ẢNH HƯỞNG CỦA CÁP NGẦM CAO THẾ ĐẾN VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐIỆN

INFLUENCES OF UNDERGROUND HIGH VOLTAGE CABLE LINES TO BEHAVIORS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Nguyễn Hồng Việt Phương[1]*, Nguyễn Thanh Tú[1], Nguyễn Thị Thùy Dung[1], Lữ Anh Thư[1]

[1]Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: nhvphuong@dut.udn.vn

(Nhận bài: 07/9/2020; Chấp nhận đăng: 22/11/2020)

Tóm tắt - Một câu hỏi thường xuyên đối với các kỹ sư điện: Loại công nghệ nào nên được sử dụng cho dự án của họ - đường dây trên không hay cáp ngầm. Những năm gần đây, việc sử dụng cáp ngầm cao áp trong hệ thống truyền tải ở các nước trên thế giới trong đó có Việt Nam trở nên phổ biến hơn vì những lợi ích mà nó mang lại. Trong bài báo này, tập trung phân tích mô phỏng và đánh giá sự ảnh hưởng của cáp ngầm đến vận hành hệ thống điện. Các kết quả được mô phỏng trên phần mềm Digsilent/ Power Factory. Trong phần mềm này, các phương trình nút được sử dụng để biểu diễn cho các mạng được thực hiện bằng phương pháp Newton- Ramphson cổ điển.

Từ khóa - Cáp ngầm; XLPE; tổn thất điện áp; tổn thất công suất

Abstract - It is a frequent question for electrical engineers: what type of technology should be used for their project - overhead line or underground cable. In recent years, the use of high-voltage underground cables in transmission systems in countries around the world, including Vietnam, has become more popular because of the benefits it brings. In this paper, focus on simulation analysis and assessment of influence of underground cable lines for high voltage on the behavior of electric power system. The results were simulated on Digsilent/Power Factory. In this software, the nodal equations used to represent the analyzed networks are implemented by using Newton-Raphson (Power Equations, classical) method.

Key words - underground cables; XLPE; voltage loss; power loss

1. Đặt vấn đề

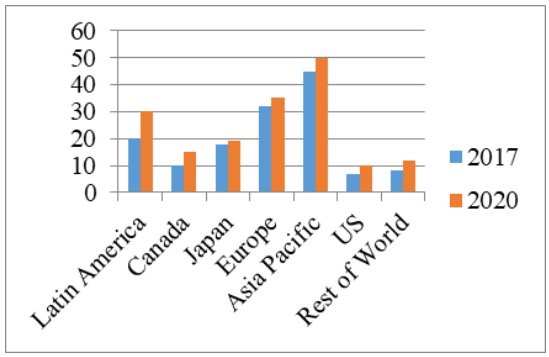
Điện năng là nguồn năng lượng đóng vai trò quan trọng trong quá trình sản xuất, phát triển kinh tế xã hội. Hệ thống truyền tải điện năng sử dụng các đường dây trên không để cung cấp điện đến nhiều công trình, các khu công nghiệp, đáp ứng sự phát triển nhanh của đất nước.

Điện năng được tạo ra ở các nhà máy điện được truyền tải qua các hệ thống như máy biến áp, đường dây điện và các thiết bị khác, trước khi đến với các hộ tiêu thụ, người sử dụng. Thực tế, tổng lượng điện năng phân phối đến khách hàng luôn thấp hơn tổng lượng điện năng được các nhà máy điện tạo ra. Đó là do có tổn hao trong hệ thống và sự khác biệt về lượng điện năng này được gọi là tổn thất do truyền tải và phân phối. Thông thường, trong tổng tổn thất điện năng tiêu thụ để phục vụ công nghệ truyền tải gồm khoảng 65% tiêu tốn trên đường dây, 30% trong máy biến áp, còn trong các phần tử khác của mạng điện (cuộn điện kháng, thiết bị bù, thiết bị đo lường) chiếm khoảng 5%.

