

Pengaruh Sambaran Petir Langsung pada Variasi Ketinggian Menara Vertikal terhadap Tegangan Induksi yang Dirasakan oleh Jaringan Distribusi Disekitarnya

Budi Utama

Jurusan Teknik Elektro STTNAS
Jl. Babarsari Yogyakarta

ABSTRACT

If the top of telecommunication towers or radio or television have been struck by a lightning, distribution lines in the vicinity of those would immediately underwent an induced overvoltage impuls. Magnitude of the induced voltage impuls depend on how tall the tower above ground. Such lightning stroke is type of an indirect lightning stroke which is always appear in the problem of the induced overvoltage phenomenon on overhead distribution lines. Examinant of the effects of various height of the tower and the distance parameter between the tower and the route of distribution line on rate of rise of the induced voltage of the lightning is undertaken in this paper, and the computer is as its simulator.

The method of the simulation of a lightning stroke in the vicinity of distribution line and its formulation is adopted from a simulation model that has been proposed by Ishii et al. (1994) and Eriksson et al (1982) respectively.

The result of the simulation show that presence of a vertical tower structure in the vicinity of the distribution line route will result in a lower induced voltage (on the order of 13.4 %), and effect of tower height parameter is very significant for the assumed conditions. It is proposed that this significant parameter be studied extensively in order to predict the induced voltage accurately.

Keywords : lightning-stroke, tower, induce-voltage, distribution-line.

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan dan jumlah jaringan telfon selular yang semakin banyak maka menara (*tower*) untuk pemancar / penerima sinyal yang dikeluarkan oleh telfon-selular semakin banyak dibangun di beberapa tempat. Pembangunan menara ini kadang kala sering bermunculan dekat dengan rute dari jaringan distribusi 20 kV. Fenomena ini dapat dilihat pada ruas-ruas jalan protokol yang sering ditemui dimana menara penguat sinyal telfon selular ini selalu berseberangan dengan lintasan jaringan distribusi udara (*overhead distribution line*). Ketika terjadi sambaran petir langsung di puncak menara ini, maka jaringan distribusi yang melintasi didekatnya akan merasakan responnya secara induksi.

Berdasarkan pengalaman dilapangan yang terjadi bahwa jaringan distribusi sangat rawan terhadap sambaran petir tak langsung. Penelitian (simulasi) ini akan mencoba menguji pengaruh parameter ketinggian menara dan para meter jarak axis terhadap rute saluran distribusi sesaat pasca-sambaran petir terhadap tegangan induksi yang di munculkannya. Tegangan induksi ini akan diamati fluktuasinya terhadap ketinggian menara dan jarak axis yang bervariasi. Akan dikaji sampai seberapa besar tegangan induksi terakumulasi di dalam saluran distribusi disekitar menara vertikal, ketika sebuah sambaran petir mengenai puncak menara vertikal tersebut, dengan ketinggian menara dan jarak axisnya terhadap rute saluran distribusi sebagai parameter. Di dalam penelitian ini,

perhitungan tegangan induksi dikerjakan dengan menggunakan formulasi yang telah dikerjakan oleh Eriksson, dkk (1982) untuk menentukan magnitud tegangan induksi di saluran distribusi pada beberapa posisi titik yang diinginkan pada konduktor phasanya.

2. Fundamental

Tegangan induksi yang terjadi pada saluran distribusi dapat dihitung dengan menggunakan formulasi yang dikenalkan oleh Eriksson, dkk (1982). Mekanisme tegangan induksi, juga melibatkan beberapa parameter alam dan perancang (*desainer*). Kedua parameter ini mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap tegangan induksi yang dimunculkan oleh sambaran petir tak langsung terhadap saluran distribusi disekitarnya. Chowdhuri (1990) telah menghitung tegangan induksi pada saluran transmisi. Parameter yang dilibatkan lebih banyak.

