

TÍNH TOÁN TỶ SỐ TỶ THẤT ĐIỆN NĂNG CHO LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI BẰNG THUẬT TOÁN DÒNG ĐIỆN NÚT TƯƠNG ĐƯƠNG

CALCULATING ENERGY LOSS FOR ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS BY MEANS OF AN EQUIVALENT INJECTION CURRENT ALGORITHM

Trần Thanh Sơn, Trần Anh Tùng

Trường Đại học Điện lực; sontt@epu.edu.vn

Tóm tắt - Tính toán trào lưu công suất là một nhiệm vụ quan trọng trong phân tích hệ thống điện. Đặc biệt, việc sử dụng một thuật toán có độ chính xác cao và thời gian tính toán nhanh là một yêu cầu cần thiết cho các vấn đề tối ưu lưới điện phân phối đang được quan tâm nghiên cứu hiện nay. Bài báo này giới thiệu ứng dụng của thuật toán dòng điện nút tương đương trong phân tích, tính toán tổn thất điện năng của lưới điện phân phối. Thuật toán đề xuất sau đó được áp dụng để tính toán tổn thất điện năng cho lộ 473E4.6 của lưới điện trung áp Việt Trì. Hiệu quả tính toán của thuật toán dòng điện nút tương đương được so sánh với thuật toán Gauss-Seidel nhằm làm rõ ưu điểm và triển vọng ứng dụng của thuật toán này.

Từ khóa - trào lưu công suất; dòng điện nút tương đương; phương pháp Gauss-Seidel; tổn thất điện năng; tổn thất công suất.

Abstract - Calculating power flow is an important task in the analysis of a power system. Especially, the use of a highly accurate algorithm with less computing time is a necessity for the problems of distribution system optimization which is a current concern. This paper introduces the application of an equivalent current injection algorithm in analyzing energy loss for an electric distribution network. The proposed algorithm has been applied in calculating the energy loss of the 473E4.6 feeder in the Viet Tri medium-voltage network. The calculation effectiveness of this algorithm has been compared to the Gauss-Seidel algorithm in order to highlight its advantages and application prospects.

Key words - power flow; equivalent injection current; Gauss-Seidel method; electric energy loss; power loss.

1. Đặt vấn đề

Lưới điện phân phối trung áp được dùng để kết nối các trung tâm phụ tải với lưới điện truyền tải. Các lưới điện này thường có cấu trúc hình tia, bao gồm một đường trục chính từ trạm biến áp và các đường rẽ nhánh kết nối phụ tải tới đường trục này. Lưới điện hình tia được sử dụng phổ biến bởi cấu trúc đơn giản và chi phí đầu tư thấp. Tuy nhiên, do điện áp của mạng điện phân phối thấp (dòng điện trên đường dây lớn hơn) dẫn đến tổn thất công suất đáng kể trên lưới điện này so với lưới điện truyền tải. Theo ước tính của Tập đoàn Điện lực Việt Nam, tổn thất điện năng toàn hệ thống năm 2014 là 8,49%, trong đó tổn thất trên lưới điện phân phối chiếm khoảng 6%. Tỷ lệ tổn thất này được kỳ vọng tiếp tục giảm trong những năm tiếp theo. Chính vì vậy, giảm tổn thất điện năng là một yêu cầu cấp thiết đối với các công ty điện lực, đặc biệt trong lĩnh vực phân phối điện năng.

Các biện pháp phổ biến cho phép giảm tổn thất điện năng trên lưới điện phân phối gồm có tái cấu trúc lưới điện, bù công suất phản kháng... Tái cấu trúc lưới điện sẽ thay đổi dòng công suất đi từ nút nguồn đến phụ tải một cách hợp lý hơn, cho phép giảm tổn thất trên đường dây. Trong khi đó, phương pháp sử dụng tụ bù không chỉ cho phép làm giảm tổn thất mà còn cải thiện điện áp, hệ số công suất của lưới điện. Các giải pháp này đòi hỏi giải quyết các vấn đề tối ưu liên quan đến các ràng buộc về kinh tế và kỹ thuật, để có thể lựa chọn cấu hình tối ưu của lưới điện hay vị trí và dung lượng bù tối ưu khi sử dụng tụ bù.

