

TÍNH TOÁN ĐIỆN ÁP CẢM ỨNG SÉT TRÊN CÁP NGẦM CÓ XÉT ĐIỆN TRỞ SUẤT ĐẤT LÀ HÀM PHỨC THEO TẦN SỐ

Vũ Phan Tú

Trường Đại học Kỹ thuật
(Bài nhận ngày 23/03/2000)

TÓM TẮT: Bài báo trình bày một phương pháp tính toán điện áp cảm ứng trên cáp ngầm do sét đánh vào mặt đất gần nơi chôn cáp gây nên, trong đó có xét đến điện trở suất đất là hàm số phức theo tần số và các giá trị điện dẫn và hằng số điện môi của đất cũng là hàm thay đổi theo tần số. Các kết quả tính toán với trường hợp đất một lớp và đất hai lớp đã được trình bày trong các đồ thị.

GIỚI THIỆU

Như đã biết quá điện áp trong hệ thống điện do sét đánh trực tiếp hay đánh gần đường dây gây nên thường dẫn đến mất ổn định trong hệ thống điện, phá hủy cách điện của máy điện, thiết bị điện... Vì thế trong những năm gần đây đã có nhiều công trình nghiên cứu điện áp cảm ứng do sét đánh gần hệ thống truyền tải gây nên [1], [2], [3], [4], [5] ...Tuy nhiên vẫn chưa có nhiều công trình nghiên cứu điện áp cảm ứng điện từ trường sét trên cáp ngầm và trong đó cũng còn nhiều giả thiết chưa thể hiện được chính xác bản chất vật lý, một trong những vấn đề đó là điện trở suất đất. Trong các công trình trên các tác giả đều chấp nhận giả thiết coi điện trở suất là trị số thực [1],[3] hay là một hàm phức có dạng $\rho(j\omega) = [\sigma + j\omega.\epsilon]^{-1}$ [2],[9].

Trong công trình này đề xuất một phương pháp tính điện áp cảm ứng trên cáp ngầm do sét đánh vào mặt đất gần nơi chôn cáp có xét đến sự thay đổi của điện trở suất đất theo tần số có dạng $\rho(j\omega) = [\sigma(\omega) + j\omega.\epsilon(\omega)]^{-1}$ [6], và tính toán trong trường hợp đất một lớp và hai lớp với những giả thiết như sau:

- a) – Sét đánh thẳng góc với mặt đất.
- b) – Phân bố điện tích dọc theo kênh sét là đồng nhất.
- c) – Dạng sóng sét dùng để tính toán các quá trình quá độ là dạng $i(t) = a.t$ - với a là độ dốc đầu sóng [kA/s], t là thời gian truyền sóng sét [s] - [8].
- d) – Vận tốc phóng điện ngược là hằng số.
- e) – Đất dẫn điện hữu hạn, các thành phần điện dẫn và hằng số điện môi của đất phụ thuộc tần số.

Kết quả được trình bày trên các đồ thị cho thấy sự thay đổi biên độ điện áp cảm theo các tham số của quá trình như độ dốc đầu sóng sét, tỉ số vận tốc phóng điện ngược, điện trở suất đất...

1/- CÁC PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN

a/- Phương trình sóng điện từ :

Trong một môi trường xác định sự truyền sóng điện từ được mô tả bởi hệ phương trình Helmholtz [7] như sau:

$$\nabla^2 A - \mu \cdot \epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Phi - \mu \cdot \epsilon \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2)$$

Trong đó:

- + A : là thế véctơ [Wb/m].
- + Φ : là thế vô hướng [V].
- + ϵ là hằng số điện môi [F/m] của môi trường truyền sóng.
- + μ là độ từ thẩm [H/m] của môi trường truyền sóng.
- + ρ_c là mật độ điện tích [Coulomb/m³].
- + J là mật độ dòng điện. [A/m³]

