

MỘT PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG TẢI CỦA CÁP NGẦM CAO THẾ TRONG CÁC ĐIỀU KIỆN LẮP ĐẶT KHÁC NHAU

AN ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING CURRENT-CARRYING CAPACITY OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE IN DIFFERENT INSTALLATION CONDITIONS

Trần Anh Tùng

TÓM TẮT

Cáp bọc cao thế cách điện polymer được thiết kế dựa trên tiêu chuẩn về nhiệt. Khả năng tải của đường cáp phụ thuộc chủ yếu vào nhiệt độ làm việc cho phép của lớp cách điện. Bên cạnh đó, các điều kiện lắp đặt khác nhau của cáp ảnh hưởng khác nhau đến khả năng tải. Hiện nay, phần lớn các tính toán khả năng tải của đường cáp cao thế dựa trên tiêu chuẩn IEC-60287. Tuy nhiên, giới hạn tính toán của tiêu chuẩn này nằm ở điều kiện lắp đặt trong đó mạch cáp ba pha lõi đơn đặt nằm ngang hoặc đặt theo hình tam giác. Trong khi đó, điều kiện lắp đặt thực tế có thể thay đổi phụ thuộc vào địa hình của tuyến cáp. Bài báo này giới thiệu một phương pháp giải tích dựa trên hệ phương trình Maxwell cho phép tính toán khả năng tải của cáp ngầm cao thế trong điều kiện lắp đặt bất kỳ, có thể áp dụng cho các tuyến cáp gồm một hoặc nhiều mạch cáp.

Từ khóa: Cáp ngầm cao thế, hiệu ứng bề mặt, hiệu ứng ở gần, khả năng tải, hệ phương trình Maxwell.

ABSTRACT

High-voltage underground cable are generally designed according to thermal criteria. The current-carrying capacity depends on the permissible temperature inside the insulation. In addition to that, various installation conditions affect the current rating differently. At present, the major current-carrying capacity calculations of high voltage cable system are based on IEC-60287 standard. However, this standard's calculation limits located in installation conditions, whether the single-core cable system was laid in flat or trefoil formation. Simultaneously, the practical installation conditions can vary according to cable routes. This paper presents an analytical method based on Maxwell equations that allows calculating the current-carrying capacity of cable system in any installation condition, and is suitable for single or multi-link cables.

Keywords: High voltage underground cable, skin effect, proximity effect, current rating, Maxwell equations.

Trường Đại học Điện lực

Email: tungta@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/6/2018

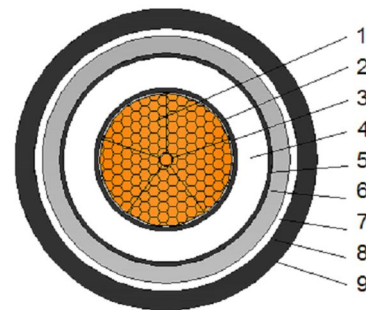
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/10/2018

Ngày chấp nhận đăng: 18/12/2018

1. MỞ ĐẦU

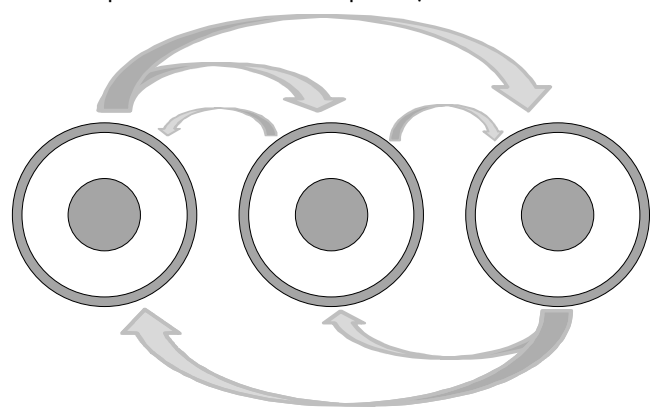
Các đường cáp ngầm cao thế thường được sử dụng thay cho đường dây trên không tại các đô thị lớn để đảm

bảo an toàn, mỹ quan và các điều kiện môi trường. Trong một sợi cáp cao thế lõi đơn, lớp cách điện của cáp thông thường được bọc bên ngoài bởi một lớp vỏ kim loại bằng nhôm để ngăn ngừa sự xâm nhập của nước, bảo vệ lõi cáp khỏi các tác động cơ học và có vai trò như một màn chắn điện từ trường cũng như tạo thành đường trở về cho dòng ngắn mạch và dòng điện điện dung [1]. Cấu trúc điển hình của một sợi cáp cao thế lõi đơn được minh họa trên hình 1.