Các lời giải tối ưu này chỉ có thể đạt được khi bài toán trào lưu công suất được giải nhiều lần. Chính vì vậy, nhiều thuật toán trào lưu công suất có độ chính xác cao và thời gian tính toán nhanh đã được đề xuất cho lưới điện phân phối. Các thuật toán này có thể kể nghiên cứu được đề xuất bởi Hamouda và đồng nghiệp [1]. Bhujel [2] đề xuất thuật toán dựa trên phương pháp lan truyền thuận, nghịch. Gosh và Das [3] đã đề xuất thuật toán trào lưu công suất cho lưới

phân phối sử dụng đánh giá dựa trên biểu thức đại số của điện áp nút nhận. Teng [4] đã sử dụng phương pháp dòng điện nút tương đương cho thuật toán trào lưu công suất nhằm giải quyết bài toán tối ưu vị trí và dung lượng tụ bù trên lưới phân phối. Các thuật toán khác được tổng hợp và hiệu năng của chúng được so sánh bởi Bhutad [5]. Trong bài báo này, thuật toán dòng điện nút tương đương được giới thiệu. Thuật toán đề xuất sau đó được áp dụng để tính toán tổn thất điện năng cho lộ 473E4.6 của lưới điện phân phối trung áp Việt Trì. Hiệu quả tính toán của thuật toán cũng được so sánh với thuật toán Gauss-Seidel nhằm chỉ rõ ưu điểm và khả năng ứng dụng của thuật toán này.

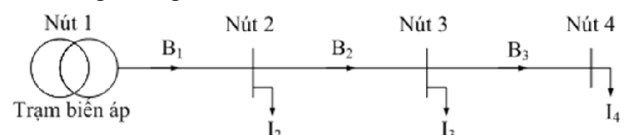
2. Thuật toán dòng điện nút tương đương

Thuật toán dòng điện nút tương đương sử dụng các ma trận Dòng điện Nút – Dòng điện Nhánh (DNDN) và Dòng điện Nhánh-điện Áp Nút (DNAN) để giải bài toán trào lưu công suất của lưới điện phân phối. Đối với lưới điện phân phối, phụ tải tại nút i được biểu diễn bởi phương trình (1) và dòng điện phụ tải tại nút i được biểu diễn bởi phương trình (2):

$$S_i = P_i + jQ_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$I_i = (S_i/U_i)^* \quad (2)$$

Đối với mô hình lưới điện phân phối trên Hình 1, dòng điện trên các nhánh có thể được biểu diễn bởi dòng điện nút tương đương:



Hình 1. Mô hình lưới điện phân phối đơn giản

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 \quad (3)$$

$$B_2 = I_3 + I_4 \quad (4)$$

$$B_3 = I_4 \quad (5)$$

Hệ phương trình trên được viết lại dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Đối với lưới điện phân phối có nhiều nhánh rẽ từ đường trục chính, các nút được đánh số lần lượt từ nút nguồn cho đến hết nhánh rẽ đầu tiên trên trục chính, sau đó lần lượt đến các nhánh rẽ tiếp theo cho đến nhánh cuối cùng của lưới điện. Chỉ số của các nhánh cũng được quy ước theo cách tương tự. Hình 2 minh họa cho nguyên tắc đánh số thứ tự các nút và các nhánh của lưới điện phân phối cho bài toán giải tích lưới điện.

Các phương trình dòng điện nhánh có thể được tổng quát hóa bởi phương trình (7):

$$[B] = [DNDN][I] \quad (7)$$

Trong đó: B – véc tơ dòng điện nhánh;

DNDN – ma trận Dòng điện Nút – Dòng điện Nhánh;

I – véc tơ dòng điện nút.

2.1. Thuật toán xây dựng ma trận DNDN

Ma trận Dòng điện Nút – Dòng điện Nhánh của lưới điện phân phối được xây dựng dựa trên luật Kirchhoff, dòng điện như minh họa cho lưới điện phân phối trên Hình 1.