Theo [7] các thành phần A và Φ được xác định:

$$A(r) = \int_V \frac{\mu_0 \cdot J(r')}{4\pi|r-r'|} \cdot dV \quad (3)$$

$$\Phi(r) = \int_V \frac{\rho_c(r')}{4\pi\epsilon_0|r-r'|} \cdot dV \quad (4)$$

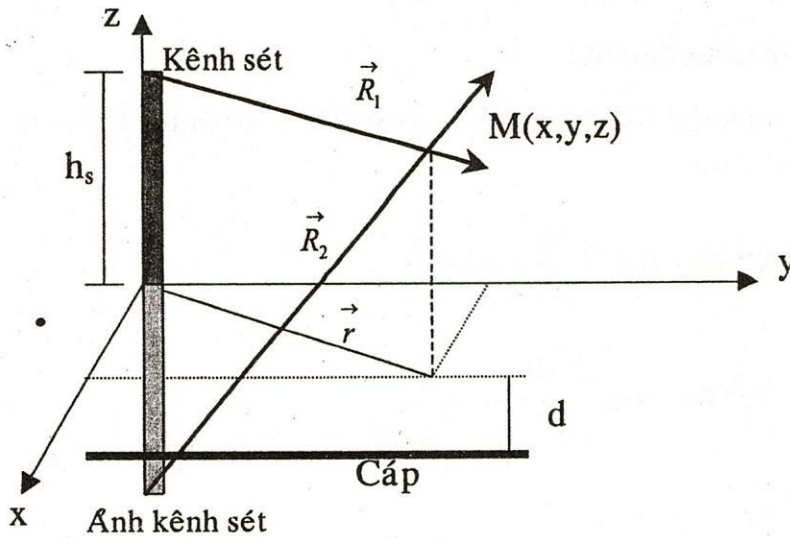
- + ϵ_0 là hằng số điện môi của không khí ($= 8,845 \cdot 10^{-12}$ F/m).
- + μ_0 là độ từ thẩm của không khí ($= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m).
- + V là thể tích nguồn bức xạ [m³].

Như thế cường độ điện trường cảm ứng tại điểm M(x,y,z) sẽ là:

$$E_M = E_M^d + E_M^i = -\nabla\Phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (5)$$

b/- Điện trường cảm ứng:

Trong hệ tọa độ vuông góc như hình -1 chúng ta xác định được:



Hình - 1

+ Thành phần điện của E_M :

$$E_M^d = - \frac{\partial \Phi}{\partial h_s} \Big|_{h_s=0} = - \frac{I_s}{2\pi \cdot v \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{(vt - \beta r)}{(vt - \beta r)^2 + r^2} \quad (6)$$

+ Thành phần từ của E_M :

$$E_M^t = - \frac{\partial A}{\partial t} = - \frac{I_s \cdot \mu}{2\pi} \cdot \frac{v}{\sqrt{(vt - \beta r)^2 + r^2}} \quad (7)$$

+ Thành phần tổng hợp của cường độ điện trường tại một điểm M theo (5):

$$\Rightarrow E_M = - \frac{I_s}{2\pi} \left[\frac{1}{v \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{vt - \beta r}{(vt - \beta r)^2 + r^2} + \mu \frac{v}{\sqrt{(vt - \beta r)^2 + r^2}} \right] \quad (8)$$

$$+ r^2 = x^2 + y^2, [m]$$

+ I_s là dòng sét [kA].

+ $\beta = v/c$ là tỉ số tốc độ phóng điện ngược trên tốc độ ánh sáng trong chân không ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

+ μ là độ từ thẩm của đất [H/m].

+ h_s là độ cao của kênh sét [m] và d là độ chôn sâu của cáp [m].

c/- Cường độ điện trường do sét gây ra trong đất:

Theo [8] thành phần cường độ điện trường khúc xạ trong đất:

$$E_k = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_t \cdot e^{-k_2 z} \quad (9)$$

+ E_t chính là cường độ điện trường E_M tính theo pt(8).

$$+ \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \text{ là tổng trở sóng của không khí,} \quad (10)$$

+ k_2 và η_2 là hệ số truyền và tổng trở sóng của môi trường đất:

$$k_2 = \alpha_2 + j\xi_2 \quad (11)$$

$$\eta_2 = |\eta_2| \cdot e^{j\varphi} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_2}{\sigma_2 + j\omega\epsilon_2}} \quad (12)$$

