

PHÂN BỐ TỐI ƯU KHOÁ MỀM (SOPs) VÀ NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO ĐỂ CỰC TIỂU TỔN THẤT CÔNG SUẤT VÀ CHI PHÍ MUA ĐIỆN TRONG LƯỚI PHÂN PHỐI IEEE 33 NÚT

Trần Văn Hải^{1,2}, Trương Việt Anh³, Trần Trọng Hiếu², Phạm Thị Xuân Hoa^{2*}

¹Nghiên cứu sinh, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

³Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: hoaptx@huit.edu.vn

Ngày nhận bài: 31/10/2024; Ngày nhận bài sửa: 15/11/2024; Ngày chấp nhận đăng: 29/11/2024

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phân bố tối ưu khoá mềm (Soft Open Points - SOPs) và máy phát phân tán (Distributed Generator - DG) trong lưới điện phân phối (Distribution Power Grid - DPG) IEEE 33 nút để giảm tổn thất công suất trong một giờ và chi phí mua điện từ lưới trong một ngày. Phương pháp Equilibrium Optimizer (EO) được áp dụng để tối ưu vị trí và công suất của các DG và SOPs trong DPG. Nghiên cứu đạt được tổn thất công suất nhỏ nhất so với các nghiên cứu trước trong trường hợp 1 đặt 3 DG, và trường hợp 2 đặt đồng thời 3 DG và 1 SOP trong DPG. Ngoài việc giảm tổn thất công suất, điện áp tại các nút trong DPG cũng được nâng cao trên 0.95 pu và gần bằng 1 pu. Trường hợp 3 sử dụng giải pháp tối ưu đạt được ở trường hợp 2 để vận hành tối ưu SOPs trong một ngày nhằm cực tiểu chi phí mua điện, với tải, các DG và giá điện thay đổi theo 24 giờ. Kết quả trường hợp 3 cho thấy rằng tích hợp máy phát điện gió (Wind Turbine - WT), 2 máy phát điện mặt trời (Solar photovoltaic - PV) và 1 SOPs trong quá trình vận hành cho chi phí mua điện từ lưới thấp nhất, nhỏ hơn hệ thống chỉ có 1WT và 2 PV, và thấp hơn nhiều hệ thống cơ bản khi không có DG và SOPs tham gia. Vì vậy, sử dụng SOPs trong DPG có tích hợp các DG có thể mang lại các lợi ích lớn về giảm tổn thất công suất và cực tiểu chi phí mua điện từ lưới.

Từ khoá: Khoá mềm (SOPs), máy phát phân tán (DG), lưới điện phân phối (DPG), máy phát điện gió (WT), máy phát điện mặt trời (PV).

1. GIỚI THIỆU

Lưới điện phân phối (DPG) cung cấp điện cho các phụ tải điện và đóng vai trò quan trọng trong hệ thống điện. Tổng tổn thất công suất trên DPG có thể bằng 13% tổng công suất điện phát ra [1]. Vì vậy, giảm tổn thất công suất trên DPG luôn được các nhà nghiên cứu quan tâm. Để giảm tổn thất công suất, giải pháp là giảm dòng điện và điện trở đường dây [2] bằng cách lắp đặt tụ bù [3], máy phát phân tán (DG) [4], máy phát điện gió [5], máy phát điện mặt trời [6], máy phát phân tán năng lượng sinh khối [7], tái cấu trúc lưới điện [8], lắp đặt khoá mềm (SOPs) [9] v.v. Bài báo này phân bố tối ưu các DG và SOPs để đạt được các lợi ích kinh tế và kỹ thuật cho DPG.

Về cơ bản, lắp đặt các DG có thể cung cấp công suất tác dụng và công suất phản kháng để giảm bơm công suất từ các nguồn điện lưới thông thường, trong khi đó SOPs có thể thay đổi các dòng công suất trên đường dây [10]. Cả các DG và SOPs có thể giảm các dòng điện trên các đường dây. Nghiên cứu [11] đã gia tăng mức độ thâm nhập của các DG từ 0% đến 200%, các kết quả tốt nhất nhờ lắp đặt SOPs là giảm tổn thất 58,4%, cân bằng tải 68,3%, và cải thiện cấu hình điện áp 62,1% khi so sánh với trường hợp không có SOPs. Nghiên cứu [12] kết hợp SOPs, các mức độ thâm nhập khác nhau của DG và các hệ thống truyền tải xoay chiều linh hoạt. Kết quả cho thấy các mức thâm nhập 48% và 79% là tối ưu nhất cho các hệ thống với mức tải 50% và 200%. Nghiên cứu [13] tối ưu mức thâm nhập của DG và các dòng công suất tác dụng và phản kháng của SOPs trong một ngày, và nó có thể giảm tổn thất năng lượng 10%. Nghiên cứu [14] tập trung vào cực tiểu tổn thất công suất và cực tiểu chi số cân bằng

tải cho hệ thống DPG IEEE 33 nút. Kết quả cho thấy rằng phân bố SOPs hiệu quả hơn thực hiện tái cấu trúc lưới điện, tuy nhiên, kết hợp phân bố SOPs và tái cấu trúc lưới là hiệu quả nhất. Nghiên cứu [15] tối ưu vị trí và công suất của 3 DG và 5 SOPs trên lưới điện IEEE 33 nút để giảm tổn thất công suất và cải thiện cấu hình điện áp. Phương pháp tối ưu PSO được sử dụng trong nghiên cứu này. Kết quả cho thấy rằng khi sử dụng 3 DG và 5 SOPs giảm tổn thất công suất 79,5% so với hệ thống không có các DG và SOPs. Nghiên cứu [16] sử dụng SOPs và tái cấu trúc cho lưới điện IEEE 33 và 69 nút. Nghiên cứu này thử nghiệm 5 trường hợp với số lượng SOPs tăng từ 1 đến 5. Tổn thất công suất giảm đáng kể khi số lượng SOPs tăng. Giảm tổn thất từ 30,94% tới 58,65% đối với lưới điện 33 nút và từ 56,16% đến 75,05% cho lưới điện 69 nút. Tuy nhiên, chi phí đầu tư và bảo trì của mỗi SOPs là rất cao, vì vậy sử dụng nhiều SOPs như ở nghiên cứu [15, 16] là không khả thi đối với DPG.