Từ đó, ngành điện không những cần phải cung cấp điện năng đầy đủ mà còn phải nghiên cứu, áp dụng các giải pháp mới để giảm tỉ lệ tổn thất điện năng xuống mức hợp lý nhằm nâng cao hiệu quả trong quá trình sản xuất, kinh doanh. Trong đó, việc đưa cáp ngầm vào vận hành là một giải pháp hiệu quả để giảm tổn thất điện năng, nâng cao hiệu quả vận hành.

Xu hướng sử dụng hệ thống truyền tải điện bằng cáp ngầm cao áp đối với một số nước trên thế giới đã tăng rất mạnh trong những năm gần đây như thể hiện ở Hình 1. Nó cũng thể hiện một xu hướng mới của thế giới đối với hệ thống điện hiện đại vì những lợi ích lâu dài của việc sử dụng cáp ngầm cho hệ thống truyền tải [1]. Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển nhanh của đất nước đã hình thành rất nhiều thành phố lớn, dân cư đông đúc, với nhiều công trình và tòa nhà cao tầng, và đặc biệt là việc đòi hỏi yêu cầu về thẩm mĩ của các thành phố hiện đại thì việc xây dựng các đường dây truyền tải cao áp trên không gặp nhiều khó khăn. Do đó việc xây dựng các đường dây truyền tải điện cao áp bằng hệ thống cáp ngầm đã trở thành một phần tất yếu của các hệ thống điện hiện đại trong các thành phố trong đó có Đà Nẵng.

Trong bài báo này, các chế độ vận hành của lưới điện 110 kV Đà Nẵng được nghiên cứu khi có sự kết nối của cáp ngầm cao thế ở một số khu vực trong lưới điện. Kết quả mô phỏng được so sánh, đánh giá để cho thấy sự ảnh hưởng của cáp ngầm cao thế đến sự vận hành của hệ thống điện. Các kết quả được mô phỏng trên phần mềm Digsilent/ Power Factory. Trong phần mềm này, các phương trình nút được sử dụng để biểu diễn cho các mạng được thực hiện bằng phương pháp Newton- Ramphson cổ điển [2].



Hình 1. *Xu hướng sử dụng cáp trên thế giới*

[1] The University of Danang - University of Sciences and Technology (H.V.P. Nguyen, Nguyen Thanh Tu, Nguyen Thi Thuy Dung, Lu Anh Thu)

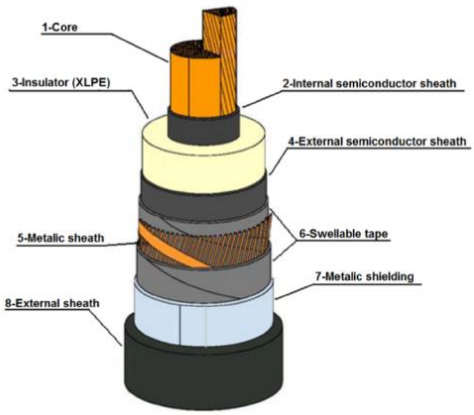
2. Cấu trúc cáp ngầm

2.1. Cấu trúc

Cáp là dây dẫn điện mềm được bọc cách điện và bọc vỏ kim loại hoặc vật liệu polymer để ngăn chặn các tác động bên ngoài đối với cách điện như chênh lệch độ cao, ngâm trong nước,… Chúng phải chịu sự thay đổi nhiệt độ lớn do dòng điện làm việc và điều kiện nhiệt độ môi trường. Khi đã được lắp đặt xong, cáp phải vận hành tin cậy trong nhiều thập niên.

Cấu tạo của cáp gồm một (hay nhiều) dây dẫn chính (lõi), cách điện đối với đất và giữa các lõi với nhau, vỏ kim loại và các lớp vỏ bọc bảo vệ như thể hiện trên Hình 2.

Loại cáp khô dùng cách điện polymer XLPE (polyethylen mạch vòng) dùng cho mục đích truyền tải được nghiên cứu vào những năm 60 của thế kỷ XX. Loại cáp này gồm lõi bằng đồng hoặc nhôm bện với cách điện ép và được bảo vệ bởi lớp vỏ kim loại và lớp bọc chống ăn mòn [3].