Trong đó hệ số tắt dần α_2 và hệ số pha ξ_2 được tính như sau:

$$\alpha_2 = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \epsilon_2^2}} - 1 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$\xi_2 = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \epsilon_2^2}} + 1 \right]^{1/2} \quad (14)$$

+ μ_2 là độ từ thẩm của đất [H/m]

+ σ_2 và ϵ_2 là điện dẫn và hằng số điện môi của đất.

d/- Điện áp cảm ứng trên cáp ngầm:

Điện áp cảm ứng được tính theo công thức sau:

$$U_{cư} = \int_0^d E_k dz \quad (15)$$

+ d : độ chôn sâu của cáp [m].

+ E_k là thành phần điện trường khúc xạ xác định theo pt(9) :

Chuyển pt(9) từ miền tần số về miền thời gian , chúng ta nhận được:

$$E_k = T \cdot E_t \cdot e^{-\alpha_2 z} \cos(\omega t - \xi_2 z) \quad (16)$$

Thế vào phương trình (15) - giải ra được:

$$U_{cư} = T \cdot E_t \cdot Q \quad (17)$$

$$Q = \int_0^d e^{-\alpha_2 \cdot d} \cdot \cos(\omega t - \xi_2 z) dz \quad (18)$$

Với $T = \frac{2 \cdot \eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$ là hệ số khúc xạ của sóng điện từ tại mặt đất.

$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$ là hệ số phản xạ của sóng điện từ tại mặt đất.

Trên đây là một phương pháp tính toán điện áp cảm ứng do sét đánh gần nơi chôn cáp gây nên và xét với trường hợp là các thành phần điện dẫn σ_2 và hằng số điện môi ϵ_2 của đất là các số thực. Như chúng ta biết khi tần số thay đổi thì các giá trị của độ dẫn điện và hệ số điện môi luôn luôn thay đổi. Ví dụ như khi tần số tăng đến một giá trị nào đó thì hệ số ϵ_2 sẽ giảm. Như thế để thể hiện sự thay đổi của các hệ số σ_2 và ϵ_2 theo tần số, chúng ta đưa vào áp dụng dạng của điện trở suất phức (hay điện dẫn suất phức) [6] được tính trong các trường hợp cụ thể như sau:

i/- Trường hợp đất một lớp:

Theo [6] chúng ta có:

$$\gamma_2(j\omega) = \frac{1}{\rho_2(j\omega)} = \sigma_2(\omega) + j \cdot \omega \cdot \epsilon_2(\omega) \quad (19)$$

$$\rho_2(j\omega) = \rho_0 \left[1 - m_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_2)^{\zeta_2}} \right) \right] \quad (20)$$

+ $\rho_2(0)$ và $\rho_2(\infty)$ là những trị số giới hạn của điện trở suất đất tương ứng với tần số bằng 0 và ∞ , [Ωm].

+ τ_2 là hằng số thời gian phục hồi phân cực của đất [s].

+ ζ_2 là chỉ số phương sai \Rightarrow nó bằng 1 với chất lỏng có cực tính tinh khiết, với môi trường đất thì nó nằm trong khoảng từ 0,1 đến 0,6.

+ Hệ số $m_2 = [\rho_2(0) - \rho_2(\infty)] / \rho_2(0)$.

Dựa vào (19) và (20) xác định được:

$$\sigma_2(\omega) = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{B \cdot C}{C^2 + D^2} \quad (21)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{1}{\omega \cdot \rho_0} \cdot \frac{B \cdot D}{C^2 + D^2} \quad (22)$$