Nhìn chung, các nghiên cứu trước đã có các đóng góp đáng kể để giảm tổn thất, xem xét các mức thâm nhập của năng lượng tái tạo và cải thiện điện áp cho các DPG IEEE tiêu chuẩn. Tuy nhiên, việc sử dụng nhiều SOPs trong DPG là chưa hợp lý, hiệu quả các thuật toán sử dụng chưa cao, các nghiên cứu này đã bỏ qua sự phối hợp của SOPs với dữ liệu thực của năng lượng gió và mặt trời. Những hạn chế này sẽ được khắc phục trong bài báo này. Thuật toán metaheuristic EO [17] được áp dụng để tối ưu vị trí và công suất các DG và SOPs trong DPG IEEE 33 nút. Dữ liệu tốc độ gió và bức xạ mặt trời thực tế được lấy từ website [18, 19] để tính toán công suất máy phát điện gió và máy phát điện mặt trời trong 24 giờ vận hành DPG.

2. THÀNH LẬP BÀI TOÁN

Trong nghiên cứu này, WT và PV được sử dụng để giảm công suất nguồn được cung cấp từ nút cân bằng và giảm dòng điện trên các đường dây phân phối. Ngoài ra, một thiết bị SOPs cũng được sử dụng để truyền tải công suất tác dụng giữa 2 nút và cung cấp công suất phản kháng ở mỗi nút. Nhờ vận hành các WT, PV và SOPs, dòng điện, sụt áp, tổn thất năng lượng trên các đường dây và chi phí mua điện từ lưới có thể được giảm. Vì vậy, nghiên cứu này tập trung vào giảm tổn thất công suất trong một giờ và cực tiểu chi phí mua điện từ lưới trong một ngày và đáp ứng các ràng buộc vận hành của hệ thống.

2.1. Hàm mục tiêu

Giảm tổn thất công suất trong một giờ và cực tiểu chi phí mua điện từ lưới trong một ngày vận hành là mục tiêu chính, được trình bày như sau:

$$\text{Giảm: PL} = \sum_{dl=1}^{N_{dl}} 3 \cdot I_{dl}^2 \cdot R_{dl} \text{ (kW)} \quad (1)$$

Trong đó: PL là tổng tổn thất công suất trên các nhánh trong một giờ, N_{dl} là số đường dây phân phối, I_{dl} là dòng điện vận hành của đường dây phân phối thứ dl , R_{dl} là điện trở của đường dây phân phối thứ dl .

$$\text{Cực tiểu: CoG} = \sum_{hr=1}^{24} (P_{L,hr} + PL_{hr} - (P_{PVs,hr} + P_{WTs,hr})). \text{Giadien}_{hr} \quad (2)$$

Trong đó: CoG là tổng chi phí mua điện từ lưới trong một ngày, $P_{L,hr}$ là tổng công suất tải tại giờ thứ hr , PL_{hr} là tổng tổn thất công suất tác dụng tại giờ thứ hr , $P_{PVs,hr}$ là tổng công suất của PV ở giờ thứ hr , $P_{WTs,hr}$ là tổng công suất của WT ở giờ thứ hr , Giadien_{hr} là giá điện ở giờ thứ hr .

2.2. Các ràng buộc

Giới hạn dòng điện đường dây: Dòng điện vận hành phải nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn dòng điện cực đại:

$$I_{dl} \leq I_{dl}^{\max} \quad (3)$$

$I_{dl}^{\max}$, I_{dl} là dòng điện cực đại và dòng điện vận hành của đường dây phân phối thứ dl .

Các giới hạn điện áp: Trong lưới điện phân phối, điện áp ở mỗi nút lớn hơn hoặc bằng giới hạn điện áp cực tiểu, và nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn điện áp cực đại:

$$V^{\min} \leq V_i \leq V^{\max}; i = 1, \dots, N_n \quad (4)$$

$V^{\min}, V^{\max}$ là giới hạn điện áp nút cực tiểu và cực đại trong lưới điện phân phối, V_i là điện áp tại nút thứ i , N_n là số lượng nút trong lưới điện phân phối.

Các giới hạn cân bằng công suất: Nghiên cứu này xem xét lắp đặt WT, PV và SOPs trong lưới điện phân phối. SOPs có thể cung cấp công suất phản kháng, trong khi đó, WT và PV có thể cung cấp công suất tác dụng. Vì vậy, cân bằng công suất tác dụng và công suất phản kháng được viết như sau:

$$\sum_{m=1}^{N_{PV}} P_{PVm} + \sum_{k=1}^{N_{WT}} P_{WTK} + P_{cps} = \sum_{dl=1}^{N_{dl}} 3 \cdot R_{dl} \cdot I_{dl}^2 + \sum_{j=1}^{N_n} P_{Lj} \quad (5)$$

$$\sum_{f=1}^{N_{SOP}} Q_{SOPf} + Q_{cps} = \sum_{dl=1}^{N_{dl}} 3 \cdot X_{dl} \cdot I_{dl}^2 + \sum_{j=1}^{N_n} Q_{Lj} \quad (6)$$

N_{PV}, N_{WT} là số lượng máy phát điện mặt trời và máy phát điện gió, P_{PVm} là công suất tác dụng của máy phát điện mặt trời thứ m , P_{WTK} là công suất tác dụng của máy phát điện gió thứ k , P_{cps} , Q_{cps} là công suất tác dụng và công suất phản kháng được cung cấp bởi nguồn điện lưới thông thường, P_{Lj} , Q_{Lj} là công suất tác dụng và phản kháng của tải tại nút thứ j , X_{dl} là điện kháng của đường dây phân phối thứ dl , Q_{SOPf} là công suất phản kháng của SOPs thứ f .