Hasil perhitungan yang diperoleh adalah bahwa tegangan induksi yang dirasakan oleh saluran transmisi dipengaruhi oleh ketinggian awan, jumlah konduktor, dan kecepatan sambaran petir. Suatu sambaran petir dapat menimbulkan tiga fenomena, yaitu fenomena elektrostatik, induksi dan fenomena radiasi gelombang elektromagnetik (Sorwar dan Gosling, 1999). Proses induksi diakibatkan oleh pengaruh medium udara sebagai media perambatan gelombang medan elektro magnetik yang ditimbulkan oleh kanal sambaran petir. Gelombang ini merambat sebesar 30 % dari kecepatan cahaya.

Ketinggian objek struktur menara, yang berada disekitar saluran distribusi, juga akan ikut menentukan nilai tegangan induksi petir yang dirasakan oleh jaringan distribusi tersebut. Saluran distribusi yang pada posisi kanan dan kirinya terdapat bangunan menara/tiang vertikal, maka tegangan yang terinduksi ke dalam saluran distribusi sangat dipengaruhi oleh parameter ketinggian dan struktur menara (*tower*) atau tiang (*mast*). Parameter utama untuk proses induksi adalah komponen elektro statik ($\bar{E}ei$) dan komponen magnetik dari medan listriknya ($\bar{E}mi$). Dua komponen ini berperan besar dalam

mengkontribusikan tegangan induksi di dalam ruang.

Besar medan induksi keseluruhan dalam komposisi sistem koordinat ruang adalah (Chowdhuri, 1989),

$$\bar{E}i = \bar{E}ei + \bar{E}mi = -\nabla\phi - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (1)$$

ϕ adalah potensial skalar penginduksi (*inducing scalar potential*) yang ditimbulkan oleh muatan sambaran petir, dan \bar{A} adalah potensial vektor penginduksi (*inducing vector potential*). Potensial yang disebabkan oleh medan listrik $\bar{E}i$, yaitu medan listrik yang timbul pada celah antara sebuah titik di saluran dan sebuah titik di tanah dapat dihitung (Chowdhuri, 1989),

$$V = -\int_0^h \bar{E}i \cdot dz = -\bar{E}i \cdot h \cong \left(\nabla\phi + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) \cdot h \quad (2)$$

bagian ($\nabla\phi$) disebut potensial skalar induksi (*induced scalar potential*), dan bagian ($\partial \bar{A}/\partial t$) disebut potensial vektor penginduksi (*inducing vector potential*).

Eriksson (1982) telah mengerjakan proses differensial dan integral dari persamaan (1) dan (2) di atas dan sekaligus mendapatkan formulasi utuh secara keseluruhan untuk menghitung tegangan induksi pada sistem saluran distribusi udara. Bentuk formulasi yang dikerjakan oleh Eriksson dapat dilengkapi dengan fungsi yang bergerak secara diskrit berdasarkan gelombang *unit step* dengan bentuk geseran waktu diskritnya, yaitu ($t-t_0$).

$$U = Z_0 \cdot I \cdot h \cdot \beta \cdot \left\{ \frac{(c \cdot t - x)}{\left[y^2 + \beta^2 \cdot (c \cdot t - x)^2 \right]} \right\} \times \left\{ 1 + \frac{\left[\beta^2 \cdot (c \cdot t - x) + x \right]}{\sqrt{\left[\beta^2 \cdot c^2 \cdot t^2 + (1 - \beta^2) \cdot (x^2 + y^2) \right]}} \right\} \quad (3)$$

dengan, c adalah kecepatan cahaya (m/dtk),

$(\beta \cdot c)$ adalah kecepatan sambaran balik, biasanya β diambil 0.3, dan (I) adalah amplitudo arus sambaran balik dalam Amper atau kilo Amper (kA). Sedangkan Z_0 dihitung melalui,

$$Z_0 = \left(\frac{1}{4 \cdot \pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 30 \text{ Ohm} \quad (4)$$