Hình 1. Cấu trúc điển hình của cáp ngầm cao thế

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1 - Lõi dẫn | 2 - Màn chắn bán dẫn cho lõi dẫn |
| 3 - Lớp cách điện | 4 - Màn chắn bán dẫn cho lớp cách điện |
| 5 - Lớp chống thấm | 6 - Vỏ kim loại |
| 7 - Lớp chống ăn mòn cho vỏ kim loại | |
| 8 - Vỏ cáp | 9 - Lớp dẫn điện |



Hình 2. Ảnh hưởng tương hỗ giữa các sợi cáp của một mạch cáp ba pha

Khi lõi cáp mang dòng điện xoay chiều, một từ trường xoay chiều được tạo ra xung quanh nó. Từ trường này sẽ cảm ứng lên lớp vỏ kim loại của chính sợi cáp đó và trên vỏ kim loại của các sợi cáp lân cận các điện áp cảm ứng [2]. Ảnh hưởng tương hỗ của từ trường giữa các cáp của một mạch cáp ba pha được minh họa trên hình 2.

Lớp vỏ kim loại của các sợi cáp thường được tiếp địa theo ba cách:

- Đối với các đường cáp ngắn (dưới 500m), lớp vỏ kim loại được tiếp địa tại một điểm, đầu còn lại được tiếp địa qua một phần tử hạn chế quá điện áp vỏ cáp. Trong trường hợp này không có dòng điện khép vòng do cấu hình tiếp địa vỏ cáp không tạo ra mạch vòng kín;
- Đối với các đường cáp có chiều dài trung bình (từ 500 đến 1000m), lớp vỏ kim loại thường được tiếp địa tại hai điểm tại các vị trí đầu cáp. Khi đó vỏ cáp được tiếp địa tại hai đầu tạo thành một mạch vòng kín, điện áp cảm ứng trên vỏ cáp tạo ra một dòng điện khép vòng làm tăng tổn thất của đường cáp hay nói cách khác là làm giảm khả năng tải của đường cáp;
- Đối với các đường cáp có chiều dài lớn (vài km trở lên), lớp vỏ kim loại của các sợi cáp thường được đấu hoán vị hay còn gọi là đảo vỏ tại vị trí nối cáp. Việc đảo vỏ cáp kết hợp với hoán vị vị trí lõi cáp cho phép triệt tiêu dòng điện khép vòng trong từng phân đoạn cáp từ đó cải thiện khả năng tải của tuyến cáp.

Tuy nhiên, tổn thất do dòng điện Eddy (dòng điện xoáy) đều xuất hiện trong cả ba cấu hình tiếp địa vỏ cáp đề cập ở trên. Tổn thất do dòng điện Eddy cũng làm giảm khả năng tải của mạch cáp.

Hiện nay, các tính toán khả năng tải của các mạch cáp ngầm cao thế thường dựa trên hướng dẫn trong tiêu chuẩn IEC-60287 [3]. Dòng điện tải cực đại liên tục của một sợi cáp cao thế lõi đơn được biểu diễn bởi công thức:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (1)$$

Trong đó: $\Delta\theta$ là độ tăng nhiệt độ giữa lõi dẫn và nhiệt độ của môi trường đặt cáp (K)

R là điện trở xoay chiều ở nhiệt độ vận hành cực đại (Ω/m)

W_d là tổn thất điện môi trên cách điện (W/m)

T_1 là nhiệt trở giữa lõi dẫn và vỏ kim loại (K.m/W)

T_2 là nhiệt trở của lớp đệm giữa vỏ cáp và phần giáp (K.m/W)

T_3 là nhiệt trở của lớp bọc polyme bên ngoài của cáp (K.m/W)

T_4 là nhiệt trở giữa bề mặt cáp và môi trường đặt cáp (K.m/W)

n là số lõi dẫn của cáp

$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$ là tỉ số giữa tổn thất công suất trên vỏ kim loại của cáp so với tổn thất công suất trong lõi dẫn của cáp (λ'_1 là tỉ số tổn thất công suất trên vỏ cáp so với tổn thất công suất trên lõi dẫn do dòng điện khép vòng gây ra; λ''_1