Các giới hạn công suất phát của PV, WT: Công suất phát của các thiết bị điện được ràng buộc bởi công suất cực đại và cực tiểu:

$$P_{PVm}^{\min} \leq P_{PVm} \leq P_{PVm}^{\max} \quad (7)$$

$$P_{WTK}^{\min} \leq P_{WTK} \leq P_{WTK}^{\max} \quad (8)$$

Trong đó: $P_{PVm}^{\min}$ và $P_{PVm}^{\max}$ là giới hạn công suất phát cực tiểu và cực đại của PV thứ m ; $P_{WTK}^{\min}$ và $P_{WTK}^{\max}$ là giới hạn công suất phát cực tiểu và cực đại của WT thứ k .

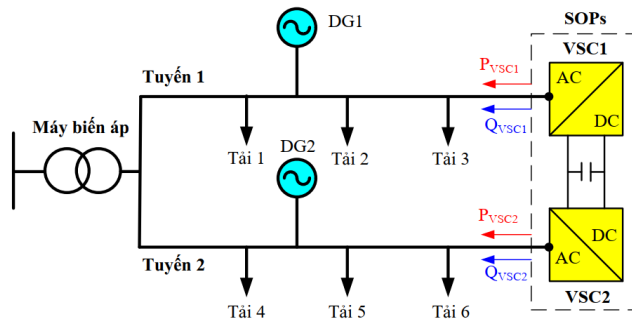
Các giới hạn vị trí của PV, WT: Nghiên cứu này chỉ xem xét phát công suất tác dụng cho PV và WT, ngoài ra PV và WT không thể được lắp đặt cùng vị trí. Về cơ bản, các thiết bị này có thể được lắp đặt trong lưới điện phân phối với vị trí từ nút 2 đến nút N_n . Vì vậy, các bất phương trình dưới đây là các ràng buộc vị trí:

$$2 \leq L_{PVm}, L_{WTK} \leq N_n \quad (9)$$

$$L_{PVm} \neq L_{WTK} \quad (10)$$

Trong đó: L_{PVm} và L_{WTK} là các vị trí của PV thứ m và WT thứ k .

2.3. Mô hình hoá và các điều kiện ràng buộc của SOPs



Hình 1. SOPs kết nối tuyến 1 và tuyến 2 trong DPG

Mô hình của SOPs: SOPs là một thiết bị điện tử công suất có thể điều khiển dòng công suất tác dụng và công suất phản kháng giữa 2 tuyến kết nối. Bài báo này xem xét SOPs là bộ biến đổi nguồn áp (back-to-back Voltage Source Converters - VSC), SOPs có thể thay thế các khoá mở trong các DPG, kết nối 2 tuyến như Hình 1.

Các ràng buộc của SOPs: Các biến liên quan của SOPs trong hình 1 bao gồm P_{VSC1} , P_{VSC2} , Q_{VSC1} và Q_{VSC2} . Trong nghiên cứu này, tổn thất công suất của SOPs được bỏ qua bởi vì tổn thất công suất của VSC rất thấp, khoảng 1% trên mỗi bộ biến đổi [20]. Mỗi liên hệ giữa các thông số của SOPs được biểu thị bằng toán học như sau [14, 21]:

$$P_{VSC1} + P_{VSC2} = 0 \quad (11)$$

$$S_{VSC1} = \sqrt{P_{VSC1}^2 + Q_{VSC1}^2} \quad (12)$$

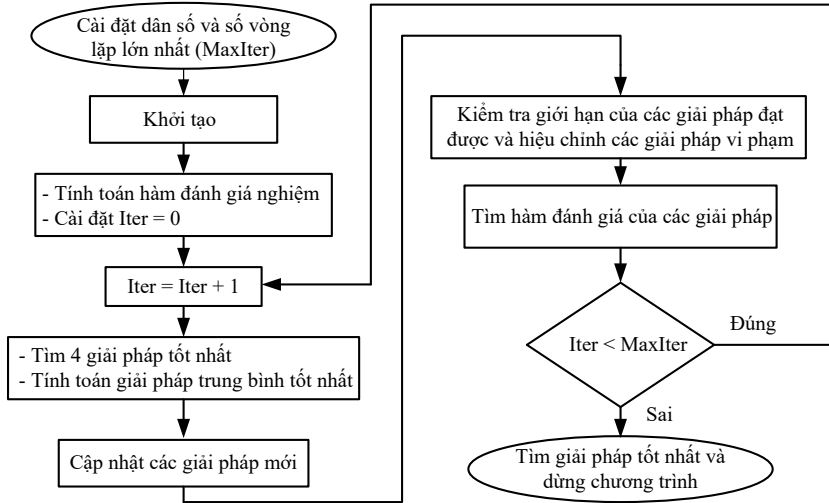
$$S_{VSC2} = \sqrt{P_{VSC2}^2 + Q_{VSC2}^2} \quad (13)$$

$$0 \leq S_{VSC1}, S_{VSC2} \leq S_{SOPs} \quad (14)$$

Trong đó: S_{VSC1} và S_{VSC2} là công suất biểu kiến vận hành của SOPs tại nút 1 và nút 2. S_{SOPs} là công suất biểu kiến định mức của SOPs.

3. THUẬT TOÁN METAHEURISTIC EO

Thuật toán Equilibrium Optimizer (EO) được thể hiện chi tiết trong tài liệu [17]. Trong quá trình tối ưu hoá, EO cũng sử dụng dân số riêng ở bước khởi tạo, và mỗi cá thể được xem là một giải pháp khả thi cho bài toán. Cấu trúc của EO bao gồm các bước chính như sau:



Hình 2. Lưu đồ tối ưu của thuật toán EO

- Bước 1: Khởi tạo

$$E_m = E_m^{min} + Rand \times (E_m^{max} - E_m^{min}) \text{ with } m = 1, \dots, N_p \quad (15)$$

N_p là dân số; E_m^{min} , E_m^{max} là giới hạn cực tiểu và cực đại của không gian tìm kiếm; Rand là số ngẫu nhiên, chọn từ 0 đến 1; E_m là giải pháp thứ m.

