

Optimizing locations and capacities of distributed generation for improving voltage quality of distribution networks

Ngo Minh Khoa*, Huynh Duc Hoan

Faculty of Engineering and Technology, Quy Nhon University, Vietnam

Received: 25/10/2019; Accepted: 26/11/2019

ABSTRACT

This paper presents an optimization method for determining locations and capacities of distributed generation types in order to reduce total loss and improve voltage quality of distribution networks. The location and active power of distributed generations are determined in such a way that the total loss of active power in the network is the smallest while it still ensures constraint conditions of power balances, voltage limits at the nodes and the current limits allowed on its branches. The IEEE 33-bus test network is used to verify the proposed method in this paper. The simulation results show that when the distributed generations with optimal position and capacity are connected to the network, the total loss is reduced and voltage quality of the grid is improved significantly.

Keywords: *Distribution network, distributed generation, voltage quality, power quality, optimization method.*

**Corresponding author.*

Email: ngominhkhoa@qnu.edu.vn

Tối ưu vị trí và công suất nguồn điện phân tán nhằm nâng cao chất lượng điện áp trên lưới điện phân phối

Ngô Minh Khoa*, Huỳnh Đức Hoàn

Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Quy Nhơn, Việt Nam

Ngày nhận bài: 25/10/2019; Ngày nhận đăng: 26/11/2019

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tối ưu để xác định vị trí và công suất của các loại nguồn điện phân tán nhằm cực tiểu tổn thất công suất tác dụng và nâng cao chất lượng điện áp trên lưới điện phân phối. Vị trí và công suất tối ưu của nguồn điện phân tán được xác định sao cho tổng tổn thất công suất tác dụng trên lưới điện là nhỏ nhất mà vẫn đảm bảo các điều kiện ràng buộc về cân bằng công suất, giới hạn điện áp tại các nút và giới hạn về dòng điện cho phép trên các nhánh của lưới điện. Lưới điện IEEE 33 nút được sử dụng để kiểm chứng phương pháp được trình bày trong bài báo này. Kết quả mô phỏng cho thấy sau khi đầu nối các nguồn điện phân tán với vị trí và công suất tối ưu đã làm giảm tổn thất công suất tác dụng đáng kể và nâng cao chất lượng điện áp của lưới điện.

Từ khóa: *Lưới điện phân phối, nguồn điện phân tán, chất lượng điện áp, chất lượng điện năng, phương pháp tối ưu.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay với sự phát triển của nguồn năng lượng tái tạo, yếu tố về môi trường, sự phát triển của các công nghệ mới, chất lượng điện năng, độ tin cậy hệ thống điện... sự ra đời các nguồn điện phân tán (DG) là thiết thực cho nhu cầu năng lượng đối với một xã hội phát triển, hiện đại nhằm bổ sung và đáp ứng nhanh chóng nhu cầu sử dụng điện cho các khách hàng.¹ Tuy nhiên, việc đầu nối tích hợp các DG vào lưới điện phân phối (LĐPP) lại nổi lên một số vấn đề cần quan tâm đó là: Trạng thái ổn định và sự kiểm soát dòng điện ngắn mạch trên lưới; chất lượng điện năng, điều khiển điện áp; tính ổn định và khả năng của DG dưới tác động của các nhiễu loạn; vấn đề bảo vệ rơle và chế độ vận hành khi lưới bị cô lập. Các vấn đề này có thể gây ra các hạn chế nhất định đến việc sử dụng nhiều DG tích

hợp vào LĐPP.² Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu lựa chọn vị trí và công suất tối ưu của các DG nhằm giảm tổn thất công suất tác dụng (CSTD) đến mức nhỏ nhất đồng thời cải thiện chất lượng điện áp (CLĐA) trên LĐPP.