Menurut Rusck (1977) bahwa tegangan induksi V dapat ditulis sbb,

$$V = U(x) + U(-x) \quad (5)$$

Karena memakai fungsi rambatan gelombang diskrit dengan waktu geseran (t-to), maka persamaan (5) dapat ditulis dalam bentuk,

$$V = [U(x) + U(-x)] \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

dengan, U(x) dicari melalui persamaan (3) sebagai fungsi (x) dan fungsi (-x) dengan satuan Volt atau kiloVolt, (t-to) fungsi unit step dengan waktu geseran to pada dimensi waktu (dalam mikro detik), t adalah waktu tinjauan yang diinginkan dalam mikro detik, dan to adalah waktu yang diperlukan gelombang elektromagnetik merambat dari (x₀, y₀) mencapai titik x, jadi:

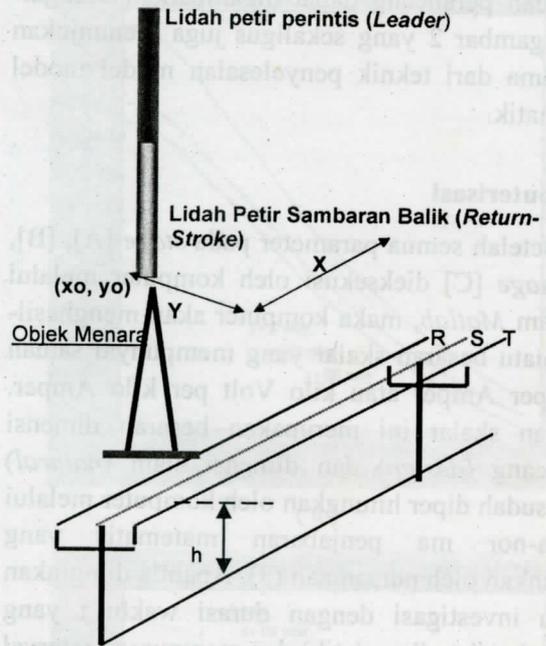
$$t_0 = \left(\frac{r}{c} \right) \quad (7)$$

dengan :

r = jarak resultan antara titik x dan y (meter)

c = kecepatan cahaya dalam ruang hampa

Ketinggian struktur menara divariasikan (dikondisikan) mulai dari 0 meter sampai dengan 115 meter. Menara memiliki impedans menara Z₀ untuk ketinggian 0 meter, dan Z₁₁₅ untuk ketinggian 115 meter. Bila petir menyambar puncak menara maka kawasan terdekat dengan menara akan berkontribusi tegangan elektrostatik dengan faktor kopling K_{menara}, dan kawasan sejauh Y akan menginduksikan tegangan induksi melalui parameter pada stage (A), (B), dan (C) gbr. 2. Tegangan induksi ini akan dirasakan oleh saluran distribusi sejauh -X meter dan + X meter. Pengaruh elektrostatik relatif sangat amat kecil dibandingkan dengan pengaruh induksi. Dengan demikian semua parameter pada menara untuk berkontribusi tegangan elektrostatik ke saluran distribusi tidak dirasakan sama sekali oleh saluran distribusi.

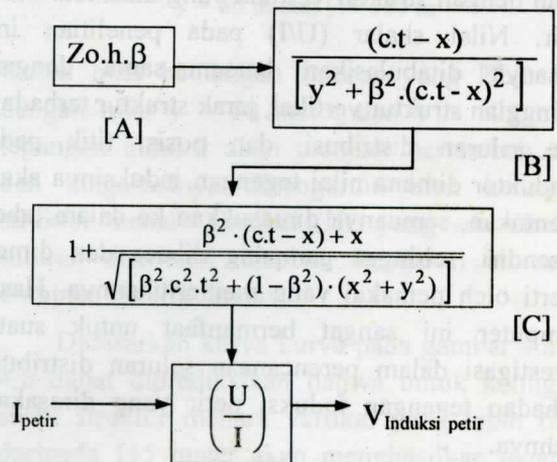


Gambar 1 Model geometris sambaran petir pada koordinat (x₀, y₀)

3. Metodologi

Model matematis

Untuk dapat menggunakan formulasi amplitudo arus petir yang beragam diperlukan modifikasi persamaan (3) dengan menge lompokkan besaran U dan I menjadi suatu besaran perbandingan (U/I). Sehingga hubungan antar parameter



Gambar 2. Algoritma simulasi untuk eksekusi dengan komputer

alam dan perancang dapat digambarkan sebagaimana gambar 2 yang sekaligus juga menunjukkan algoritma dari teknik penyelesaian model model matematik.