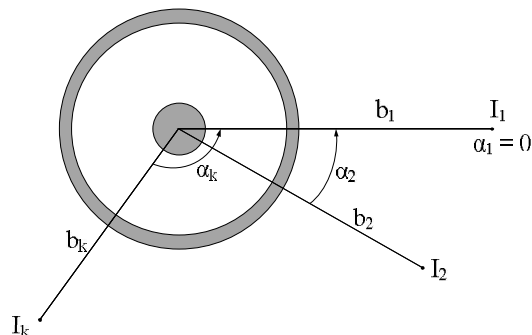
là tỉ số tổn thất công suất trên vỏ cáp so với tổn thất công suất trên lõi dẫn do dòng điện xoáy Eddy gây ra)

λ_2 là tỉ số giữa tổn thất trong phần giáp so với tổn thất trong lõi dẫn

Các loại cáp cao thế hiện nay thường không có lớp giáp nên có thể coi $\lambda_2 = 0$, do đó khả năng tải của cáp bị ảnh hưởng nhiều bởi hệ số tổn thất công suất λ_1 . Cách bố trí hình học hoặc sự thay đổi thứ tự pha của các sợi cáp trong một mạch cáp ba pha ảnh hưởng nhiều đến hệ số tổn thất λ_1 và vì vậy ảnh hưởng đến khả năng tải của cáp. Hiện nay, tiêu chuẩn IEC-60287 mới chỉ hướng dẫn cách tính toán khả năng tải của mạch cáp khi cáp đặt nằm ngang hoặc bố trí theo hình tam giác. Trong khi đó, một số tuyến cáp trên thực tế có cấu hình rải cáp đặt ba sợi cáp khác đi cho phù hợp với địa hình. Bài báo này từ đó giới thiệu một phương pháp giải tích cho phép tính toán khả năng tải của mạch cáp với cấu hình lắp đặt bất kỳ.

2. PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG TẢI CỦA CÁP VỚI CẤU HÌNH LẮP ĐẶT BẤT KỲ

Xét một sợi cáp lõi đơn mang dòng điện I , được rải lân cận N sợi cáp lõi đơn khác mang lần lượt các dòng điện I_1, I_2, \dots, I_N . Vị trí của sợi cáp k so với sợi cáp đang xét có tọa độ cực (b_k, α_k) như minh họa trên hình 3.



Hình 3. Tọa độ của một sợi cáp so với các sợi cáp được rải lân cận

Ví dụ, nếu các sợi cáp của một mạch ba pha được rải nằm ngang, tọa độ của cáp nằm giữa so với các cáp khác là $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 180^\circ, b_1 = b_2 = b$. Cáp nằm ngoài có tọa độ so với hai cáp còn lại là $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$ và $b_1 = 2b_2 = 2b$.

Bên cạnh đó ta đặt $b_1 = b$ đồng thời ta có $b_k = a_k.b$.

Tổn thất Joule trên lõi dẫn và vỏ kim loại của cáp có thể được tính toán theo công thức tổng quát như sau:

$$P_t = \frac{1}{g} \int_0^{2\pi} \int |J(r, \theta)|^2 \cdot r dr d\theta \quad (2)$$

Trong đó, $J(r, \theta)$ là mật độ dòng điện tại điểm (r, θ) và g là điện dẫn suất của vật liệu kim loại. Giới hạn của tích phân theo hướng bán kính từ 0 đến r_1 đối với lõi dẫn, và từ r_2 đến r_3 đối với vỏ kim loại của cáp. Từ đó, hệ số tổn thất công suất $\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$ có thể được tính bằng tỉ số giữa tổn thất Joule trên vỏ kim loại của cáp và trên lõi dẫn.

2.1. Tổn thất công suất trong lõi dẫn

Với một dòng điện xoay chiều i_k xác định bởi trị hiệu dụng I_k và pha ban đầu ϕ_k , từ công thức (2) có thể khai triển

để tính toán tổn thất công suất trong lõi dẫn của cáp lõi đơn đặt lân cận N cáp lõi đơn khác theo công thức sau:

$$P_c = \frac{I_c^2}{\pi g_1 r_1^2} \cdot (1 + Y_s + Y_p) \quad (3)$$

Trong đó:

$$1 + Y_s = \frac{x_1}{2} \cdot \frac{ber(x_1) \cdot bei'(x_1) - bei(x_1) \cdot ber'(x_1)}{ber_1^2(x_1) + bei_1^2(x_1)} \quad (4)$$

$$Y_p = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_M \cdot \frac{x_1 [ber_n(x_1) \cdot bei'_n(x_1) - bei_n(x_1) \cdot ber'_n(x_1)]}{ber_{n-1}^2(x_1) + bei_{n-1}^2(x_1)} \cdot [Z_n]^2 \quad (5)$$