- Bước 2: Cập nhật giải pháp

$$E_m^{new} = E_{ref} + (E_m - E_{ref}) \times M + \frac{GP}{RP \times V} \times (1 - M) \quad (16)$$

$$E_{ref} \in [E_{r1}, E_{r2}, E_{r3}, E_{r4}, E_M] \quad (17)$$

$$E_M = \frac{E_{r1} + E_{r2} + E_{r3} + E_{r4}}{4} \quad (18)$$

E_m^{new} là giải pháp mới thứ m; E_{r1} , E_{r2} , E_{r3} và E_{r4} là 4 giải pháp có hàm đánh giá tốt nhất trong dân số hiện tại; RP là hệ số trả về trong thể tích V; E_{ref} là giải pháp tham chiếu; GP là hệ số khởi tạo; M là hàm mũ.

- Bước 3: Hiệu chỉnh các giải pháp mới

$$E_m^{new} = \begin{cases} E_m^{min} & \text{nếu } E_m^{new} < E_m^{min} \\ E_m^{max} & \text{nếu } E_m^{new} > E_m^{max} \\ E_m^{new}, & \text{khác} \end{cases} \quad (19)$$

- Bước 4: Lựa chọn hàm đánh giá và giải pháp tốt nhất

$$Ft_m = \begin{cases} Ft_m^{new} & \text{nếu } Ft_m \geq Ft_m^{new} \\ Ft_m, & \text{khác} \end{cases} \quad (20)$$

và

$$E_m = \begin{cases} E_m^{new} & \text{nếu } Ft_m \geq Ft_m^{new} \\ E_m, & \text{khác} \end{cases} \quad (21)$$

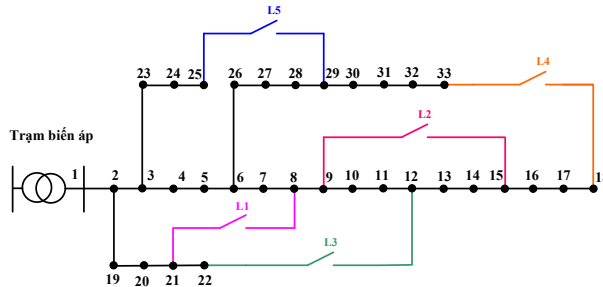
Ft_m và Ft_m^{new} là các giá trị hàm đánh giá hiện tại và mới của giải pháp thứ m.

- Toàn bộ quá trình tối ưu của thuật toán EO được trình bày ở Hình 2.

4. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần này, phương pháp EO được sử dụng để tối ưu vị trí và công suất của 3 DG ở trường hợp 1. Trường hợp 2 tối ưu đồng thời vị trí và công suất của 3 DG và 1 SOPs. Trường hợp 3 sử dụng giải pháp tối ưu ở trường hợp 2 để vận hành tối ưu SOPs với tải, 1 WT, PV1, PV2 và giá điện thay đổi theo 24 giờ. Sử dụng Matlab R2022a cài trên máy vi tính có RAM 8.0-GB và bộ xử lý 1.8-GHz để chạy mô phỏng. Dân số và số vòng lặp được cài đặt là 500 và 1000 cho trường hợp 1 và 2 [15]; 50 và 500 cho trường hợp 3.

Cấu hình DPG IEEE 33 nút hiệu chỉnh được trình bày ở hình 3. Dữ liệu hệ thống được cho ở [22]. SOPs có thể được lắp đặt ở 1 trong 5 vị trí là L1 (8-21), L2 (9-15), L3 (12-22), L4 (18-33) và L5 (25-29) [15]. Điện áp định mức của hệ thống là 12,66 kV. Công suất tác dụng của tải là 3,715 MW và công suất phản kháng của tải là 2,3 MVar. Tổn thất công suất tác dụng ban đầu của hệ thống cơ bản khi không có SOPs và DG là 210,9983 kW [22, 15]. Giới hạn điện áp cực tiểu và cực đại được cài đặt 0,95 pu và 1,05 pu. Giới hạn cực tiểu và cực đại công suất biểu kiến của SOPs là 0 MVA và 3 MVA; trong khi đó, các giới hạn của DG bằng 0-2 MW. Các kết quả của EO được so sánh với TM (Taguchi Method) [23], MOTA (Multi-Objective Taguchi Approach) [23], BA (Bat algorithm) [24], và HSA (Harmony Search Algorithm) [25].



Hình 3. Hệ thống IEEE 33 nút hiệu chỉnh với 5 vị trí có thể đặt SOPs

4.1. Trường hợp 1: Tối ưu vị trí và công suất của 3 DG

Bảng 1 so sánh vị trí và công suất của 3 DG, tổn thất công suất giữa các thuật toán khác nhau. EO cho tổn thất công suất nhỏ nhất bằng 72,7869 kW, tiếp theo là PSO [15] 72,85 kW, BA [24] 75,05 kW,