Hình 2. *Cấu trúc cáp*

1- Lõi đồng; 2- Lớp bán dẫn điện trong; 3- Cách điện XLPE; 4- Lớp bán dẫn điện ngoài; 5- Màn chắn kim loại; 6- Băng chống thấm; 7- Vỏ kim loại; 8- Lớp vỏ ngoài cùng bằng PVC

2.2. Lõi cáp

Mục đích của lõi cáp là truyền tải dòng điện với tổn thất thấp. Đối với lõi cáp được bện, tiết diện là không đặc và điều này được bù bằng cách tăng điện trở suất của dây dẫn. Được thực hiện bằng cách tính toán lại điện trở suất như sau [4-5]:

$$\rho'_{(a)} = \rho.\frac{r_1^2\pi}{A}[\Omega m] \quad (1)$$

$$\rho'_{(b)} = R_{DC}.\frac{r_1^2\pi}{l}[\Omega m] \quad (2)$$

Trong đó, ρ là điện trở suất của lõi dẫn, r_1 là bán kính thực tế của lõi, A là mặt cắt ngang danh định diện tích của dây dẫn, l là chiều dài 1 km, R_{DC} là điện trở DC trên 1 km chiều dài của dây dẫn.

2.3. Lớp cách điện bên trong

Mục đích của lớp cách điện này là đảm bảo không có mối liên hệ về điện giữa hai thành phần mang dòng điện của cáp là lõi và vỏ.

Ảnh hưởng của các lớp bán dẫn được tính toán mô hình hóa lớp cách điện. Các thông số của lớp cách điện được mở rộng để bao gồm các lớp bán dẫn, và hằng số điện môi được tăng lên như sau:

$$\varepsilon = \varepsilon_{ins}.\frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(b/a)} \quad (3)$$

Trong đó, ε là hằng số điện môi tương đối của lớp cách điện, b và a là bán kính bên trong và bên ngoài của lớp cách điện, r_1, r_2 là bán kính bên trong của vỏ và bán kính bên ngoài của dây dẫn.

Từ trường dọc trục liên quan sẽ gây ra hiệu ứng điện từ, làm tăng tổng điện cảm. Mật độ từ thông gây ra bởi hiệu ứng điện từ được tính bởi công thức sau:

$$B_{sol}(r) = \mu_{ins,r}\mu_0 N^2 I \quad (4)$$

Trong đó, $\mu_{ins,r}$ là độ từ thẩm tương đối của cách điện và N là số vòng mỗi mét của cáp. Điện cảm được cho bởi công thức:

$$L = \mu_{ins,r}\mu_0 N^2\pi\left(r_2^2 - r_1^2\right) \quad (5)$$

và $$\mu_{ins,r} = \mu_{ins,r} + \frac{\mu_{ins,r}}{\ln(r_2/r_1)}.2\pi^2 N^2\left(r_2^2 - r_1^2\right) \quad (6)$$

2.4. Trở kháng của cáp

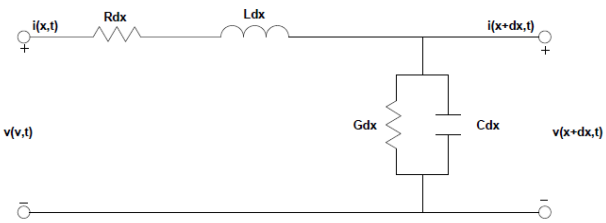
Bằng việc áp dụng định luật Kirchhoff vào mạch thay thế tương đương của các phần tử cáp như ở Hình 3 [6-7], có thể tính được điện áp $v(x, t)$ và dòng điện $i(x, t)$. Nếu vi phân chiều dài dx được xem là nhỏ và bằng cách sử dụng sự phụ thuộc vào tần số, phương trình truyền sóng điều hòa theo thời gian:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left(V(x,\omega)\right) &= \left[Z(\omega)\right].\left(I(x,\omega)\right)\\ \frac{\partial}{\partial x}\left(I(x,\omega)\right) &= \left[-Y(\omega)\right].\left(V(x,\omega)\right)\end{aligned} \quad (7)$$

Phương pháp các thành phần sóng được thể hiện ở công thức (7). Trong đó chuỗi kết nối các thành phần đường dây dx đại diện cho cáp truyền tải. Phương pháp này được sử dụng để tìm các nghiệm $V(x, \omega)$ và $I(x, \omega)$ bằng việc kết hợp các đạo hàm dòng điện và điện áp trong (7):