Trong đó:

$$A = \omega \cdot \tau_2 \quad (23)$$

$$B = \left(1 + A^{\zeta_2} \cdot \cos \frac{\zeta_2 \pi}{2}\right)^2 + \left(A^{\zeta_2} \cdot \sin \frac{\zeta_2 \pi}{2}\right)^2 \quad (24)$$

$$C = B \cdot (1 - m_2) + m_2 \cdot \left(1 + A^{\zeta_2} \cdot \cos \frac{\zeta_2 \pi}{2}\right) \quad (25)$$

$$D = m_2 \cdot A^{\zeta_2} \cdot \sin \frac{\zeta_2 \pi}{2} \quad (26)$$

Như vậy các pt(13) và (14) được viết lại như sau:

$$\alpha_2^* = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_2(\omega) \mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2(\omega)}{\omega^2 \varepsilon_2^2(\omega)}} - 1 \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$\xi_2^* = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_2(\omega) \mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2(\omega)}{\omega^2 \varepsilon_2^2(\omega)}} + 1 \right]^{1/2} \quad (28)$$

i/- Trường hợp đất hai lớp:

Theo [6] công thức Wenner ở dạng phức:

$$\gamma_{2W}(j\omega) = \frac{1}{\rho_{2W}(j\omega)} = \sigma_{2W}(\omega) + j \cdot \omega \cdot \varepsilon_{2W}(\omega) \quad (29)$$

$$\rho_{2W}(j\omega) = \rho_{21}(j\omega) \cdot \left(1 + 2y \sum_{n=1}^{\infty} [\Gamma(j\omega)]^n \cdot \mathfrak{R}(y, n)\right) \quad (30)$$

Trong đó:

$$y = \frac{a}{h} = \frac{\text{khoảng cách giữa các điện cực}}{\text{bề dày lớp đất bên trên}} \quad (31)$$

$$\mathfrak{R}(y, n) = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{[1 + (y^2 / 4n^2)]^{1/2}} - \frac{1}{[1 + (y^2 / n^2)]^{1/2}} \right] \quad (32)$$

Hệ số phản xạ phức trong đất:

$$\Gamma(j\omega) = \frac{\rho_{22}(j\omega) - \rho_{21}(j\omega)}{\rho_{22}(j\omega) + \rho_{21}(j\omega)} \quad (33)$$

$\rho_{21}(j\omega)$ là điện trở suất phức của lớp đất bên trên. [Ωm]

$\rho_{22}(j\omega)$ là điện trở suất phức của lớp đất bên dưới. [Ωm]

Các pt (13) và (14) trở thành:

$$\alpha_{2w}^* = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_{2w}(\omega)\mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_{2w}^2(\omega)}{\omega^2 \epsilon_{2w}^2(\omega)}} - 1 \right]^{1/2} \quad (34)$$

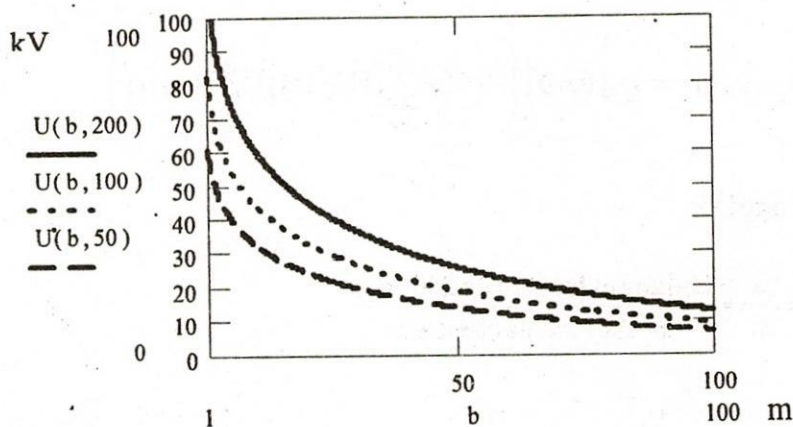
$$\xi_{2w}^* = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_{2w}(\omega)\mu_2}{2}} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma_{2w}^2(\omega)}{\omega^2 \epsilon_{2w}^2(\omega)}} + 1 \right]^{1/2} \quad (35)$$

Như thế với việc đưa dạng điện trở suất phức theo pt(20) và (30) vào tính toán thì các phương trình tính hệ số khúc xạ, phản xạ và các hệ số α_2 và ξ_2 đã trở nên phụ thuộc kép vào tần số do các giá trị σ_2 và ϵ_2 phụ thuộc tần số.