Có nhiều phương pháp được sử dụng để tối ưu vị trí và công suất DG trên LĐPP đã được đề xuất trong nhiều công trình đã công bố. Tối ưu vị trí và công suất DG bằng cách sử dụng giải thuật di truyền để cực tiểu tổn thất CSTD trên lưới điện.³⁻⁵ Xác định vị trí tối ưu của DG và bù bằng phương pháp tối ưu bầy đàn để cực tiểu hóa tổn thất CSTD có xét đến chỉ số ổn định điện áp.⁶ Phương pháp tối ưu dựa trên công thức tính chính xác tổn thất CSTD được trình bày trong^{7,8} để tối ưu vị trí và công suất của DG, tuy nhiên trong các công trình đó, các điều kiện ràng buộc về điện áp không được khảo sát. Việc so sánh các

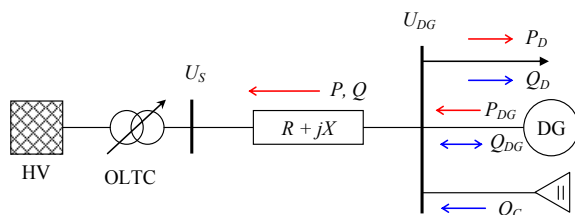
*Tác giả liên hệ chính.

Email: ngominhkhoa@qnu.edu.vn

ưu điểm và nhược điểm của các phương pháp tối ưu vị trí và công suất của các DG dựa trên phương pháp độ nhạy được phân tích khá rõ ràng trong tài liệu.⁹ Trong đó, các tác giả đã đề xuất phương pháp để xác định công suất tối ưu của DG với hệ số công suất tối ưu, nhưng cũng chỉ khảo sát cho DG loại III.¹⁰ DG có thể được phân loại như sau.² Loại I: DG chỉ có khả năng phát ra CSTD, chẳng hạn như pin quang điện, pin nhiên liệu,... Loại II: DG chỉ có khả năng phát ra công suất phản kháng (CSPK) để cải thiện CLĐA trên lưới, chẳng hạn như: tụ bù CSPK, máy bù đồng bộ. Loại III: DG có khả năng phát ra cả CSTD và CSPK, ví dụ như máy phát đồng bộ. Loại IV: DG có khả năng phát ra CSTD nhưng lại tiêu thụ CSPK, ví dụ như máy phát tuabin gió sử dụng máy phát điện không đồng bộ. Trong bài báo này, các loại DG nêu trên được khảo sát để tối ưu vị trí và công suất phát ra nhằm cực tiểu hóa tổng tổn thất CSTD trên lưới điện mà vẫn thỏa mãn các ràng buộc về cân bằng công suất, giới hạn về điện áp và giới hạn về dòng điện cho phép trên các nhánh của lưới điện. Phương pháp đề xuất trong bài báo này sẽ được các tác giả đánh giá và kiểm chứng trên lưới điện IEEE 33 nút.

2. TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT DG

Thông thường, điện áp trên LĐPP truyền thống được vận hành ổn định, tuy nhiên khi có DG đầu nối vào lưới thì trào lưu công suất và điện áp sẽ bị ảnh hưởng. Để có thể phát được CSTD lên lưới thì máy phát phải vận hành với giá trị điện áp cao hơn so với điện áp các nút lân cận khác.^{11,12} Điều này có thể được giải thích bằng cách sử dụng mô hình LĐPP hai nút có DG được đầu nối ở phía cuối nguồn. Bởi vì hướng trào lưu công suất bị đảo ngược, do đó điện áp tại điểm đầu nối DG sẽ tăng cao hơn so với điện áp nút nguồn.¹¹



Hình 1. Ảnh hưởng của DG đến LĐPP.

Trong Hình 1, DG được đầu nối vào nút ở phía cuối nguồn nơi có điện áp là (U_{DG}); P_{DG} và Q_{DG} là CSTD và CSPK được phát ra bởi DG; P_D và Q_D là CSTD và CSPK của tải và Q_C là CSPK phát ra của thiết bị bù. DG, tải và thiết bị bù được nối với hệ thống điện truyền tải cao áp thông qua đường dây có tổng trở là $R + jX$ và máy biến áp điều áp dưới tải OLTC. Độ tăng điện áp dọc theo đường dây được xác định như sau:

$$\Delta U = U_{DG} - U_s \approx \frac{RP + XQ}{U_{DG}} \quad (1)$$

trong đó: $P = P_{DG} - P_D$ và $Q = Q_C - Q_D \pm Q_{DG}$ là CSTD và CSPK truyền tải trên đường dây; U_s là điện áp ở đầu nguồn (phía hạ áp của máy biến áp điều áp dưới tải OLTC). Nếu U_{DG} được biểu diễn dưới dạng đơn vị tương đối, thì phương trình (1) được viết lại là:

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{DG} - U_s \\ &\approx R(P_{DG} - P_D) + X(Q_C - Q_D \pm Q_{DG}) \end{aligned} \quad (2)$$

Nguồn điện phân tán DG phát ra CSTD ($+P_{DG}$) và có thể phát hoặc tiêu thụ CSPK ($\pm Q_{DG}$), trong khi đó tải tiêu thụ cả CSTD ($-P_D$) và CSPK ($-Q_D$) và các thiết bị bù trên LĐPP phát ra một lượng CSPK ($+Q_C$). Gần đây, các máy phát điện đồng bộ cỡ nhỏ, máy phát điện tuabin gió cỡ nhỏ và hệ thống pin mặt trời được ứng dụng rộng rãi như là các DG trên LĐPP. Đối với các máy phát điện đồng bộ phát ra CSTD và có thể phát hoặc tiêu thụ CSPK phụ thuộc vào giá trị đặt của hệ thống kích từ của máy phát. Đối với máy phát tuabin gió cũng phát ra CSTD nhưng có thể phát hoặc tiêu thụ CSPK là phụ thuộc vào tốc độ gió^{11,12}. Hệ thống pin mặt trời được sử dụng để phát ra CSTD tại một hệ số công suất nhất định nhưng có thể sinh ra dòng điện hài bơm vào lưới tùy thuộc vào chất lượng của bộ inverter.³ Do đó, hướng trào lưu công suất trên lưới điện phụ thuộc vào giá trị CSTD và CSPK của các phụ tải so với CSTD và CSPK do các DG phát ra và tổng tổn thất công suất trên lưới điện. Như vậy ta thấy các DG có ảnh hưởng đáng kể đến trào lưu công suất và CLĐA trên LĐPP, do đó một cách tổng quát để có thể lựa chọn vị trí và công suất

của các DG nhằm nâng cao CLĐA trên LĐPP, các tác giả trong bài báo này tiến hành khảo sát một mô hình LĐPP tổng quát có N nút. Khi đó, hàm mục tiêu được lựa chọn trong bài báo này là hàm tổng tổn thất CSTD trên lưới điện như sau:

$$\text{Minimize } P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \right] \quad (3)$$

$$\text{trong đó: } \alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (5)$$

$$Z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij} \quad (6)$$

Với: Z_{ij} là phần tử (i,j) trong ma trận tổng trở nút Z_{bus} ; r_{ij} , x_{ij} là điện trở và điện kháng của phần tử Z_{ij} ; U_i , δ_i là biên độ và góc pha của điện áp tại nút i ; U_j , δ_j là biên độ và góc pha của điện áp tại nút j ; P_i , Q_i là CSTD và CSPK bơm vào tại nút i ; P_j , Q_j là CSTD và CSPK bơm vào tại nút j .

Trong bài toán cực tiểu hàm mục tiêu (3) cần phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc sau đây:

i) *Ràng buộc về cân bằng công suất:*

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^N U_i U_j \left[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (7)$$

$$\forall i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^N U_i U_j \left[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (8)$$

$$\forall i = 1, 2, 3, \dots, N$$

trong đó: P_{Gi} , Q_{Gi} là CSTD và CSPK phát tại nút i ; P_{Di} , Q_{Di} là CSTD và CSPK tải tại nút i ; G_{ij} và B_{ij} là điện dẫn tác dụng và CSPK của nhánh giữa nút i và j .

ii) *Ràng buộc về điện áp tại các nút:*

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

trong đó: $U_{\min}$, $U_{\max}$ là điện áp cho phép nhỏ nhất và lớn nhất.

iii) *Ràng buộc về dòng điện trên các nhánh:*

$$I_i \leq I_{i\max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (10)$$

trong đó: $I_{i\max}$ là dòng điện lớn nhất cho phép chạy trên nhánh thứ i .