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x^2}V(x,\omega) &= \gamma^2 V(x,\omega)\\ \frac{\partial^2}{\partial x^2}I(x,\omega) &= \gamma^2 I(x,\omega)\\ \gamma &= \sqrt{[Z][Y]} = \alpha + j\beta\end{aligned} \quad (8)$$

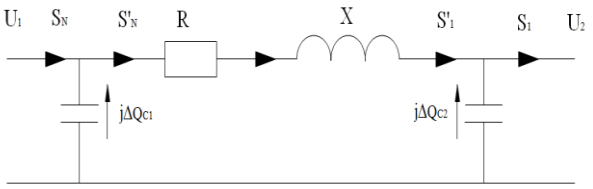
Trong đó, α là độ suy giảm của sóng, β là hằng số pha, γ là hằng số truyền sóng.



Hình 3. *Mạch tương đương của các phần tử cáp*

2.5. Sự phân bố công suất

Sơ đồ thay thế tính toán cho đường dây [8]:



Hình 5. *Sơ đồ thay thế tính toán cho đường dây*

Công suất phản kháng do điện dung cuối đường dây:

$$jQ_{C1} = jQ_{C2} = jU_{dm}{}^2.b_0.\frac{l}{2} \quad (9)$$

Công suất cuối tổng trở Z của đường dây:

$$S_1^{'} = S_1 + (-\Delta Q_{C2}) = P_1^{'} + jQ_1^{'} \quad (10)$$

Điện áp đầu nguồn:

$$U_P = U_2 + \Delta U \quad (11)$$

Tổn thất điện áp trên đường dây:

$$\Delta U\% = \frac{P_1'.R + Q_1'.X}{U_{dm}}100\% \quad (12)$$

3. Mô phỏng ảnh hưởng của cáp ngầm

Trong bài báo này, lưới điện 110 kV Đà Nẵng như thể hiện ở Hình 6 được mô phỏng trong phần mềm Digsilent/ Power Factory để đánh giá sự ảnh hưởng của cáp ngầm cao áp đến các chế độ vận hành lưới điện. Phần mềm này sử dụng phương pháp Newton- Ramphson cổ điển để giải quyết tính toán trào lưu công suất với phần mô hình hóa cáp ngầm như đã trình bày ở phần 2.

Lưới điện được mô phỏng theo 3 trường hợp sau:

Trường hợp 1: Sơ đồ lưới điện sử dụng toàn bộ đường dây trên không

Trường hợp 2: Sơ đồ lưới điện được thay thế bằng một đoạn cáp dài 5,549km từ cột H17 đến E11.01 (vị trí 1 trên Hình 6)