Với

$$\Phi_M = \frac{1}{j^2} \left[\sum_{k=1}^N \frac{I_k^2}{a_k^2 n} + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{I_k}{a_k^n} \left\{ \sum_{j=k+1}^N \frac{I_j}{a_j^n} \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_j) \cdot \cos n(\alpha_k - \alpha_j) \right\} \right] \quad (6)$$

$$Z_n = \frac{W_n}{D'_n} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{n-1} \quad (7)$$

$$D'_n = D_n - \Delta_n \cdot E_n \quad (8)$$

$$W_n = K_{n+1}(x_2) I_{n-1}(x_2) - I_{n+1}(x_2) K_{n-1}(x_2) \quad (9)$$

$$D_n = K_{n+1}(x_2) I_{n-1}(x_3) - I_{n+1}(x_2) K_{n-1}(x_3) \quad (10)$$

$$E_n = K_{n-1}(x_2) I_{n-1}(x_3) - I_{n-1}(x_2) K_{n-1}(x_3) \quad (11)$$

$$\Delta_n = \frac{I_{n+1}(x_1)}{I_{n-1}(x_1)} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{2n} \quad (12)$$

$$x_1 = m_1 r_1; x_2 = m_2 r_2; x_3 = m_2 r_3 \quad (13)$$

$$m_1 = \sqrt{j\omega\mu_1 g_1}; m_2 = \sqrt{j\omega\mu_2 g_2} \quad (14)$$

Với Y_s là hệ số hiệu ứng bề mặt của lõi dẫn

Y_p là hệ số hiệu ứng ở gần khi cáp đặt lân cận các cáp khác

g_1 là điện dẫn suất của vật liệu lõi dẫn

g_2 là điện dẫn suất của vật liệu màn chắn kim loại

r_1 là bán kính của lõi dẫn

r_2 và r_3 lần lượt là bán kính trong và bán kính ngoài của vỏ kim loại

μ_1 và μ_2 lần lượt là độ từ thẩm của vật liệu làm lõi dẫn và vỏ kim loại

I và I_c là trị số hiệu dụng của dòng điện trong lõi dẫn của sợi cáp đang xét

I_k là trị số hiệu dụng của dòng điện trong cáp k

$ber_n(x)$ và $bei_n(x)$ là các hàm Kelvin bậc n

Φ_M là biểu thức cho phép xác định số lượng và vị trí tương đối của các cáp

I_n và K_n lần lượt là các hàm Bessel hiệu chỉnh loại 1 và loại 2

2.2. Tổn thất công suất trên màn chắn kim loại

Tổn thất công suất trên màn chắn kim loại của cáp được tính theo công thức (15):

$$P_s = P_{s0} + \frac{I^2}{\pi g_2 r_3^2} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_M \cdot \left(\frac{r_3}{b} \right)^{2n} \cdot \frac{F_n(x_2, x_3)}{|D'_n|^2} \quad (15)$$

Trong đó, P_{s0} là tổng tổn thất trên vỏ kim loại của cáp đang xét do dòng điện khép vòng trên vỏ và dòng điện Eddy gây ra bởi dòng điện I chạy trong lõi dẫn. Biểu thức thứ hai trong công thức tính P_s liên quan đến hiệu ứng ở gần do các cáp lân cận gây ra.

$$F_n(x_2, x_3) = N_{1n} \cdot N_{1n}^* [G_n(x_3) - G_n(x_2)] + N_{2n} \cdot N_{2n}^* [H_n(x_3) - H_n(x_2)] + 2(-1)^n \cdot \text{Re}\{N_{1n} \cdot N_{2n}^*\} \cdot [L_n(x_3) - L_n(x_2)] - 2(-1)^n \cdot \text{Im}\{N_{1n} \cdot N_{2n}^*\} \cdot [M_n(x_3) - M_n(x_2)] \quad (16)$$