Ma trận DNDN được xây dựng theo các bước sau:

a. Bước 1

Tạo ma trận rỗng kích thước $m \times n-1$, trong đó m là số nhánh và n là số nút của lưới điện.

b. Bước 2

Nếu nhánh B_k nằm giữa nút i và nút j , sao chép cột i của ma trận DNDN tới cột j và cộng thêm 1 vào vị trí của hàng k và cột j .

c. Bước 3

Lặp lại bước 2 cho tới khi tất cả các nhánh được tính đến trong ma trận DNDN.

Thuật toán xây dựng ma trận DNDN được minh họa trên Hình 3.

2.2. Thuật toán xây dựng ma trận DNAN

Ma trận DNAN biểu diễn mối quan hệ giữa dòng điện nhánh và điện áp nút. Sự chênh lệch điện áp giữa hai nút kề nhau trên lưới điện được giới thiệu trên Hình 1, được tính toán trực tiếp từ hệ phương trình:

$$U_2 = U_1 - B_1 Z_{12} \quad (8)$$

$$U_3 = U_2 - B_2 Z_{23} \quad (9)$$

$$U_4 = U_3 - B_3 Z_{34} \quad (10)$$

Thay các biểu thức điện áp U_2 và U_3 trong các phương trình (8) và (9) vào phương trình (10), ta có thể biểu diễn phương trình điện áp U_4 như Hình 2.

$$U_4 = U_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_1 \\ U_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ma trận DNAN được xây dựng theo các bước sau:

a. Bước 1

Tạo ma trận rỗng kích thước $n-1 \times m$, trong đó m là số

nhánh và n là số nút của lưới điện.

b. Bước 2

Nếu nhánh B_k nằm giữa nút i và nút j , sao chép hàng i của ma trận DNAN tới hàng j và điền giá trị tổng trở nhánh Z_{ij} vào vị trí phần tử thuộc hàng j và cột k .

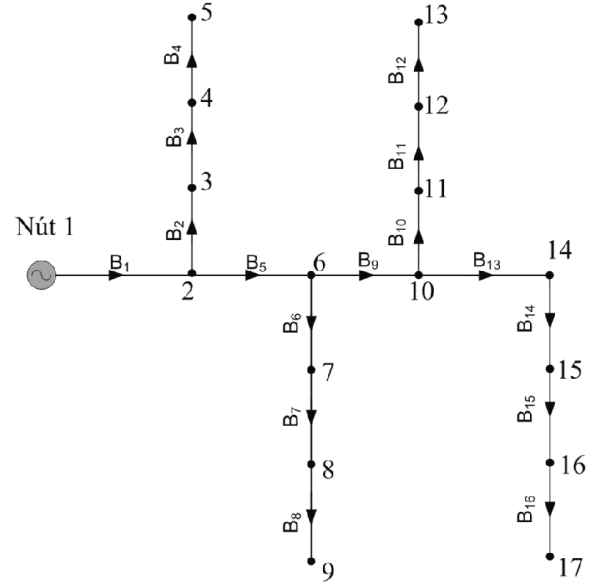
c. Bước 3

Lặp lại bước 2 cho đến khi tất cả các nhánh có mặt trong ma trận DNAN.

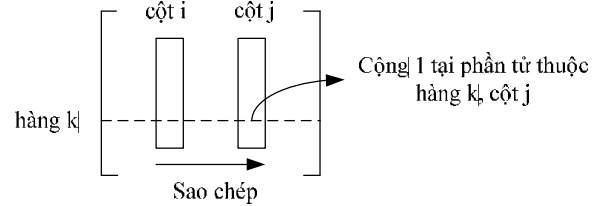
Một cách tổng quát, chúng ta có công thức sau:

$$[\Delta U] = [DNAN][B] \quad (13)$$

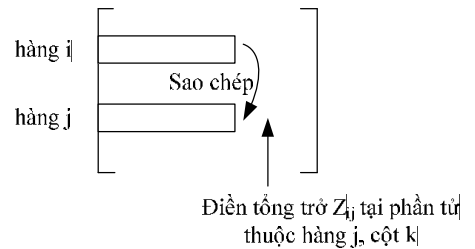
Thuật toán xây dựng ma trận DNAN được minh họa trên Hình 4.