Komputerisasi

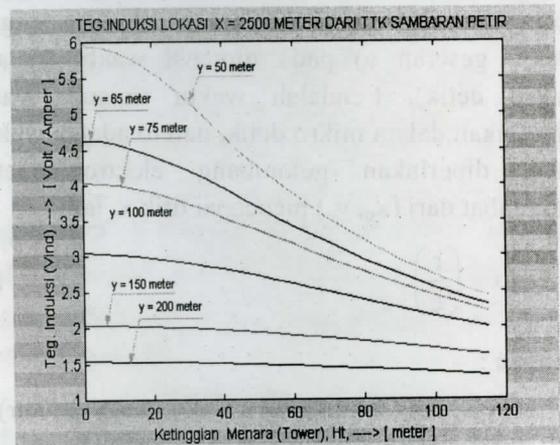
Setelah semua parameter pada *stage* [A], [B], dan *stage* [C] dieksekusi oleh komputer melalui program *Matlab*, maka komputer akan menghasilkan suatu besaran skalar yang mempunyai satuan Volt per Amper atau kilo Volt per kilo Amper. Besaran skalar ini merupakan besaran dimensi perancang (*design*) dan dimensi alam (*natural*) yang sudah diper hitungkan oleh komputer melalui norma-norma penjabaran matematis yang diinginkan oleh persamaan (3). Apabila diinginkan waktu investigasi dengan durasi waktu t yang sangat kecil (mikro-detik) dan mempunyai interval tertentu, maka waktu t tersebut tinggal diinstasikan pada kontrol *statement* kalang DO-LOOP yang fasilitasnya sudah tersedia di *Matlab*, kemudian di *input* kan pada *stage* [A]. Proses ini dapat digunakan bila *out-put* yang diinginkan akan di *ploting* secara diskrit melalui pergeseran *sampling* (t -to).

Secara keseluruhan, proses ini dapat menggambarkan bentuk tegangan induksi impuls petir untuk setiap titik posisi menara vertikal yang disambar petir yang dirasakan oleh saluran distribusi, dimana letak saluran tersebut berdekatan dengan struktur vertikal yang disambar oleh petir. Nilai skalar (U/I) pada penelitian ini biasanya ditabulasikan bersama-sama dengan ketinggian struktur vertikal, jarak struktur terhadap rute saluran distribusi, dan posisi titik pada konduktor dimana nilai tegangan induksinya akan ditentukan, semuanya dimasukkan ke dalam tabel tersendiri, sehingga gampang dibaca dan dimengerti oleh pemakai yang memerlukannya. Hasil komputer ini sangat bermanfaat untuk suatu investigasi dalam perencanaan saluran distribusi terhadap tegangan induksi petir yang dirasakan olehnya.

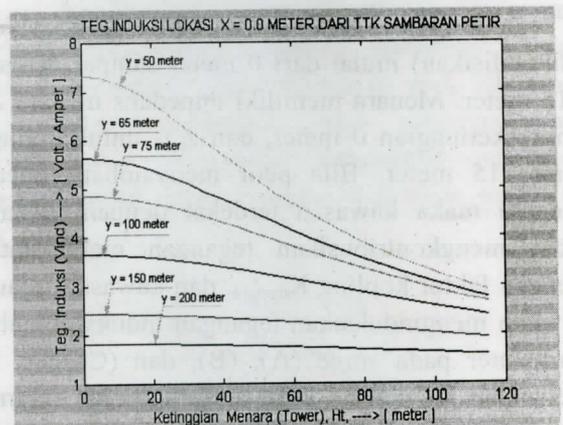
4. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh struktur menara vertikal (Ht)

Suatu menara telekomunikasi atau menara penguat sinyal telfon salular yang berada di sekitar saluran distribusi tegangan menengah / rendah yang tersambar petir langsung dibagian puncaknya akan dapat menginduksikan sebuah tegangan induksi ke saluran distribusi yang berada di sekitarnya. Tegangan induksi ini akan muncul dan bervariasi dengan jarak memanjang sepanjang saluran (x) dan jarak titik sambaran terpendek ke arah normal saluran (y) sebagaimana dapat ditunjukkan pada gambar 3.