Khảo sát công thức tính chính xác tổng tổn thất CSTD trên lưới điện (3), tổng tổn thất CSTD nhỏ nhất nếu vi phân riêng phần của (3) theo giá trị công suất bơm vào nút bằng zero. Do đó, vi phân riêng phần của (3) theo CSTD bơm vào nút được xác định như sau:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = 2\alpha_{ii}P_i + 2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\alpha_{ij}P_j - \beta_{ij}Q_j) = 0 \quad (11)$$

$$P_i = -\frac{1}{\alpha_{ii}} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\alpha_{ij}P_j - \beta_{ij}Q_j) \right] = 0 \quad (12)$$

trong đó: P_i là CSTD bơm vào nút i , được xác định bởi:

$$P_i = P_{DG_i} - P_{Di} \quad (13)$$

Thay (13) vào (12), ta được:

$$P_{DG_i} = P_{Di} - \frac{1}{\alpha_{ii}} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\alpha_{ij}P_j - \beta_{ij}Q_j) \right] \quad (14)$$

Tương tự đối với CSPK, ta có:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = 2\alpha_{ii}Q_i + 2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\alpha_{ij}Q_j + \beta_{ij}P_j) = 0 \quad (15)$$

trong đó: Q_i là CSPK bơm vào nút và được xác định:

$$Q_i = Q_{DG_i} - Q_{Di} \quad (16)$$

Do đó:

$$Q_{DG_i} = Q_{Di} - \frac{1}{\alpha_{ii}} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\alpha_{ij}Q_j + \beta_{ij}P_j) \right] \quad (17)$$

Như vậy, phương trình (14) cho phép xác định CSTD phát tối ưu của DG loại I và (17) cho phép xác định CSPK phát tối ưu của DG loại II tại mỗi nút. Nếu DG loại I được đầu nối tại nút i làm cho tổng tổn thất CSTD trên lưới nhỏ nhất so với DG cùng loại được đầu nối tại bất kỳ một nút nào khác trên lưới, thì nút i là vị trí tối ưu để đặt DG loại I. Tương tự, nếu DG loại II được đầu nối tại nút j làm cho tổng tổn thất CSTD trên lưới nhỏ

nhất so với DG cùng loại được đầu nối tại bất kỳ một nút nào khác trên lưới, thì nút j là vị trí tối ưu để đặt DG loại II. Trong trường hợp vị trí tối ưu đặt DG loại I và vị trí tối ưu đặt DG loại II cùng chung tại một nút i , thì (14) và (17) được sử dụng để xác định công suất và hệ số công suất tối ưu của DG loại III được đầu nối tại nút i . Bất kỳ công suất của DG loại III khác với P_{DG_i} và Q_{DG_i} tại nút i , sẽ có tổn thất công suất lớn hơn. Khi đó, hệ số công suất tối ưu (OPF) của DG loại III được xác định theo (18):

$$OPF = \frac{P_{DG_i}}{\sqrt{P_{DG_i}^2 + Q_{DG_i}^2}} \quad (18)$$

Nếu vị trí tối ưu của DG loại I và II khác nhau lần lượt tại i và j tương ứng, thì có thể xem DG loại III được đầu nối tại nút i với giá trị CSTD và CSPK phát của nó được tính toán theo (14) và (17) tương ứng. Trong trường hợp này, hệ số công suất của DG loại III cũng được xác định theo (18).

Vị trí đầu nối DG mà làm cho tổn thất CSTD trên lưới nhỏ nhất được xem là vị trí tối ưu nếu thỏa mãn các ràng buộc như đã trình bày ở trên. Thủ tục tính toán xác định vị trí và công suất tối ưu các loại DG được mô tả như sau:

Bước 1: Chạy trào lưu công suất ở chế độ cơ bản (không có DG).

Bước 2: Tính toán tổn thất công suất ở chế độ cơ bản bằng cách sử dụng (3).

Bước 3: Sử dụng (14) và (17) xác định công suất của các loại DG khác nhau tại mỗi nút ngoại trừ nút cân bằng để cực tiểu tổn thất CSTD trên lưới.

Bước 4: Kiểm tra các điều kiện ràng buộc (7)-(10) sau khi đầu nối DG được xác định ở Bước 3 tại mỗi nút.

Bước 5: Lựa chọn vị trí đầu nối DG có tổn thất CSTD nhỏ nhất mà vẫn thỏa mãn các ràng buộc.