Hình 2. Nguyên tắc đánh số thứ tự nút và dòng điện nhánh



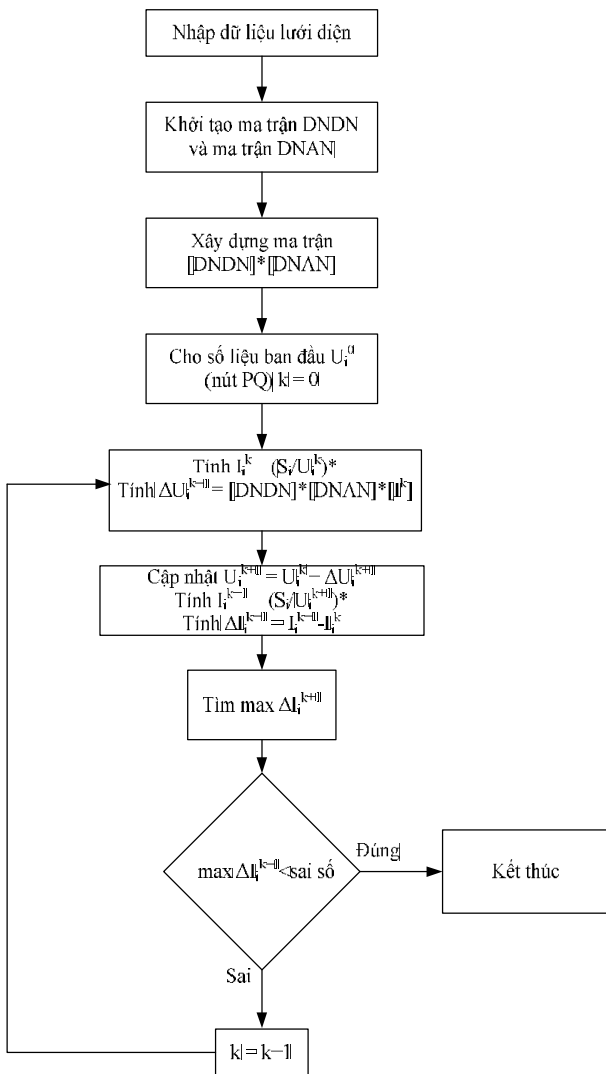
Hình 3. Xây dựng ma trận DNDN



Hình 4. Xây dựng ma trận DNAN

2.3. Thuật toán giải bài toán trào lưu công suất cho lưới phân phối

Điện áp các nút của lưới điện phân phối hình tia có thể đạt được bằng thuật toán dòng điện nút tương đương như đã đề cập trong các phần trên. Bài toán trào lưu công suất được giải theo lưu đồ thuật toán được giới thiệu trên Hình 5.



Hình 5. Thuật toán dòng điện nút tương đương

3. Tính toán tổn thất điện năng trên lộ 473E4.6 lưới điện Việt Trì

Thuật toán dòng điện nút tương đương được áp dụng để tính toán tổn thất điện năng trên lộ 473E4.6 thuộc lưới điện trung áp thành phố Việt Trì. Hiệu quả tính toán của thuật toán cũng được so sánh với thuật toán Gauss-Seidel về tốc độ hội tụ và thời gian tính toán. Sơ đồ lộ 473E4.6 được giới thiệu trên Hình 6.

Lộ 473E4.6 bao gồm 36 nút, chủ yếu cung cấp điện năng cho các phụ tải công nghiệp. Các thông số về thời gian sử dụng công suất cực đại T_{max} và thời gian tổn thất cực đại τ_{max} của phụ tải được báo cáo trong Bảng 1.

Bảng 1. Thời gian sử dụng công suất cực đại và thời gian tổn thất cực đại của lộ 473E4.6 Việt Trì.