(a)



(b)

Gambar : 3 tegangan induksi petir untuk jarak memanjang saluran distribusi $x = 2.5$ km, (b) $x = 0.0$ km

Sebuah menara berstruktur vertikal dengan lokasi pada $y = 50$ meter, normal terhadap garis saluran distribusi, akan menginduksikan tegangan induksi petir tidak lebih dari 2.5 (Volt /Amper). Magnitud induksi sebesar ini dapat dirasakan pada titik saluran sejauh 2.5 km. (gbr. 3.a) dengan tinggi menara 115 meter.

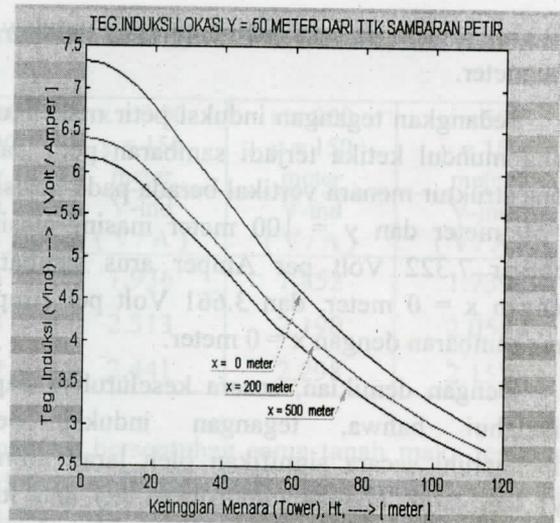
Sebaliknya, dengan ketinggian menara, $H_t = 20$ meter, pada nilai x dan y yang sama, magnitud tegangan induksi petir hampir mendekati 5.5 Volt/Amper. Magnitud tegangan induksi tidak mengalami perubahan yang signifikan untuk ketinggian menara (H_t) dari 0 s.d. 115 meter pada masing masing nilai $y = 150$ dan $y = 200$ meter. Di dasarkan kurva untuk nilai $y = 150$ m dan $y = 200$ m (gbr. 3.a dan 3.b), maka dapat di prediksi bahwa untuk ketinggian menara $H_t > 115$ m, pemunculan tegangan induksi (Vind) hampir mendekati magnitud konstan. Dengan demikian, titik sambaran petir yang signifikan terhadap kontribusi tegangan induksi yang menginvasi saluran distribusi tegangan menengah / rendah hanya pada posisi $y = 100, 75, 65,$ dan 50 meter. Sedangkan untuk nilai $y < 50$ meter dianggap insiden sambaran petir langsung, jadi bukan sambaran petir induksi.

Pengaruh terhadap jarak normal (Y)

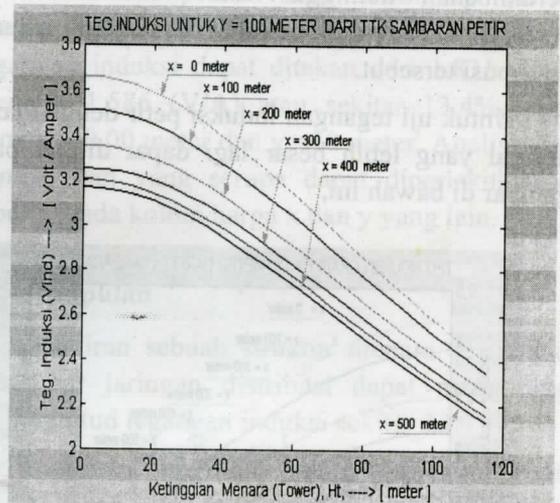
Jarak normal adalah garis lurus terpendek yang menghubungkan antara titik sambaran petir dan suatu titik yang terletak pada saluran distribusi, dimana pada titik tersebut garis ini membentuk sudut siku terhadap bentangan saluran. Kalau titik sambaran petir itu terletak di titik puncak menara (*tower*), maka titik referensi sambaran petirnya adalah proyeksi titik puncak menara itu ke dasar menara.