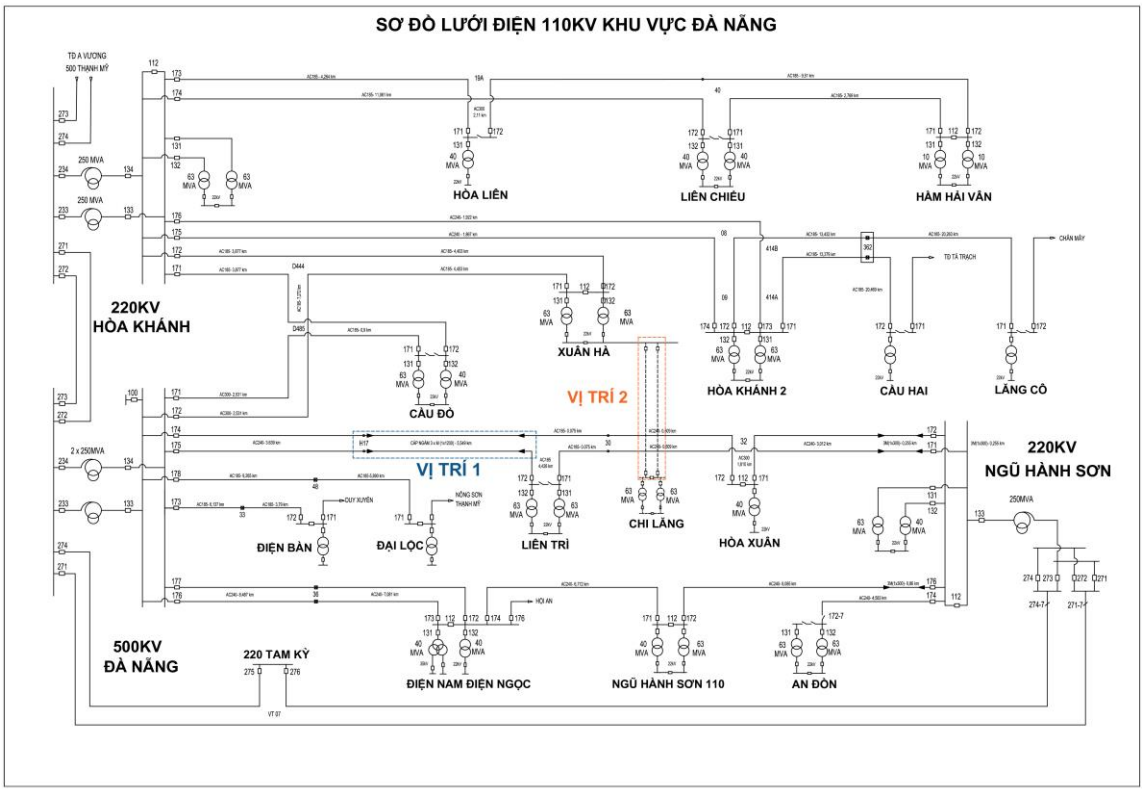
Trường hợp 3: Sơ đồ lưới điện có hai đoạn cáp: một đoạn dài 5,549km từ cột H17 đến E11.01 (vị trí 1) và một đoạn cáp dài 3,1km tại Chi Lăng (vị trí 2 trên Hình 6).

3.1. Tổn thất điện áp trên đường dây

Kết quả tính toán tổn thất điện áp của một số đường dây điển hình được tóm tắt ở Bảng 1. Kết quả mô phỏng cho thấy, tổn thất điện năng thường cao hơn đối với đường dây trên không so với cáp ngầm tương đương về cường độ. Nguyên nhân chính là do tổn hao Joule đối với cáp ngầm thấp hơn nhiều do tổng diện tích tiết diện dây dẫn dày hơn.

Bảng 1. *Tổn thất điện áp trên đường dây*

STT	Tuyến đường dây	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3
1	220kV Ngũ Hành Sơn – An Đồn	1,19 kV	1,18 kV	1,17 kV
2	500kV Đà Nẵng – Điện Nam Điện Ngọc	1,59 kV	1,55 kV	1,29 kV
3	110kV Ngũ Hành Sơn – Điện Nam Điện Ngọc	1,11 kV	1,11 kV	1,06 kV
4	220kV Ngũ Hành Sơn – Hòa Xuân	0,71 kV	0,68 kV	0,47 kV
5	500kV Đà Nẵng – H17	1,56 kV	1,53 kV	1,39 kV



Hình 6. *Sơ đồ lưới điện 110kV Đà Nẵng*

Vì khi thay thế đường dây trên không bằng cáp, hằng số điện môi của cáp lớn, khoảng cách giữa các pha của cáp nhỏ hơn so với đường dây trên không thì:

$$C_{cap} > C_{day} \quad (13)$$

$$\text{Và } Q_C = \frac{1}{2} U_{dm}{}^2 .\omega.C.l \quad (14)$$

$$\Rightarrow Q_{Ccap} > Q_{Cday} \quad (15)$$

Kết hợp với công thức (12) cho thấy tổn thất điện áp trong hệ thống toàn đường dây trên không lớn hơn trong hệ thống đã được thay thế bằng các đoạn cáp [7].

Ở đây, tổn thất điện áp tại tuyến đường dây từ trạm 500kV Đà Nẵng đến Điện Nam Điện Ngọc là lớn nhất và tuyến 220kV Ngũ Hành Sơn đến Hòa Xuân là nhỏ nhất vì phụ thuộc vào chiều dài đường dây, tương ứng là 15,568km và nhỏ nhất là 3,012km.