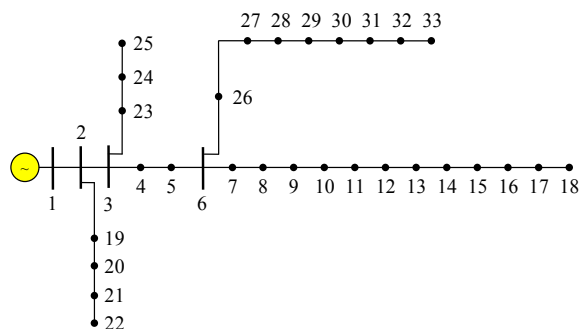
Bước 6: Sử dụng (18) xác định hệ số công suất tối ưu nếu sử dụng DG loại III.

Bước 7: Chạy trào lưu công suất sau khi đầu nối DG tại vị trí và công suất tối ưu.

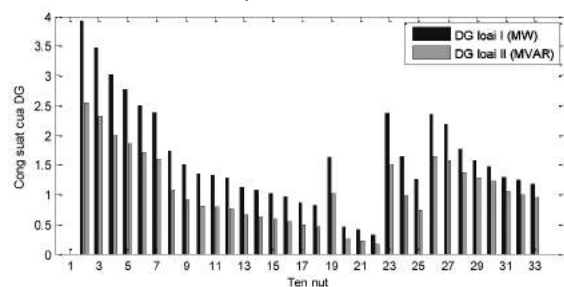
Bước 8: Tính toán độ giảm tổn thất CSTD sau khi đầu nối DG vào lưới.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Phương pháp được đề xuất để tối ưu vị trí và công suất của DG trong bài báo này được các tác giả lập trình bằng ngôn ngữ Matlab và được kiểm chứng, đánh giá cho một lưới điện mẫu. Trong mục này, bài báo trình bày kết quả mô phỏng trên lưới điện mẫu IEEE 33 nút có sơ đồ nối điện như Hình 2 đồng thời bộ dữ liệu nút và dữ liệu nhánh của nó được cho trong Phụ lục 1 và 2. Thực hiện các bước tính toán của giải thuật đề xuất đã trình bày ở Mục 2 để xác định công suất tối ưu của DG loại I theo (14) và DG loại II theo (17) tại các nút trên lưới, kết quả này được thể hiện trong biểu đồ Hình 3. Qua kết quả như trên Hình 3 cho ta thấy tại các nút từ nút 2 đến nút 33 có các giá trị công suất tối ưu của DG loại I và DG loại II thay đổi theo vị trí các nút trên lưới điện. Từ kết quả này, công suất của DG loại III bao gồm công suất tác dụng P_{DG_i} và công suất phản kháng Q_{DG_i} cũng được xác định theo (14) và (17) như trong Mục 2.



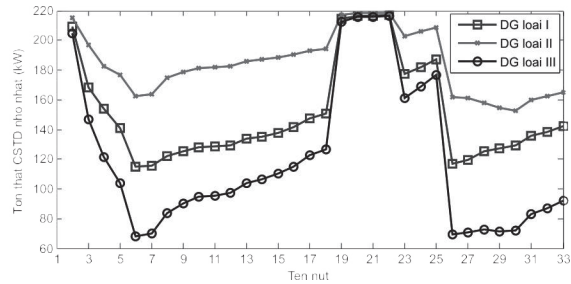
Hình 2. Sơ đồ lưới điện IEEE 33 nút.



Hình 3. Công suất tối ưu của DG loại I và II tại các nút trên lưới điện mẫu IEEE 33 nút.

Sau khi đầu nối lần lượt DG loại I, II và III tại các nút trên lưới ta thấy tổng tổn thất CSTD nhỏ nhất ứng với DG loại I đầu nối tại nút 6,

DG loại II tại nút 30 và DG loại III tại nút 6 như trong Hình 4. Ta thấy vị trí tối ưu của DG loại I và II để tổn thất công suất nhỏ nhất là không trùng nhau, do đó ta khảo sát 4 phương án: đầu nối DG loại I tại nút 6, đầu nối DG loại II tại nút 30, đầu nối DG loại III tại nút 6 và đầu nối đồng thời DG loại I tại nút 6 còn DG loại II tại nút 30. Kết quả tổng tổn thất CSTD trên lưới của 4 phương án này được thể hiện ở Bảng 1. Từ kết quả Bảng 1 cho thấy rằng khi đầu nối đồng thời DG loại I và II tại các vị trí khác nhau (DG loại I tại nút 6 và DG loại II tại nút 30) thì tổng tổn thất CSTD giảm từ 67,85 kW (đối với DG loại III tại nút 6) xuống còn 58,89 kW.