Gambar 4.a dan 4.b menunjukkan ketergantungan tegangan induksi (Vind) terhadap jarak bentangan memanjang saluran (x) untuk jarak normal, $y, 50$ meter dan 100 meter.

Untuk nilai bentangan saluran yang lebih kecil dengan nilai $y = 50$ meter dan $y = 100$ meter, tegangan induksi akan menjadi bertambah besar dan magnitudnya dipengaruhi oleh ketinggian struktur menara vertikal (H_t).



(a)



(b)

Gambar 4 Tegangan induksi petir untuk jarak normal $y = 50$ m dan $y = 100$ m

Untuk nilai bentangan saluran yang lebih kecil dengan nilai $y = 50$ meter dan $y = 100$ meter, tegangan induksi akan menjadi bertambah besar dan magnitudnya dipengaruhi oleh ketinggian struktur menara vertikal (H_t) yang ada disekitar saluran distribusi tersebut. Pengaruh ini secara dominan bersifat invers.

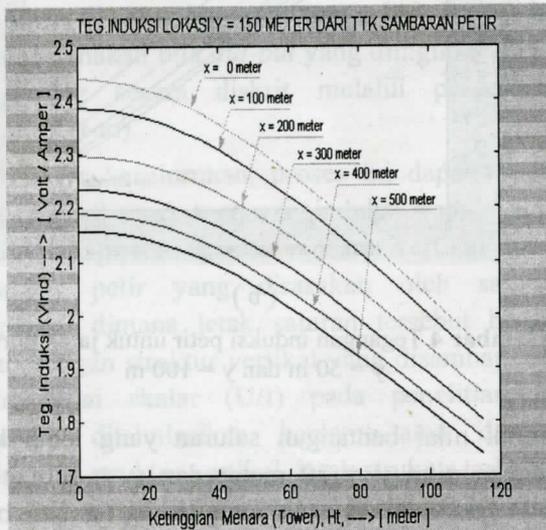
Didasarkan kurva kurva pada gambar 4.a dan 4.b dapat diprediksikan bahwa untuk ketinggian suatu struktur menara vertikal yang lebih tinggi daripada 115 meter akan menghasilkan tegangan induksi jauh di bawah 2.5 volt per ampere arus sambaran petir untuk $y = 50$ meter, dan di bawah

2.0 volt per ampere arus sambaran petir untuk $y = 100$ meter.

Sedangkan tegangan induksi petir maksimum yang muncul ketika terjadi sambaran petir pada zona struktur menara vertikal berada pada posisi $y = 50$ meter dan $y = 100$ meter masing-masing sebesar 7.322 Volt per Ampere arus sambaran dengan $x = 0$ meter, dan 3.661 Volt per Ampere arus sambaran dengan $x = 0$ meter.

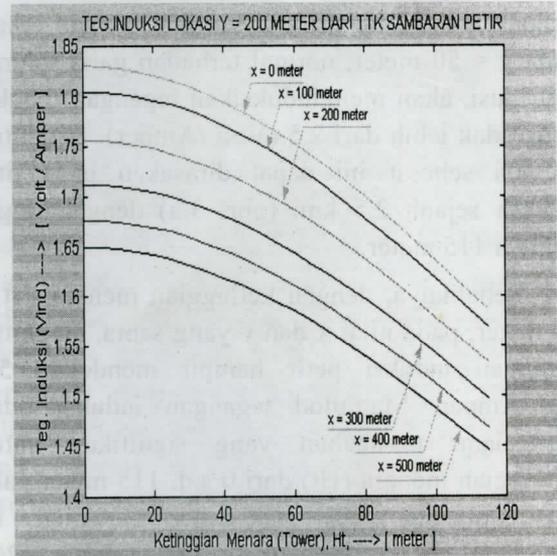
Dengan demikian, secara keseluruhan dapat diketahui bahwa, tegangan induksi petir dipengaruhi secara signifikan oleh jarak normal (y) dan jarak memanjang saluran (x) dan juga tegangan induksi akan berkurang seiring dengan pertambahan ketinggian dari struktur menara vertikal (H_t) yang berada di sekitar saluran distribusi tersebut.