STT	T_{max} (h)	τ_{max} (h)
1	4183	2541

Nhằm tạo thuận lợi cho việc tính toán, chúng tôi đã phát triển một phần mềm giải tích lưới điện trên nền tảng Matlab. Phần mềm này sử dụng cấu trúc dữ liệu chứa trong các file Excel. Người dùng chỉ việc nhập dữ liệu theo từng đối tượng bao gồm dữ liệu các nút, dữ liệu các đường dây

và dữ liệu các máy biến áp phân phối. Cấu trúc dữ liệu các nút, đường dây và giao diện của phần mềm lần lượt được giới thiệu trên Hình 7, Hình 8 và Hình 9. Phần mềm này gồm các khối đọc dữ liệu từ file Excel, khối tính toán trào lưu công suất và khối lưu trữ kết quả cũng dưới dạng file Excel, cho phép người dùng khai thác kết quả tính toán tổn thất công suất, tổn thất điện năng trên lưới điện nhằm phục vụ công tác quản lý và vận hành.

Ngoài ra, một mô đun bù tối ưu công suất phản kháng đang được phát triển, cho phép tính toán lựa chọn vị trí đặt và dung lượng bù tối ưu của các tụ bù.

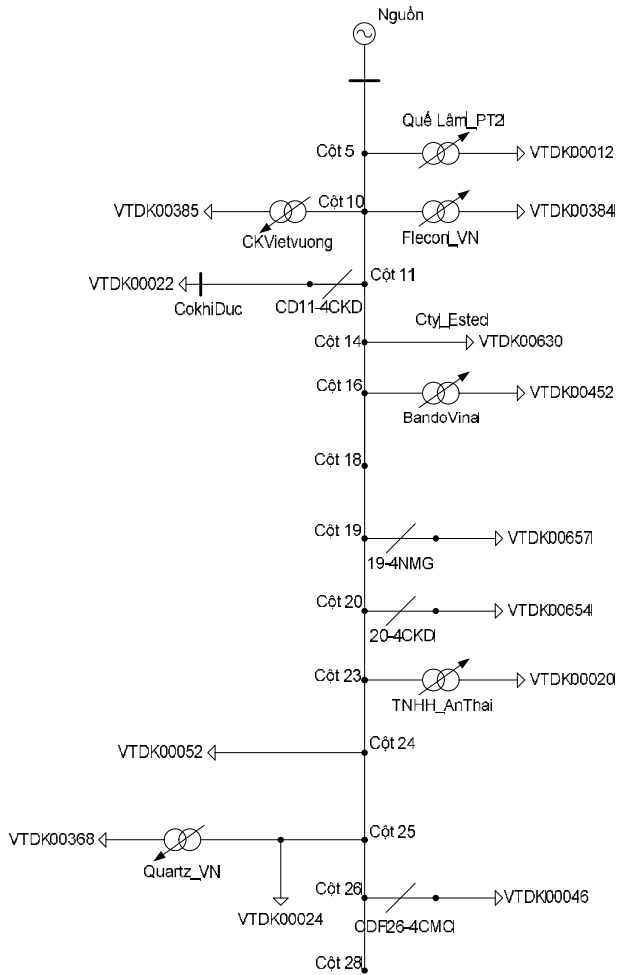
Các tính toán sử dụng hai thuật toán Gauss-Seidel và Dòng điện nút tương đương được thực hiện trên cùng một máy tính. Lời giải của bài toán trào lưu công suất đạt được khi sai số lớn nhất giữa hai phép lặp liên tiếp nhỏ hơn 10^{-8} .

Giá trị mô đun điện áp và góc pha các nút giải bằng thuật toán dòng điện nút tương đương được báo cáo trong Bảng 2.