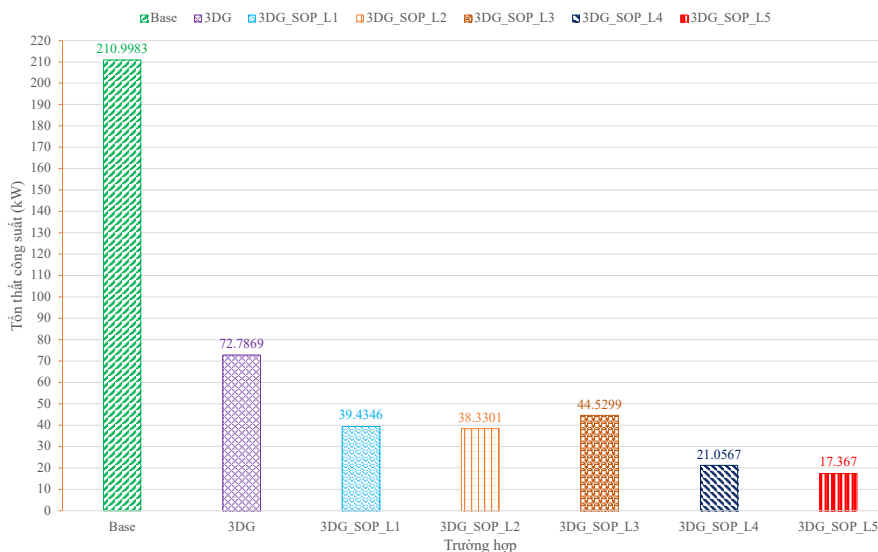
MOTA [23] 96,3 kW, HSA [25] 96,76 kW, và TM [23] có tổn thất công suất cao nhất bằng 102,3 kW. EO chọn đặt 3 DG ở các nút 24; 13; 30 với các công suất tương ứng là 1091,33 kW; 801,7 kW; 1053,64 kW. Các vị trí đặt 3 DG của EO trùng với các vị trí của phương pháp PSO [15] nhưng có tổng công suất 3 DG bằng 2946,67 kW, thấp hơn 93,33 kW so với tổng công suất của PSO [15]. Từ các kết quả trên cho thấy EO hiệu quả hơn các thuật toán trong [15, 23-25] khi lắp đặt 3 DG trong DPG.

Bảng 1. So sánh tổn thất công suất trên DPG IEEE 33 nút với 3 DG

Thuật toán	Tổng công suất DG (kW)	Nút kết nối	Tổn thất công suất (kW)
EO	2946,67 (1091,33; 801,7; 1053,64)	24; 13; 30	72,7869
PSO [15]	3040	13; 30; 24	72,85
TM [23]	2879,5	15; 33; 26	102,3
MOTA [23]	3280	7; 30; 14	96,3
BA [24]	2721	15; 30; 25	75,05
HSA [25]	1725,6	18; 33; 17	96,76

4.2. Trường hợp 2: Tối ưu đồng thời 3 DG và 1 SOPs

Hình 4 thể hiện tổn thất công suất trên DPG IEEE 33 nút hiệu chỉnh với các trường hợp khác nhau. Trường hợp cơ bản (Base) khi không có lắp đặt 3DG và SOPs trong hệ thống có tổn thất công suất lớn nhất 210,9983 kW, trường hợp khi tối ưu 3 DG (3DG) trong lưới phân phối đã giảm tổn thất còn 72,7869 kW. Tổn thất công suất tiếp tục giảm khi tối ưu đồng thời 3 DG và 1 SOPs ở các vị trí L3 (3DG_SOP_L3); L1 (3DG_SOP_L1); L2 (3DG_SOP_L2); L4 (3DG_SOP_L4); L5 (3DG_SOP_L5) với các tổn thất công suất tương ứng là 44,5299 kW; 39,4346 kW; 38,3301 kW; 21,0567 kW; 17,367 kW. Như vậy, L5 có tổn thất công suất nhỏ nhất bằng 17,367 kW, đây là vị trí tốt nhất để đặt SOPs kết hợp với 3 DG.



Hình 4. So sánh tổn thất công suất trên DPG IEEE 33 nút hiệu chỉnh

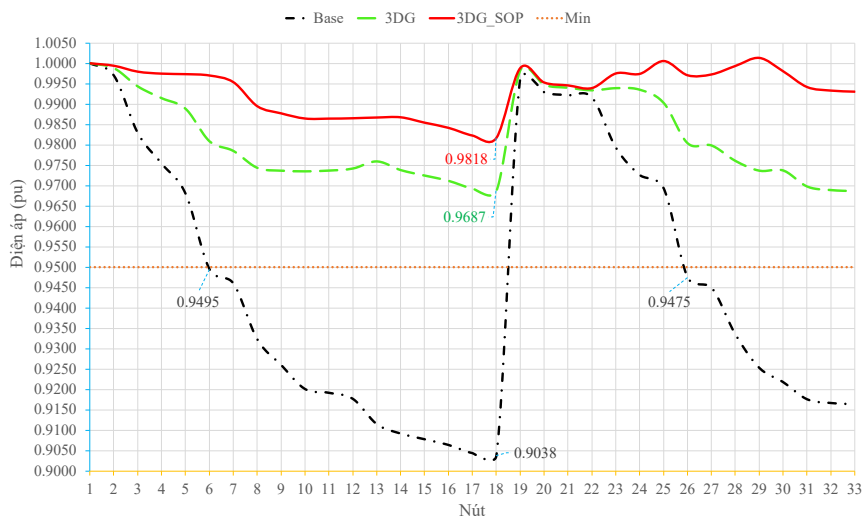
Bảng 2. Các kết quả đạt được trên DPG IEEE 33 nút với 3 DG và 1 SOPs

Vị trí	Vị trí-Công suất của DG (kW)	Công suất vận hành tối ưu của SOPs (MVA)	Tổn thất công suất (kW)-Giảm tổn thất (%)
L1	24-1074,8369; 14-729,0636; 30-1031,5062	$S_{VSC,8}=1,12; S_{VSC,21}=0,2;$	39,4346-81,31
L2	30-961,1304; 9-1009,6107; 24-1039,7542	$S_{VSC,9}=0,88; S_{VSC,15}=0,52;$	38,3301-81,83

L3	30-1006,2224; 12-1135,5115; 24-1052,2723	$S_{VSC,12}=0,83$; $S_{VSC,22}=0,28$;	44,5299-78,9
L4	32-1154,9333; 8-796,1244; 24-1035,7877	$S_{VSC,18}=0,5$; $S_{VSC,33}=0,95$;	21,0567-90,02
L5	7-762,0823; 14-632,7935; 29-1617,0022	$S_{VSC,25}=0,9$; $S_{VSC,29}=1,46$	17,3670-91,77
PSO [15]	8-KBC; 24-KBC; 32-KBC	-	43,167-79,5