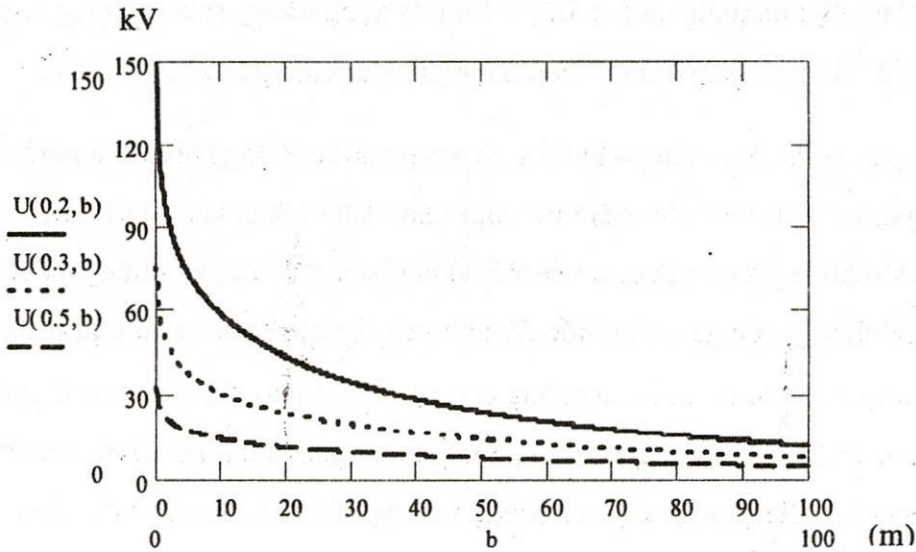
2/- KẾT QUẢ TÍNH TOÁN:

i/- Trường hợp đất một lớp:

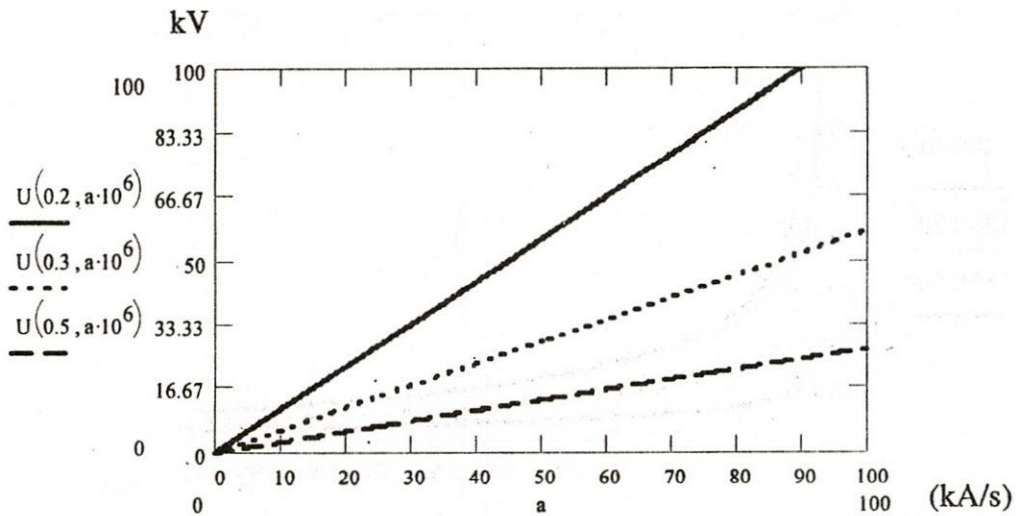
Sử dụng pt(17) với các hệ số theo pt(27) và (28) chúng ta có các đồ thị sau:



Hình 2: Đồ thị biểu diễn sự thay đổi của điện áp cảm ứng theo khoảng cách b (trong trường hợp nguy hiểm nhất khi thay $x = b, y = 0$), $\rho_0 = 200\Omega\text{m}$; $100\Omega\text{m}$ và $50\Omega\text{m}$. độ dốc đầu sóng $a = 70\text{kA}/\mu\text{s}$; $m_2 = 0,8$; $\xi_2 = 0,5$ và $\tau_2 = 0,1\text{s}$.