Với:

$$N_{1n} = K_{n+1}(x_2) - \Delta_n \cdot K_{n-1}(x_2) \quad (17)$$

$$N_{2n} = I_{n+1}(x_2) - \Delta_n \cdot I_{n-1}(x_2) \quad (18)$$

$$G_n(x) = x \cdot [ber_n(x) \cdot bei'_n(x) - bei_n(x) \cdot ber'_n(x)] \quad (19)$$

$$H_n(x) = x \cdot [ker_n(x) \cdot kei'_n(x) - kei_n(x) \cdot ker'_n(x)] \quad (20)$$

$$L_n(x) = \frac{x}{2} \cdot [ber_n(x) \cdot kei'_n(x) + ker_n(x) \cdot bei'_n(x) - kei_n(x) \cdot ber'_n(x) - bei_n(x) \cdot ker'_n(x)] \quad (21)$$

$$M_n(x) = \frac{x}{2} \cdot [bei_n(x) \cdot kei'_n(x) + ber_n(x) \cdot ker'_n(x) - kei_n(x) \cdot bei'_n(x) - ker_n(x) \cdot ber'_n(x)] \quad (22)$$

Tổn thất P_{s0} được tính theo công thức (23):

$$P_{s0} = \frac{1}{2\pi g_2 r_3^2 |D_0|^2} \cdot [F_{c1} \cdot F_{c1}^* \cdot (G_0(x_3) - G_0(x_2)) + F_{c2} \cdot F_{c2}^* \cdot (H_0(x_3) - H_0(x_2)) + 2\text{Re}\{F_{c1} \cdot F_{c2}^*\} \cdot (L_0(x_3) - L_0(x_2)) - 2\text{Im}\{F_{c1} \cdot F_{c2}^*\} \cdot (M_0(x_3) - M_0(x_2))] \quad (23)$$

Trong đó:

$$F_{c1} = F_{c1}(I_s, I_c) = I_s \cdot K_1(x_2) + I_c \cdot \frac{r_2 K_1(x_2) - r_3 K_1(x_3)}{r_2} \quad (24)$$

$$F_{c2} = F_{c2}(I_s, I_c) = I_s \cdot I_1(x_2) + I_c \cdot \frac{r_2 I_1(x_2) - r_3 I_1(x_3)}{r_2} \quad (25)$$

$ker_n(x)$ và $kei_n(x)$ là các hàm Kelvin bậc n

I_s là dòng điện khép vòng chạy trên vỏ kim loại của cáp đang xét

I_c là dòng điện chạy trong lõi dẫn của cáp đang xét

3. ỨNG DỤNG TÍNH TOÁN

3.1. So sánh với tiêu chuẩn IEC-60287

Phương pháp giải tích đề xuất được so sánh với tiêu chuẩn IEC-60287 để chứng minh tính chính xác. Mô hình tính toán được giả thiết là mạch cáp ba pha lõi đơn, lõi dẫn bằng đồng, vỏ kim loại bằng nhôm, đặt nằm ngang, vỏ cáp được tiếp địa tại một đầu (không tồn tại dòng điện khép vòng, hệ số tổn thất công suất $\lambda'_1 = 0$, vì vậy lúc này $\lambda_1 = \lambda''_1$, tổn thất trên vỏ kim loại chỉ do dòng điện xoáy Eddy gây ra). Các thông số của cáp được giới thiệu trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số cáp ba pha lõi đơn

Đặc tính	Giá trị
Đường kính của lõi dẫn (mm)	34
Đường kính trung bình của vỏ kim loại (mm)	80,9
Bề dày của vỏ kim loại (mm)	2
Điện trở của lõi dẫn ở 20°C (Ω)	$0,02198 \cdot 10^{-3}$
Hệ số giãn nở nhiệt của lõi dẫn ở 20°C	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Điện trở của vỏ kim loại ở 20°C (Ω)	$0,065 \cdot 10^{-3}$
Hệ số giãn nở nhiệt của vỏ kim loại ở 20°C	$4,03 \cdot 10^{-3}$
Điện trở suất của vỏ kim loại (Ωm)	$2,8264 \cdot 10^{-8}$
Khoảng cách giữa các sợi cáp (mm)	300
Cách bố trí các sợi cáp	Đặt nằm ngang

Hệ số tổn thất công suất λ''_1 trên các sợi cáp được tính toán theo phương pháp giải tích đề xuất và so sánh kết quả tính toán với tiêu chuẩn IEC-60287. Kết quả tính toán được giới thiệu trong bảng 2.