KBC: Không báo cáo

Bảng 2 thể hiện chi tiết vị trí lắp đặt và công suất tối ưu của 3 DG kết hợp với 1 SOPs ở các vị trí L1 đến L5, và so sánh với phương pháp PSO [15] khi tối ưu đồng thời 3 DG và 5 SOPs. Kết quả cho thấy L5 là vị trí tốt nhất để đặt SOPs, vị trí tối ưu để đặt 3DG lần lượt là nút: 7; 14; 29 và công suất tối ưu tương ứng là 762,0823 kW; 632,7935 kW; 1617,0022 kW. Tối ưu 1 SOPs tại L5 (kết nối nút 25 và nút 29) đồng thời với 3DG giảm tổn thất công suất 91,77% so với hệ thống cơ bản và giảm 12,27% so với PSO [15].

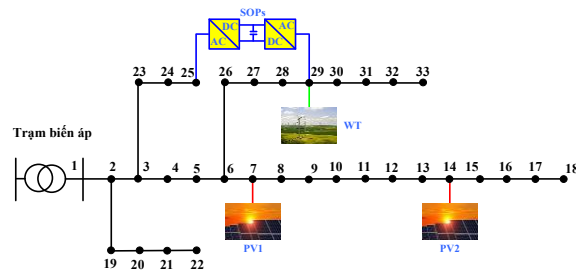


Hình 5. Cấu hình điện áp của DPG IEEE 33 nút

Hình 5 hiển thị cấu hình điện áp của các trường hợp khác nhau. Trường hợp cơ bản (Base) khi không đặt 3DG và SOPs có nhiều nút vi phạm điện áp, điện áp nút nhỏ hơn 0,95 pu như các nút từ nút 6 đến nút 18 và từ nút 26 đến nút 33. Ngược lại với trường hợp cơ bản, trường hợp 3DG (tối ưu 3 DG) và trường hợp 3DG_SOP (tối ưu 3 DG và SOPs ở L5) đã cải thiện điện áp ở tất cả các nút, các điện áp nút đều lớn hơn 0,95 pu, đặc biệt trường hợp 3DG_SOP, điện áp gần bằng 1,0 pu ở tất cả các nút. Kết quả cho thấy đóng góp đáng kể khi tích hợp DG và SOPs trong DPG 33 nút.

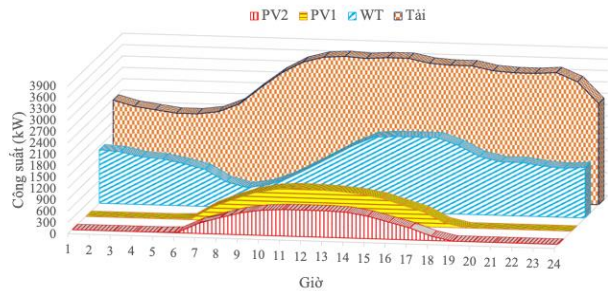
4.3. Trường hợp 3: Vận hành tối ưu SOPs trong một ngày với sự thay đổi của tải, DG và giá điện

Trường hợp 3 sử dụng giải pháp tối ưu đạt được ở trường hợp 2 để mô phỏng vận hành của DPG IEEE 33 nút trong một ngày với hàm mục tiêu là cực tiểu chi phí mua điện từ lưới. SOPs được gắn ở L5 (nối nút 25 và nút 29), 2 DG ở nút 7 và nút 14 là PV1 và PV2 tương ứng, trong khi đó DG ở nút 29 là WT. Công suất định mức của WT, PV1, PV2 được chọn tương ứng là 2 MW, 900 kW và 700 kW. DPG IEEE 33 nút với các thiết bị điện thêm vào được vẽ ở Hình 6.



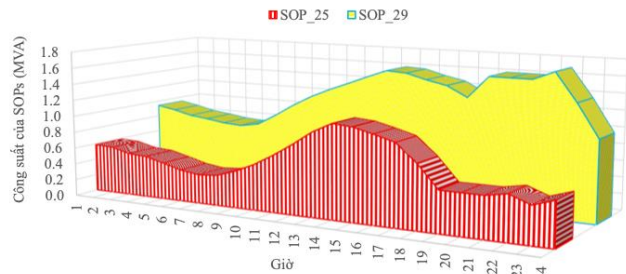
Hình 6. DPG IEEE 33 nút hiệu chỉnh ở trường hợp 3

Hình 7 hiển thị sự thay đổi của tải, WT, PV1, PV2 theo 24 giờ.

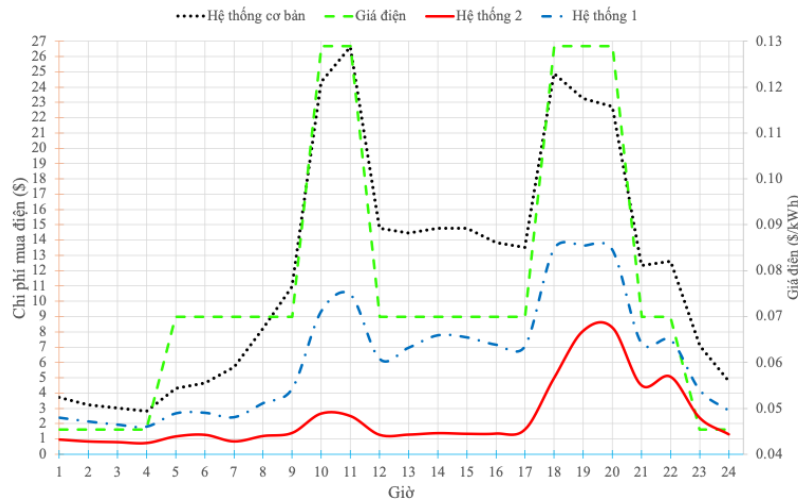


Hình 7. Thay đổi tải, WT, PV1, PV2 theo 24 giờ

Hình 8 biểu thị công suất vận hành tối ưu của SOPs tại nút 25 (SOP_25), và SOPs tại nút 29 (SOP_29) trong một ngày.