Hình 3: Đồ thị biểu diễn cường độ điện trường cực đại khi b thay đổi với $\beta = 0,2; 0,3; 0,5$; $\rho_0 = 100 \Omega\text{m}$; $m_2 = 0,2$; $\zeta_2 = 0,5$; $\tau_2 = 0,1\text{s}$; $a_{\text{max}} = 65,8\text{kA}/\mu\text{s}\mu_2 = \mu_0$; $d = 1\text{m}$.



Hình 4: Đồ thị biểu diễn cường độ điện áp cảm ứng cực đại khi độ dốc đầu sóng sét a thay đổi với $\beta = 0,2; 0,3; 0,5$ và $b = 5\text{m}$.

+ Hình 2 và hình 3: khi khoảng cách b (khoảng cách từ vị trí sét đánh đến hình chiếu của cáp lên mặt đất theo trục x , hình 1) tăng thì điện áp cảm ứng giảm. Điều này có thể nhận thấy qua biểu thức tính U_{cr} tỷ lệ với $1/b$ nên khi b tăng thì U_{cr} sẽ giảm, ngoài ra chúng ta cũng có thể nhận xét trực tiếp qua thực tế, khi khoảng cách từ vị trí sét đánh đến điểm khảo sát càng tăng thì điện áp cảm ứng sẽ giảm.

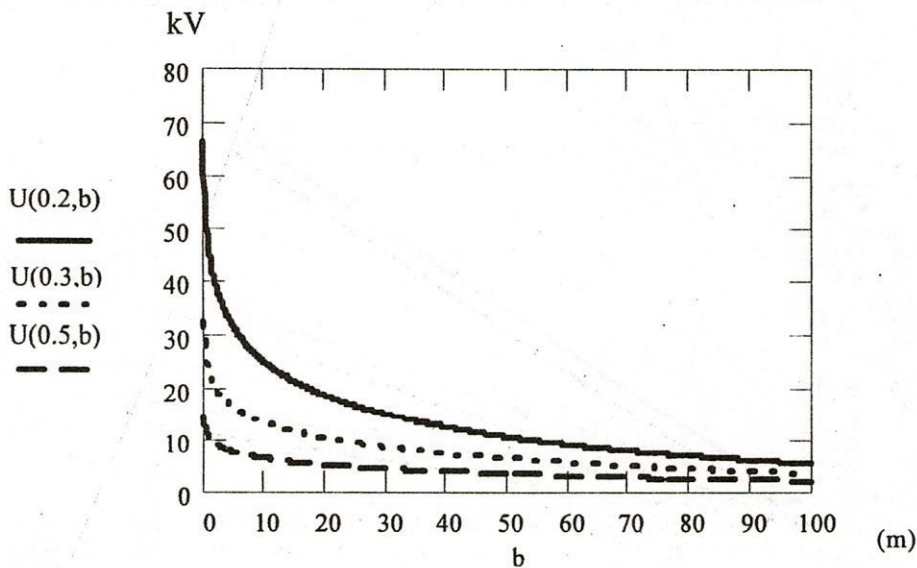
+ Hình 4: điện áp cảm ứng tăng khi độ dốc đầu sóng tăng. Điều này có thể nhận thấy ngay trong hàm U_{cr} là hàm tuyến tính theo độ dốc a , nên khi độ dốc a tăng thì U_{cr}

sẽ tăng theo đường thẳng qua gốc tọa độ (vì nó có dạng hàm $y = k.x$). Trong thực tế với những cú sét có độ dốc sóng lớn thì biên độ điện áp cảm ứng lớn và ngược lại.

