 4 Kawat netral atau kawat tanah praktis tidak dapat mengurangi gangguan kilat langsung.
- 5 Untuk memperoleh hasil yang lebih teliti perlu diteliti tahanan kontak tiang yang tidak diketanahkan.

RUJUKAN

- Anderson, J.G., *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*, Electric Power Research Institute, 2nd. ed., Chapter 12, 1982.
- Auer, G. G. dkk., *Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution Circuits, Part I: Model Study and Analysis*, *IEEE*, Vol. PAS 88, No. 8, August 1969, pp. 1232–38.
- Ibid, *Part II: Application and Evaluation*, *IEEE*, Vol. PAS - 88, No. 8, August 1969, pp. 1239–47.
- Bewly, L.V., *Traveling Waves on Transmission Systems* 2nd. ed., John Wiley, New York, 1951.
- Eriksson, A.J., M.F, Stringfellow and D.V, *Meal Lightning Induced Overvoltages on Overhead Lines*, *IEEE*, Vol. PAS - 101, No. 4, April 1982, pp. 960–67.
- Hutauruk, T.S., *Metode untuk Menghitung Gangguan Kilat pada Kawat Transmisi Tegangan Tinggi*, *Proceedings ITB*, Vol. 3, No. 3, 1965.
- Popolansky, F., *Measurement of Lightning Currents in Czechoslovakia and the Application of Obtained Parameters in the Prediction of Lightning Outages of EHV Transmission Lines*, Paris, CIGRE, 1970, Report 33–03, Vol. 2.
- Razevig, D.V., *High Voltage Engineering*, Kahnna Publisers Delhi, 1979.
- Rusck, S., *Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over voltage Protection of Low Voltage Networks*, *Trans. of Chalmers University of Technology Stockholm, Swedia*, 1958.
- Uehara, Ken and Genichi Ohwa, *Investigation of Lightning Damages on Distribution Lines*, *IEEE*, Vol. PAS - 87, No. 4, April 1968, pp. 1018–25.
- Whitehead, E.R., *Protection of Transmission Lines Lightning*, Vol. 2 Edited by R.H. Golde, Academic Press, New York, 1977.