Bảng 2. Mô đun điện áp nút của lộ 473E4.6 Việt Trì tính toán bằng thuật toán dòng điện nút tương đương

Nút	Mô đun U (kV)	Góc pha U (°)
1	22	0
2	21,99021	0,12750
3	21,98768	0,24849
4	21,98766	0,24855
5	0,39982	0,55790
6	21,97426	0,36895
7	21,97406	0,36935
8	0,39943	5,09770
9	21,97402	0,36950
10	0,39984	0,71246
11	21,97201	0,38986
12	21,97176	0,39093
13	21,96547	0,45067
14	21,96533	0,45113
15	21,96119	0,49068
16	21,96116	0,49075
17	0,39933	0,52882
18	21,95867	0,51422
19	21,95562	0,53536
20	21,95555	0,53568
21	21,95258	0,55638
22	21,95205	0,55863
23	21,94420	0,61439
24	21,94392	0,61505
25	0,39911	0,75533
26	21,94227	0,62776
27	21,93842	0,64456
28	21,93765	0,64642
29	21,94153	0,63264

30	21,93935	0,63749
31	21,93830	0,63982
32	0,40062	3,10634
33	21,93926	0,63772
34	21,94130	0,63434
35	21,93627	0,66044
36	21,94130	0,63435

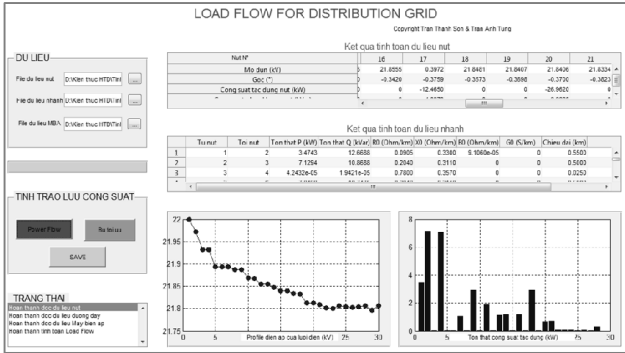


Hình 6. Sơ đồ lộ 473E4.6 Việt Trì

Hình 7. Cấu trúc dữ liệu cho các nút của lưới điện cần tính toán

Nhanh	IDNhanh	Nut dau	Nut cuoi	Chiều dài (km)	R0 (Ohm/km)	X0 (Ohm/km)	G0 (uS/km)	B0 (uS/km)
1	1	1	2	0,55	0,0905	0,33	0	91,06
2	1	2	3	0,5	0,204	0,311	0	0
3	1	3	4	0,025	0,78	0,357	0	0
4	1	3	6	0,5	0,204	0,311	0	0
5	1	6	7	0,01	0,78	0,357	0	0
6	1	6	9	0,06	0,78	0,357	0	0
7	1	6	11	0,1	0,204	0,311	0	0
8	1	11	12	0,135	0,396	0,336	0	0
9	1	11	13	0,3	0,204	0,311	0	0
10	1	13	14	0,118	0,552	0,346	0	0
11	1	13	15	0,2	0,204	0,311	0	0
12	1	15	16	0,075	0,78	0,357	0	0
13	1	15	18	0,118	0,204	0,311	0	0
14	1	18	19	0,1	0,252	0,318	0	0
15	1	19	20	0,17	0,4644	0,42	0	0

Hình 8. Cấu trúc dữ liệu cho các đường dây của lưới điện cần tính toán



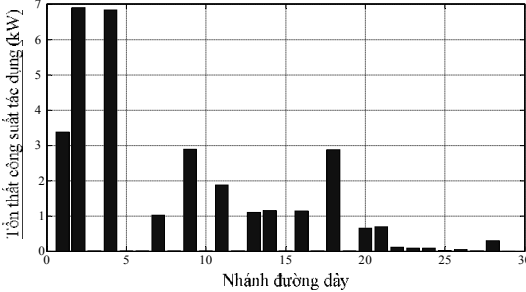
Hình 9. Giao diện của chương trình giải tích lưới điện phân phối

Thuật toán Gauss-Seidel cũng được áp dụng để tính toán giá trị điện áp các nút của lộ 473E4.6. Hiệu quả tính toán của hai thuật toán được so sánh trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh hiệu quả tính toán của hai thuật toán.