Untuk uji tegangan induksi petir dengan jarak normal yang lebih besar lagi dapat dilihat pada gambar di bawah ini,



Gambar 5 Tegangan induksi untuk struktur menara vertikal pada titik zona dengan $y = 150$ meter

Gambar 5 menunjukkan suatu variasi nilai magnitud tegangan induksi dengan ketinggian struktur menara vertikal untuk parameter-parameter jarak memanjang saluran masing-masing untuk nilai $x : 0$ m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, dan 500 meter, dengan $y = 150$ m.



Gambar 6 Tegangan induksi untuk struktur menara vertikal pada titik zona dengan $y = 200$ meter

Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa jarak memanjang saluran distribusi, x , yang lebih kecil akan menghasilkan magnitud tegangan induksi petir yang lebih tinggi dan juga akan menjadi naik seiring dengan nilai ketinggian struktur menara (H_t) yang mengecil; hal ini disebabkan panjang alur kanal petir yang menembus media udara lebih panjang dibandingkan dengan panjang alur kanal petir yang menuju ke suatu struktur menara pada ketinggian tertentu (yang lebih tinggi). Sehingga kerapatan muatan muatan listrik di sepanjang kanal tersebut akan memberikan respons induksi yang lebih besar dibandingkan dengan alur kanal petir yang pendek. Respons induksi ini diukur melalui medan induksi sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (1).

Menurut kurva-kurva pada gambar 5 dan 6, jarak normal, y , yaitu jarak antara posisi titik sambaran petir di puncak struktur menara dan sebuah titik di permukaan konduktor saluran distribusi sangat berpengaruh secara signifikan terhadap tegangan induksi yang dimunculkan, demikian juga dengan ketinggian struktur menaranya. (H_t).

Variasi tegangan induksi terhadap pengaruh ketinggian struktur menara, jarak normal (y) dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 1. Tegangan induksi petir (V_{ind}) terhadap parameter ketinggian struktur menara (H_t), jarak sepanjang saluran (x), dan jarak normal (y)

No	Ketinggian struktur menara H_t (meter)	$x = 0.00$ $y = 200$ meter	$x = 200$ $y = 200$ meter	$x = 500$ $y = 200$ meter	$x = 0.00$ $y = 150$ meter	$x = 200$ $y = 150$ meter	$x = 500$ $y = 150$ meter
		V-ind (V/A)	V-ind (V/A)	V-ind (V/A)	V-ind (V/A)	V-ind (V/A)	V-ind (V/A)
01	115	1.586	1.534	1.445	1.936	1.852	1.739
02	50	1.775	1.706	1.604	2.313	2.190	2.055
03	0	1.831	1.756	1.649	2.441	2.298	2.157

Pengaruh jarak aman saluran (X)

Untuk tinggi struktur menara 115 meter, tegangan induksi yang dimunculkan oleh suatu sambaran petir di titik puncak menara terhadap saluran distribusi yang ada di sekitarnya dipengaruhi oleh parameter : ketinggian menara (H_t), jarak sepanjang saluran (x), dan jarak normal (y) terhadap bentangan konduktor saluran.