Hình 4. Tổng tổn thất CSTD khi đầu nối DG loại I, II hoặc III tại các nút.

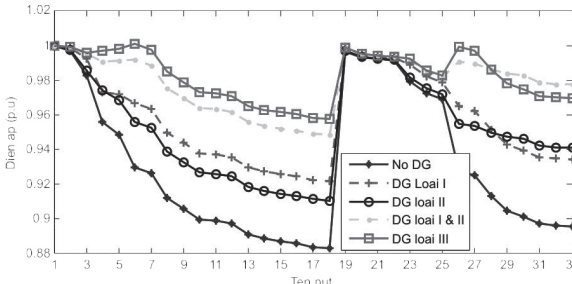
Bảng 1. Kết quả tối ưu vị trí và công suất của DG và tổn thất CSTD trên lưới.

Vị trí DG	Loại DG	Công suất DG tối ưu			Tổn thất CSTD (kW)		Độ giảm tổn thất CSTD (%)
		(MW)	(MVar)	(MVA; cosφ)	Không DG	Có DG	
Nút 6	I	2,49	-	-	219,14	114,91	47,57
Nút 30	II	-	1,71	-		152,98	30,19
Nút 6	III	-	-	3,02; 0,82		67,85	69,04
Nút 6 và 30	I & II	2,49	1,71	-		58,89	73,13

Bảng 2. CLĐA sau khi đầu nối DG.

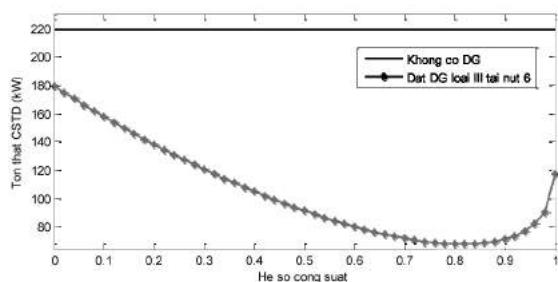
Loại và vị trí của DG	Điện áp (pu) @ nút trước khi có DG		Điện áp (pu) @ nút sau khi có DG	
	Min	Max	Min	Max
Loại I (nút 6)	0,88@18	1,00@1	0,92@18	1,00@1
Loại II (nút 30)			0,91@18	1,00@1
Loại I (nút 6) và loại II (nút 30)			0,94@18	1,00@1
Loại III (nút 6)			0,96@18	1,00@6

CLĐA trên lưới điện được cải thiện đáng kể sau khi đã đầu nối DG với vị trí và công suất tối ưu như Hình 5. Ở chế độ cơ bản (chưa có DG) điện áp nhỏ nhất là 0,88 p.u (nút 18) và điện áp lớn nhất là 1 p.u tại nút 1. Sau khi đầu nối DG loại III (3,02 MVA; cosφ = 0,82) tại nút 6 thì điện áp nhỏ nhất là 0,96 p.u tại nút 18 và điện áp lớn nhất là 1,00 p.u tại nút 6. Kết quả các trường hợp còn lại được thể hiện trong Bảng 2. Rõ ràng chỉ có trường hợp đầu nối DG loại III tại nút 6 là có điện áp trên lưới vẫn đảm bảo điều kiện ràng buộc về điện áp. Vậy phương án này là phương án được lựa chọn để tối ưu vị trí và công suất DG trên lưới điện mẫu IEEE 33 nút.



Hình 5. CLĐA trên lưới khi đầu nối các loại DG với vị trí và công suất tối ưu.

Ngoài ra, bài báo cũng đã khảo sát sự ảnh hưởng hệ số công suất của DG đến tổn thất CSTD trên LĐPP. Giả thiết đầu nối DG loại III với công suất không đổi là 3,02 MVA và tiến hành thay đổi hệ số công suất của nó, ta thấy tổn thất CSTD trên lưới sẽ thay đổi như Hình 6. Qua đó ta thấy tổng tổn thất CSTD đạt cực tiểu ứng với hệ số công suất tối ưu được xác định bởi (18).