Chỉ tiêu	Thuật toán dòng điện nút tương đương	Thuật toán Gauss-Seidel
Sai số đặt	10^{-8}	10^{-8}
Số bước lặp	7	4218
Thời gian tính toán (s)	0,6864	7,4256

Từ kết quả tính toán, chúng ta thấy một cách rõ ràng sự hiệu quả về thời gian tính toán cũng như tốc độ hội tụ của thuật toán dòng điện nút tương đương so với thuật toán Gauss-Seidel. Đặc biệt, thời gian tính toán khi sử dụng thuật toán dòng điện tương đương giảm 10 lần có ý nghĩa quan trọng khi trào lưu công suất cần phải giải nhiều lần trong các bài toán tối ưu lưới phân phối.



Hình 10. Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây của lộ 473E4.6

Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây của lộ 473E4.6 tính toán bằng thuật toán dòng điện nút tương đương được giới thiệu trên Hình 10. Từ kết quả này, chúng ta thấy rằng một số nhánh đầu nguồn có tổn thất cao do dòng công suất lớn từ nguồn đi xuống phân bổ cho các nhánh. Các nhánh có tổn thất nhỏ hơn chủ yếu cho chiều dài đường dây ngắn.

Dựa trên thời gian tổn thất cực đại, tổn thất điện năng trên đường dây, trên máy biến áp và toàn lộ 473E4.6 sau đó cũng được tính toán và báo cáo trong Bảng 4.

Bảng 4. Tổn thất điện năng trên lộ 473E4.6 lưới điện Việt Trì

Chỉ tiêu	Tổn thất điện năng (kWh)
Tổn thất trên đường dây	79 157
Tổn thất trong máy biến áp	118 560
Tổng tổn thất toàn lộ 473E4.6	197 717

Các kết quả tính toán chỉ ra rằng tổn thất điện năng của lộ 473E4.6 chủ yếu do tổn thất trong các máy biến áp phân phối 22/0,4kV. Dựa trên các đánh giá này, Công ty Điện lực Phú Thọ có thể đề ra các phương án vận hành tối ưu nhằm làm giảm tổn thất điện năng cho lộ 473E4.6.

4. Kết luận

Các yêu cầu giảm tổn thất điện năng hiện nay đòi hỏi lưới điện phân phối phải được tối ưu hóa. Trong khi đó, lời giải của bài toán tối ưu đòi hỏi phải thực hiện tính toán tràn

lưu công suất nhiều lần. Do đó, việc sử dụng một thuật toán có độ chính xác cao và thời gian tính toán nhanh là một yêu cầu quan trọng. Thuật toán dòng điện nút tương đương là một thuật toán đơn giản, đáp ứng được yêu cầu về độ chính xác và tốc độ tính toán. Thuật toán đã được áp dụng để tính toán tổn thất điện năng cho lộ 473E4.6 của lưới điện Việt Trì. Bên cạnh đó, một phần mềm giải tích lưới điện phân phối cũng được phát triển nhằm ứng dụng thuật toán dòng điện nút tương đương. Các ưu điểm của thuật toán mang đến triển vọng ứng dụng cho các vấn đề tối ưu hóa lưới điện phân phối.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Abdellatif Hamouda, Khaled Zehar, Improved algorithm for radial distribution networks load flow solution, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 33, Issue 3, March 2011, Pages 508-514.
- [2] Bhujel, D.; Adhikary, B.; Mishra, A.K., "A Load Flow Algorithm for Radial Distribution System with Distributed Generation," *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2012 IEEE Third International Conference on*, vol., no., pp.375,380, 24-27 Sept. 2012.
- [3] S. Ghosh and D. Das, "Method for load-flow solution of radial distribution networks", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 146, No. 6, November 1999.
- [4] Jen-Hao Teng, "A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions", *IEEE Transactions On Power Delivery*, VOL. 18, No. 3, July 2003.
- [5] A.G. Bhutad, S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, "Three-phase Load Flow Methods for Radial Distribution Networks".

(BBT nhận bài: 26/08/2015, phản biện xong: 26/09/2015)