Hình 8. Vận hành tối ưu công suất của SOPs trong 24 giờ



Hình 9. Chi phí mua điện từ lưới của 3 hệ thống và giá điện thay đổi theo 24 giờ

Hình 9 thể hiện chi phí mua điện của 3 hệ thống khác nhau và giá điện thay đổi theo 24 giờ. Hệ thống cơ bản không có WT, PV1, PV2, SOPs tham gia, chi phí mua điện từ lưới nhỏ nhất bằng 2,8032 \$ lúc 4 giờ, chi phí mua điện từ lưới cao nhất bằng 26,612 \$ lúc 11 giờ, tổng chi phí mua điện từ lưới trong 24 giờ bằng 291,3409 \$. Hệ thống 1 có sự tham gia của WT, PV1, PV2, với hệ thống này, chi phí mua điện từ lưới nhỏ nhất bằng 1,8031 \$ lúc 4 giờ, chi phí mua điện từ lưới cực đại bằng 13,6417 \$ lúc 19 giờ, tổng chi phí mua điện từ lưới trong 1 ngày của Hệ thống 1 bằng 148,587 \$. Hệ thống 2 có sự tham gia của WT, PV1, PV2 và SOPs, chi phí mua điện từ lưới nhỏ nhất bằng 0,721 \$ lúc 4 giờ, chi phí mua điện từ lưới cực đại bằng 8,2942 \$ lúc 20 giờ, tổng chi phí mua điện từ lưới trong 24 giờ của Hệ thống 2 bằng 56,9398 \$. Như vậy, với sự vận hành tối ưu của SOPs trong một ngày, Hệ thống 2 đã giảm 234,401 \$ (80,46%) so với Hệ thống cơ bản, và đã giảm 91,6471 \$ (61,68%) so với Hệ thống 1.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này áp dụng thuật toán EO để tối ưu phân bố các DG và SOPs trong DPG IEEE 33 nút. Nhiệm vụ của bài toán là tìm vị trí tốt nhất để lắp đặt các DG, SOPs và xác định công suất tối ưu của chúng để giảm tổn thất công suất trong một giờ và cực tiểu chi phí mua điện từ lưới trong một ngày. Trong DPG IEEE 33 nút, trường hợp 1 phân bố tối ưu 3 DG, trường hợp 2 phân bố tối ưu đồng thời 3 DG và 1 SOPs, trường hợp 3 sử dụng giải pháp ở trường hợp 2 để vận hành công suất tối ưu của SOPs trong một ngày. Kết quả trường hợp 1 cho thấy EO có tổn thất công suất nhỏ nhất bằng 72,7869 kW, tiếp theo là PSO [15] 72,85 kW, BA [24] 75,05 kW, MOTA [23] 96,3 kW, HSA [25] 96,76 kW, và TM [23] có tổn thất công suất cao nhất bằng 102,3 kW. Như vậy giải pháp đặt 3 DG ở trường hợp 1 bằng phương pháp EO có thể giảm 65,5% tổn thất công suất trong DPG. Trường hợp 2, tổn thất công suất tiếp tục giảm khi tối ưu đồng thời 3 DG và 1 SOP ở L5, kết quả là tổn thất công suất giảm 91,77% so với hệ thống cơ bản khi không có 3 DG và SOPs, giảm 12,27% so với phương pháp PSO [15]. Trường hợp 3 tối ưu vận hành SOPs trong 24 giờ khi tải, 3 DG và giá điện thay đổi theo thời gian, kết quả mô phỏng cho thấy tính hiệu quả của SOPs khi giảm 234,401 \$ (80,46%) so với hệ thống cơ bản, và giảm 91,6471 \$ (61,68%) so với hệ thống 1 khi chỉ có WT, PV1, PV2 tham gia mà không có SOPs.

Nghiên cứu này có các đóng góp đáng kể cho DPG trong việc giảm tổn thất công suất và chi phí mua điện từ lưới, nâng cao cấu hình điện áp. Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn các hạn chế đó là các chi phí đầu tư, bảo trì và vận hành của các DG và SOPs chưa được xem xét. Các hạn chế này sẽ được khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo. Các chi phí đầu tư và vận hành của các DG và SOPs sẽ được tính toán trong các hàm mục tiêu để giải quyết bài toán thiết kế tối ưu. Các nghiên cứu trong tương lai sẽ cho các kết quả thiết thực và mang lại các lợi ích hơn cho DPG.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Song, Y. H., Wang, G. S., Johns, A. T., & Wang, P. Y. - Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution **144** (4) (1997) 345-350. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19971101>.
2. Nguyen, T. T., Nguyen, T. T., & Duong, M. Q. - An improved equilibrium optimizer for optimal placement of photovoltaic systems in radial distribution power networks. Neural Computing and Applications **34** (2022) 1-30. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06779-w>.
3. Askarzadeh, A. - Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology. IET Generation, Transmission & Distribution **10** (14) (2016) 3631-3638. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0419>.
4. Angalaeswari, S., Sanjeevikumar, P., Jamuna, K., & Leonowicz, Z. - Hybrid PIPSO-SQP Algorithm for Real Power Loss Minimization in Radial Distribution Systems with Optimal Placement of Distributed Generation. Sustainability **12** (14) (2020) 5787. <https://doi.org/10.3390/su12145787>.
5. Atwa, Y. M., & El-Saadany, E. F. - Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems. IET Renewable Power Generation **5** (1) (2011) 79-88. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0011>.