Hình 6. Ảnh hưởng của hệ số công suất của DG loại III tại nút 6 đến tổn thất CSTD.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp tối ưu vị trí và công suất của các loại DG nhằm cực tiểu hóa tổng tổn thất CSTD đồng thời nâng cao được CLĐA trên LĐPP. Phương pháp đề xuất trong bài báo xác định giá trị tối ưu của vị trí và công suất của các loại DG bằng phương pháp giải tích bởi công thức từ mô hình bài toán tối ưu có ràng buộc. Phương pháp này được đánh giá và kiểm chứng trên lưới điện IEEE 33 nút, kết quả mô phỏng cho thấy đầu nối DG loại III tại nút 6 đã làm giảm tổn thất CSTD trên lưới so với trường hợp không có DG đồng thời đã nâng cao CLĐA của lưới điện. Ngoài ra, bài báo cũng đã khảo sát sự ảnh hưởng hệ số công suất của DG đến tổn thất CSTD trên lưới điện. Qua đó ta thấy tổn thất tại một hệ số công suất của DG làm cho tổn thất CSTD trên lưới nhỏ nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santosa, H.W. Beaty. *Electric Power Systems Quality*, New York: McGraw-Hill, 2002.
2. T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder. Distributed generation: A definition, *Electric Power Systems Research*, **2001**, 57(3), 195-204.
3. S. Biswas¹, S. K. Goswami. Genetic Algorithm based Optimal Placement of Distributed Generation Reducing Loss and Improving Voltage Sag Performance, *ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering*, **2011**, 2(1).
4. T. N. Shukla, S. P. Singh, K. B. Naik. *Allocation of distributed generation using GA for minimum system losses*, Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), Bombay, 2008.
5. S. M. Sajjadi, M. R. Haghifam, J. Salehi. Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **2013**, 46, 366-375.
6. Karar Mahmoud, Naoto Yorino, Abdella Ahmed. Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, **2018**, 31(2), 960-969.
7. D. Q. Hung, N. Mithulananthan, R. C. Bansal. Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **2010**, 25(3), 814-820.
8. V. V. S. N. Murthy, Ashwani Kumar. Comparison of optimal DG allocation methods in radial distribution systems based on sensitivity approaches, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **2013**, 53, 450-467.
9. C. L. Masters. Voltage rise: The big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines, *Power Engineering Journal*, **2002**, 16(1), 5-12.
10. C. T. Su, C. F. Chang, J. P. Chiou. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm, *Electric Power Systems Research*, **2005**, 75(2), 190-199.
11. M. E. Baran, I. M. El-Markabi. A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders, *IEEE Transactions on Power Systems*, **2007**, 22(1), 52-59.
12. C. M. Hird, H. Leite, N. Jenkins, H. Li. Network voltage controller for distributed generation, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, **2004**, 151(2), 150-156.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1. Dữ liệu nút của lưới điện IEEE 33 nút.

Nút	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20

Nút	P (kW)	Q (kVAr)
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

Phụ lục 2. Dữ liệu nhánh của lưới điện IEEE 33 nút.

Nút đi	Nút đến	R (p.u)	X (p.u)
1	2	0,005753	0,002976
2	3	0,03076	0,015667
3	4	0,022836	0,1163
4	5	0,023778	0,01211
5	6	0,051099	0,044112
6	7	0,01168	0,038608
7	8	0,106779	0,077061
8	9	0,064264	0,04617
9	10	0,064888	0,04617
10	11	0,012266	0,004056
11	12	0,02336	0,007724
12	13	0,091592	0,072063
13	14	0,033792	0,04448
14	15	0,036874	0,032818
15	16	0,046564	0,034004
16	17	0,080424	0,107378
17	18	0,045671	0,035813
2	19	0,010232	0,009764
19	20	0,093851	0,084567
20	21	0,02555	0,029849
21	22	0,04423	0,058481
3	23	0,028152	0,019236
23	24	0,056028	0,044243
24	25	0,055904	0,043743
6	26	0,012666	0,006451
26	27	0,017732	0,009028
27	28	0,066074	0,058256
28	29	0,050164	0,043712
29	30	0,031664	0,016128
30	31	0,060795	0,060084
31	32	0,019373	0,02258
32	33	0,021276	0,033081