Bila pada zona $x = 0.00$ meter dan $y = 200$ meter terjadi sambaran petir ke tanah, maka tegangan yang terinduksi ke jaringan distribusi sebesar 1.831 volt per ampere arus sambaran petir. Sebaliknya jika pada zona yang sama itu dibangun sebuah menara untuk penguat sinyal telfon selular dengan ketinggian 115 meter, maka ketika puncak menara itu disambar petir akan terjadi tegangan yang terinduksi ke jaringan distribusi sebesar 1.586 volt per ampere arus sambaran petir. Gelombang tegangan induksi impuls petir ini akan merambat dengan kecepatan 0.3 dari kecepatan cahaya sepanjang konduktor saluran. Setelah mencapai sejauh 500 meter gelombang impuls ini memunculkan tegangan induksi disalurkan distribusi sebesar 1.445 volt per ampere arus sambaran petir. Jadi pada aspek perambatan, gelombang ini turun menjadi 8.89 % dari besar tegangan induksi ketika petir menyambar di titik puncak menara. Tetapi bila menara ini tidak ada ($H_t = 0$), maka gelombang tegangan induksi impuls petir ini 1.831 (V/A) pada titik $x = 0$ meter dan turun menjadi 1.649 (V/A) pada titik $x = 500$ meter (turun 9.94 %). Jadi dengan kehadiran sebuah menara vertikal di sekitar jaringan distribusi, tegangan yang terinduksi sekitar 1.586 (V/A), kalau menara ini tidak hadir, artinya petir

langsung bersentuhan sama tanah maka tegangan induksi yang dirasakan oleh jaringan distribusi sebesar 1.831 (V/A).

Dari deskripsi di atas terungkap bahwa dengan kehadiran sebuah menara vertikal maka tegangan induksi dapat ditekan dari 1.831 (V/A) menjadi 1.586 (V/A) atau sekitar 13.4%, pada zona $x = 0.00$ meter dan $y = 200$ meter. Analisis dan pembahasan yang serupa dapat diperlakukan di tabel 1, pada kolom harga x dan y yang lain.

5. Kesimpulan

- Kehadiran sebuah struktur menara vertikal di sekitar jaringan distribusi dapat mengurangi magnitud tegangan induksi sekitar 13.4 %.
- Penurunan magnitud ini dipengaruhi secara signifikan oleh parameter : ketinggian struktur menara (H_t), jarak disepanjang saluran (x), dan jarak normal (y) terhadap bentangan rute saluran distribusi.
- Pengaruh jarak normal (y) lebih signifikan dan dominan daripada pengaruh jarak di sepanjang rute saluran (x).

Saran

Pemasang sebuah *Lightning Arrester* untuk sebuah jaringan distribusi dapat dikerjakan secara lebih akurat dengan memperhatikan besaran magnitud tegangan yang terinduksi. Besaran ukur ini dapat diperoleh dengan menggunakan sebuah program komputer (sebagaimana yang telah dikerjakan di dalam penulisan ilmiah ini), dan sudah dibuat sedemikian rupa sehingga gampang dan mudah bila diinginkan melakukan suatu

investigasi simulasi dalam mendesain dan *men-setting* peralatan proteksi surja petir yang akan diinstalasikan sebagai perlengkapan gardu distribusi jenis tiang.

Hal yang perlu diketahui dalam *men-setting* besaran proteksi surja petir adalah amplitudo dan kecuraman arus sambaran petirnya (di/dt). Besaran ini sebetulnya dapat dimunculkan di dalam program komputernya.

Daftar Pustaka

- Chowdhuri, P., 1989, Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead lines, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, hal. 479-492, Center for Electric Power Tennessee Technological University Cookeville, TN.
- Chowdhuri, P., 1990, Lightning Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, 658-667.
- Eriksson, AJ., Stringfellow, MF., Meal, DV., 1982, Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines, IEEE Trans on PAS, IEEE-PES Summer Meeting, Portland, Oregon, Vol. PAS-101, No. 04, April, 960-967.
- Ishii, M., Michishita, K., Hongo, Y., Oguma, AM., (1994), lightning-Induced Voltage on an Overhead wire dependent on Ground Conductivity, IEEE Trans. on Power Delivery, Vo. 9, No. 1, hal. 109-118.
- Rusck, S., 1977, Protection of Distribution Lines-Lightning Vol. 2, Academic Press London.
- Sorwar, NG., Gosling, IG., 1999, Lightning Radiated Electric Field and Their Contribution to Induced Voltages, IEEE-transaction on --?, Vol. --?, No. --?, 635-638.