+ Trong hai hình 3 và hình 4 khi tỉ số β càng nhỏ thì đường biểu diễn biên độ điện áp cảm ứng nằm ở bên trên và nằm bên dưới khi β lớn. Như chúng ta biết $\beta = v/c$ nó thể hiện tốc độ phóng điện ngược so với tốc độ ánh sáng, như vậy những cú sét nào có tốc độ phóng điện ngược gần bằng tốc độ ánh sáng (β càng gần 1) thì quá trình phóng điện ngược xảy ra tức thời làm cho cường độ điện trường tại mặt đất giảm nên điện áp cảm ứng giảm và khi β nhỏ thì quá trình phóng điện ngược diễn ra chậm hơn nên cường độ điện trường còn tích lũy tại mặt đất lớn tạo ra điện áp cảm ứng có giá trị lớn.

i/- Trường hợp đất hai lớp:

Sử dụng pt(17) kết hợp với các hệ số theo pt(34) và (35)



Hình 5: Đồ thị biểu diễn cường độ điện trường cực đại trong trường hợp đất hai lớp khi b thay đổi với $\beta = 0,2; 0,3; 0,5; \rho_1(j\omega)=\rho_1(0)$. Chúng ta có tỉ số điện trở suất DC của cả hai vùng là:

$$\Lambda = \frac{\rho_2(0)}{\rho_1(0)} = 0,1$$

+ Hình 5 cũng tương tự như hình 3, giá trị cực đại của điện áp cảm ứng giảm khi khoảng cách b tăng và khi β tăng thì đồ thị U_{cr} nằm ở bên dưới.

2/- KẾT LUẬN

Qua việc nghiên cứu bài báo đạt được một số kết quả như sau:

a) – Từ hệ phương trình sóng Helmholtz, bài báo đã thực hiện một phương pháp tính toán điện áp cảm ứng do điện từ trường sét gây nên.

b) – Do việc thể hiện điện trở suất là hàm phức thay đổi theo tần số dẫn đến các hệ số truyền sóng, tổng trở sóng, hệ số tắt dần, hệ số pha, hệ số khúc xạ của sóng điện từ và hệ số phản xạ của sóng điện từ trong đất trở nên phụ thuộc kép vào tần số. Qua đó cho thấy mức độ chính xác của các hệ số này và thảo luận được bản chất vật lý của vấn đề.

c) - Vì cáp điện lực thông thường được chôn không sâu lắm nên ở đây bài báo chỉ tính trong trường hợp đất một lớp và hai lớp.

CALCULATION OF LIGHTNING – INDUCED VOLTAGE ON UNDERGROUND CABLE IN CONSIDERATION EARTH RESISTIVITY AS A COMPLEX FUNCTION OF THE FREQUENCY.

Vu Phan Tu

***ABSTRACT:** This paper presents a method to compute the induced voltage on underground cable caused by lightning striking the ground in the vicinity, taking in consideration the earth resistivity as a complex function of the frequency, and the earth conductance values as well as its permittivity as functions of the frequency. Computation results for one-layer earth and two-layer earth are presented in diagrams.*

***Lời cảm ơn:** Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ hướng dẫn tận tình của thầy TS Hoàng Việt trong thời gian em làm luận án tốt nghiệp cao học và thực hiện nghiên cứu này.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] – P. Chowdhuri – Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines – IEEE Trans on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp. 479 – 492. (1989)
- [2] – A. Darcherif – Lightning Induced transients Within Buried and Shielded Multiconductor Cables – UPEC' 91.
- [3] – M.Ishii and K. Michishita – Lightning Induced Voltage on an Overhead Wire Dependent on Ground Conductivity – IEEE Trans on Power Delivery , pp 109 - 118.(1994).
- [4] – Voisla Jankov – Estimation of the Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning – IEEE Trans on Power Delivery, Vol 12, No.1. pp 315-324, (1997).
- [5] – F. Radichi – Response of Multiconductor Power lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields – IEEE Trans on Power Delivery, Vol 12, No.3, pp 1404 – 1411. (1997).
- [6] – J.A.Kong – Progress in Electromagnetics Research – Elsevier . (1988).
- [7] – David H.Staelin - Electromagnetic Waves – Prentic Hall Internatinal, Inc. (1994).
- [8] – Hoàng Việt – Giáo Trình Kỹ Thuật Cao Áp – ĐHKT Tp.HCM – (2000).
- [9] – Farid Dawalibi – Electromagnetic Fields of Energized Conductors - IEEE Trans on Power Delivery, Vol 8, No.3, pp 1275 – 1284. (1993).