6. Kien, L. C., Bich Nga, T. T., Phan, T. M., & Nguyen, T. T. - Coot optimization algorithm for optimal placement of photovoltaic generators in distribution systems considering variation of load and solar radiation. *Mathematical Problems in Engineering* (2022), 1-17. <https://doi.org/10.1155/2022/2206570>.
7. Abo El-Ela, A. A., Allam, S. M., Shaheen, A. M., & Nagem, N. A. - Optimal allocation of biomass distributed generation in distribution systems using equilibrium algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems* **31** (2) (2021) e12727. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12727>.
8. Dias Santos, J., Marques, F., Garcés Negrete, L. P., Andréa Brigatto, G. A., López-Lezama, J. M., & Muñoz-Galeano, N. - A novel solution method for the distribution network reconfiguration problem based on a search mechanism enhancement of the improved harmony search algorithm. *Energies* **15** (6) (2022) 2083. <https://doi.org/10.3390/en15062083>.
9. Bloemink, J.M. and Green, T.C. - Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. *IEEE PES General Meeting* (2010) 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589629>.
10. Jiang, X., Zhou, Y., Ming, W., Yang, P., & Wu, J. - An overview of soft open points in electricity distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid* **13** (3) (2022) 1899-1910. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3148599>.
11. Qi, Q., Wu, J., & Long, C. - Multi-objective operation optimization of an electrical distribution network with soft open point. *Applied Energy* **208** (2017) 734-744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.075>.
12. Zheng, Y., Song, Y., & Hill, D. J. - A general coordinated voltage regulation method in distribution networks with soft open points. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **116** (2020) 105571. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105571>.
13. Han, C., Song, S., Yoo, Y., Lee, J., Jang, G., & Yoon, M. - Optimal operation of soft-open points for high penetrated distributed generations on distribution networks. In *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia)* (2019) 806-812. <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796910>.
14. Cao, W., Wu, J., Jenkins, N., Wang, C., & Green, T. - Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation. *Applied Energy* **165** (2016) 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.022>.
15. Karunarathne, E., Pasupuleti, J., Ekanayake, J., & Almeida, D. - The optimal placement and sizing of distributed generation in an active distribution network with several soft open points. *Energies* **14** (4) (2021) 1084. <https://doi.org/10.3390/en14041084>.
16. Nguyen, T. T., Nguyen, T. T., & Nguyen, H. P. - Optimal soft open point placement and open switch position selection simultaneously for power loss reduction on the electric distribution network. *Expert Systems with Applications* **238** (2024) 121743. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121743>.
17. Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems* **191** (2020) 105190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105190>.
18. <https://globalwindatlas.info/fr>.
19. <https://globalsolaratlas.info/map>.
20. Jones, P. S., & Davidson, C. C. - Calculation of power losses for MMC-based VSC HVDC stations. In *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)* (2013) 1-10. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631955.
21. Diaaeldin, I. M., Aleem, S. H. A., El-Rafei, A., Abdelaziz, A. Y., & Calasan, M. - Optimal soft open points operation and distributed generations penetration in a reconfigured Egyptian distribution network. *2021 25th International Conference on Information Technology (IT)* (2021) 1-6. <https://doi.org/10.1109/IT51528.2021.9390150>

22. Kashem, M. A., Ganapathy, V., Jasmon, G. B., & Buhari, M. I. - A novel method for loss minimization in distribution networks. In DRPT2000. International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies. Proceedings (Cat. No. 00EX382) (2000) 251-256. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2000.855672>
23. Meena, N. K., Swarnkar, A., Gupta, N., & Niazi, K. R. - Multi-objective Taguchi approach for optimal DG integration in distribution systems. IET Generation, Transmission & Distribution **11** (9) (2017) 2418-2428. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.2126>.
24. Sudabattula, S. K., & Kowsalya, M. - Optimal allocation of solar based distributed generators in distribution system using Bat algorithm. Perspectives in Science **8** (2016) 270-272. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.048>.
25. Rao, R. S., Ravindra, K., Satish, K., & Narasimham, S. V. L. - Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. IEEE Transactions on Power Systems **28** (1) (2012) 317-325. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2197227>

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF SOFT OPEN POINTS (SOPs) AND RENEWABLE ENERGY TO MINIMIZE POWER LOSS AND ELECTRICITY PURCHASING COST IN THE IEEE 33-NODE DISTRIBUTION GRID

Tran Van Hai^{1,2}, Truong Viet Anh³, Tran Trong Hieu², Pham Thi Xuan Hoa^{2*}

¹*Ph.D. Student, Ho Chi Minh City University of Technology and Education*

²*Ho Chi Minh City University of Industry and Trade*

³*Ho Chi Minh City University of Technology and Education*

*Email: hoaptx@huit.edu.vn

This paper optimally allocates soft open points (SOPs) and distributed generators (DGs) in the IEEE 33-node distribution grid (DPG) to reduce power loss in an hour and the cost of purchasing electricity from the grid in a day. The EO method is applied to optimize the location and sizing of DGs and SOPs in the DPG. The study demonstrated the lowest power loss when compared to previous research in two scenarios: first, with the placement of three distributed generators (DGs); and second, by simultaneously placing three DGs and 1 SOP within the DPG. Along with reducing power loss, the voltage profiles at the nodes in the DPG were also improved to exceed 0.95 per unit (pu) and approach 1.0 pu. Case 3 utilizes the optimal solution derived from case 2 to effectively operate the SOPs for a day, aiming to minimize the cost of electricity purchases, considering the variations in load, DGs, and electricity prices over the 24-hour period. The results of case 3 show that integrating one wind turbine (WT), two solar photovoltaic systems (PVs), and one SOPs in operation gives the lowest cost of purchasing electricity from the grid, less than the system with only 1WT and 2 PVs, and much lower than the base system without DG and SOPs involved. Utilizing SOPs in DPGs with integrated DGs can significantly reduce power losses and the costs associated with purchasing electricity from the grid.

Keywords: Soft open points (SOPs), distributed generators (DG), distribution power grid (DPG), wind turbine (WT), solar photovoltaic (PV).