3.2. Tổn thất công suất trên đường dây

Bảng 2. *Tổn thất công suất trên đường dây*

STT	Tuyến đường dây	Trường hợp 1	Trường hợp 2	Trường hợp 3
1	220kV Ngũ Hành Sơn – Hòa Xuân	0,13 + j0,23 MVA	0,11 + j0,19 MVA	0,04 + j0,12 MVA
2	500kV Đà Nẵng – Hòa Xuân	0,53 + j4,49 MVA	0,24 + j4,43 MVA	0,18 + j4,51 MVA
3	220kV Ngũ Hành Sơn – Liên Trì	0,09 + j0.14 MVA	0,05 + j0,08 MVA	0,03 + j0,08 MVA
4	500kV Đà Nẵng – Liên Trì	0,56 + j3,91 MVA	0,42 + j3,98 MVA	0,43 + j3,86 MVA

Kết quả tính toán tổn thất công suất của một số đường dây điển hình được tóm tắt ở Bảng 2. Như đã chứng minh tại (13), (14) và (15):

$$Q_{Ccap} > Q_{Cday}$$

và từ công thức (10) suy ra:

$$S'_{1cap} < S'_{1day}$$

$$\Delta P_{cap} < \Delta P_{day}$$

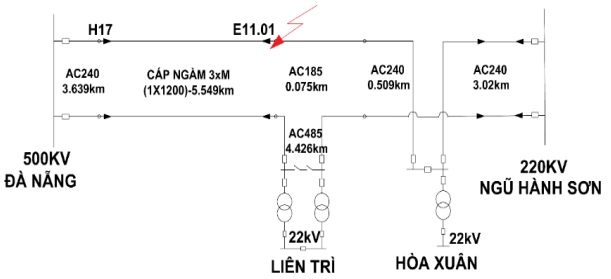
$$\text{Và } \Delta Q'_{1cap} < \Delta Q'_{1day}$$

Vì vậy, việc lắp đặt thêm các đoạn cáp ngầm đã giúp cho hệ thống giảm được tổn thất công suất phản kháng và công suất tác dụng.

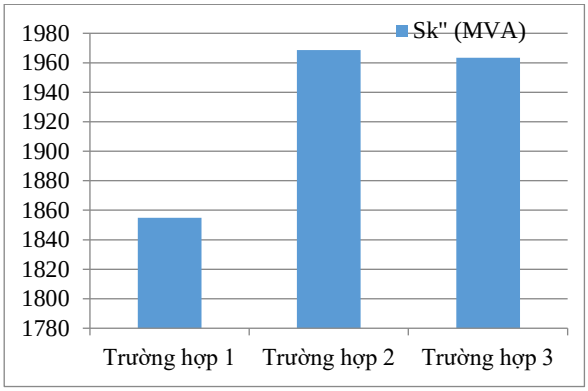
3.3. Ngắn mạch

Để so sánh ảnh hưởng của cáp ngầm đến sự cố ngắn mạch, hệ thống được mô phỏng điểm ngắn mạch tại vị trí cuối tuyến đường dây từ cột H17 đến E11.01 dài 5,549km. Vị trí điểm ngắn mạch được thể hiện trong Hình 7. Công suất ngắn mạch và dòng điện ngắn mạch được thể hiện ở Hình 8 và Hình 9.

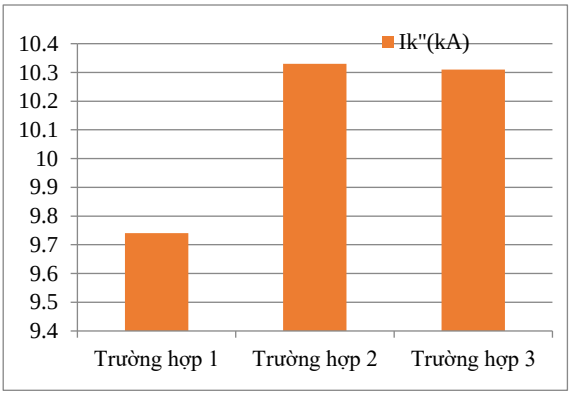
Như được biểu diễn trong Hình 8 và Hình 9, vì đường dây trên không có trở kháng lớn hơn cáp ngầm nên công suất ngắn mạch và dòng điện ngắn mạch nên các giá trị này trong trường hợp 1 nhỏ hơn đáng kể so với sơ đồ lưới điện được lắp đặt thêm cáp ngầm trong trường hợp 2 và trường hợp 3.