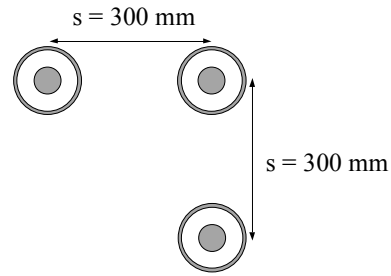
Bảng 2. Hệ số tổn thất λ''_1 tính toán theo hai phương pháp

	IEC-60287			Phương pháp đề xuất		
	Pha A (trái)	Pha B (giữa)	Pha C (phải)	Pha A (trái)	Pha B (giữa)	Pha C (phải)
Hệ số tổn thất λ''_1	0,0111	0,0411	0,0104	0,0151	0,0471	0,0151

Từ kết quả tính toán ta thấy sai lệch giữa hai phương pháp là không đáng kể bởi tiêu chuẩn IEC-60287 thực chất chỉ là một trường hợp tính toán cụ thể từ phương pháp đề xuất. Chính vì vậy, phương pháp đề xuất có thể được áp dụng cho trường hợp cấu hình lắp đặt bất kỳ.

3.2. Trường hợp mạch cáp ba pha được bố trí bất kỳ

Trong một số trường hợp do yêu cầu lắp đặt cụ thể, các sợi cáp không thể bố trí đặt nằm ngang hoặc theo hình tam giác đều mà theo một cấu hình bất kỳ như minh họa trên hình 4. Với giả thiết lõi dẫn bằng đồng, vỏ kim loại bằng nhôm, vỏ cáp được tiếp địa tại một đầu (không tồn tại dòng điện khép vòng, hệ số tổn thất công suất $\lambda'_1 = 0$, vì vậy lúc này $\lambda_1 = \lambda''_1$, tổn thất trên vỏ kim loại chỉ do dòng điện xoáy Eddy gây ra). Lúc này hệ số tổn thất công suất của các sợi cáp có thể tính toán theo phương pháp đề xuất. Các thông số của các sợi cáp của được sử dụng như trong bảng 1.



Hình 4. Mạch cáp ba pha lõi đơn được bố trí bất kỳ

Kết quả tính toán được giới thiệu trong bảng 3.

Bảng 3. Hệ số tổn thất λ''_1 với mạch cáp ba pha bố trí bất kỳ

	Pha A (trên cùng bên trái)	Pha B (trên cùng bên phải)	Pha C (ở dưới)
Hệ số tổn thất λ''_1	0,1031	0,1500	0,1031

4. KẾT LUẬN

Tiêu chuẩn IEC-60287 thường được sử dụng để tính toán khả năng tải của cáp ngầm cao thế. Tuy nhiên tiêu chuẩn này chỉ hướng dẫn tính toán khi cáp lõi đơn của mạch cáp ba pha được đặt nằm ngang hoặc đặt theo hình tam giác. Trong khi đó, tùy thuộc điều kiện thực tế mà các sợi cáp có thể được bố trí đặt sao cho phù hợp với địa hình. Vị trí tương đối giữa các sợi cáp ảnh hưởng nhiều đến khả năng tải của chúng. Chính vì vậy, bài báo này giới thiệu một phương pháp giải tích cho phép tính toán trước hết là hệ số tổn thất công suất trên vỏ kim loại của cáp và từ đó tính toán được khả năng tải của cáp. Phương pháp này có thể được áp dụng tính toán khả năng tải của các mạch cáp được bố trí bất kỳ hoặc số lượng bất kỳ các mạch cáp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Argaut P, Dejean P, Dorison E, Simeon E. Câbles isolés moyenne, haute et très haute tensions. *RGE n°11/92* 1992.
- [2]. CIGRE Comité d'Études 21. Guide pour la protection des liaisons à connexions spéciales d'écrans contre les surtensions d'écran. *Electra N°128* 1990.
- [3]. IEC 60287-1-1. Electric cables - Calculation of the current rating – Part 1 -1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General. 2006.
- [4]. IEC Standard, "Electric Cables - Calculation of the Current Rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of thermal resistance, Publication IEC 60287-2-1, 1994.
- [5]. CIGRE Working Group 02, "Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function", *Electra*, no 24 Oct.1972, pp. 63-96.
- [6]. CIGRE Working Group 02, "Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 2. Emergency ratings and Short Duration Response to a Step Function", *Electra*, no 44 Jan.1976, pp. 3-16.
- [7]. G.J. Anders, M.A. El-Kady, "Transient Ratings of Buried Power Cables Part 1: Historical Perspective and Mathematical Model", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol 7, no 4, Oct. 1992, pp. 1724-1734.