Hình 7. *Vị trí điểm ngắn mạch*



Hình 8. *Công suất ngắn mạch trong 3 trường hợp*



Hình 9. *Dòng điện ngắn mạch trong 3 trường hợp*

4. Kết luận

Từ các kết quả mô phỏng đã thu được trong nghiên cứu này, ta nhận thấy rằng việc áp dụng cáp ngầm vào vận hành hệ thống điện sẽ có những tác động tích cực đến trào lưu công suất như giảm được tổn thất điện áp, tổn thất công suất. Đây là các vấn đề quan trọng mà ngành điện đang tìm cách khắc phục, giải quyết. Giảm các giá trị tổn thất này sẽ đem đến cho khách hàng nguồn điện tin cậy, chất lượng. Việc đưa vào sử dụng cáp ngầm sẽ làm tăng giá trị dòng điện ngắn mạch, tuy nhiên xác suất xảy ra sự cố trên cáp ngầm là rất thấp so với đường dây trên không nên vấn đề này không làm giảm ưu thế về mặt kỹ thuật của cáp ngầm so với đường dây trên không.

Có một số vấn đề khiến lựa chọn cáp ngầm khó khăn hơn về mặt kỹ thuật và tốn kém. Tuy nhiên, bất chấp chi phí và thách thức kỹ thuật, có những trường hợp mà cáp ngầm là lựa chọn ưu tiên hơn so với đường dây trên không. Ngoài ra, việc ngầm hóa lưới điện còn giảm thiểu tối đa sự cố mất điện do thiên tai, sét đánh, cây đổ ngã,… gây ra.

Đồng thời nâng cao tính an toàn sử dụng điện trong nhân dân, loại bỏ được các điểm mất an toàn do phạm vi hành lang an toàn lưới điện cao áp. Ngầm hóa lưới điện sẽ trả lại không gian cho cảnh quan đô thị, đảm bảo tính mỹ quan cho khu vực và tăng hiệu quả sử dụng đất.

Lời cám ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2019-DN02-57.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] P. Stanchev, D. Georgiev, and Y. Kamenov, "Influence of underground cable lines for high voltage on the behavior of electric power system", 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447127.

[2] M. Cirnu and I. Badralexi, "On Newton-Raphson Method", *Rom. Econ. Bus. Rev.*, vol. 5, pp. 91–94, 1995.

[3] M. Santos and M. A. Calafat, "Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, pp. 1–16, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.003.

[4] Z. Keyi, L. Bin, L. Zhiyuan, C. Shukang, and Z. Ruiping, "Inductance Computation Consideration of Induction Coil Launcher", *Magn. IEEE Trans.*, vol. 45, pp. 336–340, 2009, doi: 10.1109/TMAG.2008.2008833.

[5] K. Zhou, W. Zhao, and X. Tao, "Toward Understanding the Relationship between Insulation Recovery and Micro Structure in Water Tree Degraded XLPE Cables", *Dielectr. Electr. Insul. IEEE Trans.*, vol. 20, pp. 2135–2142, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6678862.

[6] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, B. Taj, and O. Palizban, "Ampacity calculation of the underground power cables in voluntary conditions by finite element method", 2011, doi: 10.1109/ECTICON.2011.5947925.

[7] Y. S. Bezverkhnia, "A voltage loss preliminary estimation in ac busbars", *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, doi: 10.29202/nvngu/2019-4/13.

[8] M. Anumaka, "Analysis of Technical losses in Electrical Power System (Nigeria 330kV Network as a Case Study", *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.*, vol. Vol. 12, pp. 333–338, 2012.

[9] H. Al-Khalidi and A. Kalam, "The Impact of Underground Cables on Power Transmission and Distribution Networks", 2006, pp. 576–580, doi: 10.1109/PECON.2006.346717.