

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

TRẦN VĂN HẢI

**TỐI ƯU HOÁ VỊ TRÍ VÀ CÔNG SUẤT KHOÁ MỀM TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI CÓ
SỰ THÂM NHẬP CAO CỦA NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện

Mã số chuyên ngành: 9520201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – năm 2026

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Trương Việt Anh

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Nguyễn Trung Thắng

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp đơn vị chuyên môn họp tại Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM vào ngày tháng năm

Chương 1

TỔNG QUAN

Lưới điện phân phối (DPN) cung cấp điện trực tiếp cho các phụ tải điện thông qua các đường dây phân phối trung áp và hạ áp, dẫn đến tổn thất năng lượng của lưới điện cao [1] và gây sụt áp tại các nút tải [2]. Vì vậy, giảm tổn thất năng lượng và tổn thất điện áp trên DPN luôn được các nhà nghiên cứu quan tâm. Để giảm tổn thất năng lượng, giải pháp là giảm dòng điện và điện trở đường dây [3] bằng cách lắp đặt tụ bù (SCB) [4], máy phát điện gió (WT) [5], máy phát điện mặt trời (PV) [6-7], năng lượng sinh khối [8], tái cấu trúc lưới điện [9], hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) [10], khoá mềm (SOP) [11],... Việc sử dụng các máy phát điện phân tán (DG) dựa trên năng lượng gió và mặt trời rất hiệu quả trong việc giảm tổn thất công suất và cắt giảm năng lượng được cung cấp từ các nguồn điện thông thường như nhà máy thủy điện, nhiệt điện, điện hạt nhân. Tuy nhiên, năng lượng gió và mặt trời là các nguồn năng lượng bất định, phụ thuộc vào điều kiện tự nhiên như bức xạ mặt trời, tốc độ gió,..., năng lượng điện dư từ các DG ở các giờ phát điện cao nhưng nhu cầu tải thấp có thể dẫn đến các vấn đề kinh tế và kỹ thuật không hiệu quả như tổn thất công suất cao, quá tải đường dây, quá điện áp tại các nút, và cung cấp điện ngược trở lại lưới điện, ảnh hưởng đến công tác vận hành và an toàn của DPN.

Như vậy, việc giảm tổn thất công suất và tổn thất điện năng, xem xét mức độ thâm nhập khác nhau của năng lượng tái tạo và cải thiện điện áp trong các lưới điện phân phối IEEE đã được giải quyết đáng kể thông qua các nghiên cứu trước đó. Tuy nhiên, việc lắp đặt SOPs ở các vị trí có sẵn mà bỏ qua các vị trí tiềm năng là một hạn chế, sử dụng số lượng SOPs nhiều trong lưới điện phân phối là chưa hợp lý và không khả thi, hơn nữa các thuật toán sử dụng trước đây có hiệu quả chưa cao. Ngoài ra, các nghiên cứu trước đây đã bỏ qua sự phối hợp dữ liệu thực của bức xạ mặt trời và tốc độ gió theo thời gian với SOPs, SCB, và BESS. Luận án này sẽ khắc phục các hạn chế này. Thuật toán metaheuristic EO [42] được sử dụng để tối ưu hoá công suất và vị trí của SOPs, WT, PV và SCB trong các lưới phân phối IEEE 33 nút, 69 nút và các lưới phân phối ở Việt Nam. Dữ liệu về bức xạ mặt trời và tốc độ gió thực tế được tham khảo từ tài liệu [43] và [44] để tính toán công suất điện mặt trời và điện gió. EO đã áp dụng thành công cho các bài toán tối ưu trong kỹ thuật điện như tối ưu tái cấu trúc lưới và phân bố SOPs [45], tối ưu phân bố DG [46], tái cấu trúc và tối ưu phân bố DG [47], tối ưu lắp đặt các nhà máy

điện gió trong các hệ thống điện cao thế [48]. Ngoài ra, 4 phương pháp metaheuristic khác cũng được áp dụng, bao gồm: Coot optimization algorithm (COOT) [49], Modified weight inertia factor and modified acceleration coefficients-based particle swarm optimization (CFPSO) [50], Tunicate Swarm Algorithm (TSA) [51] và War Strategy Optimization (WSO) [57].

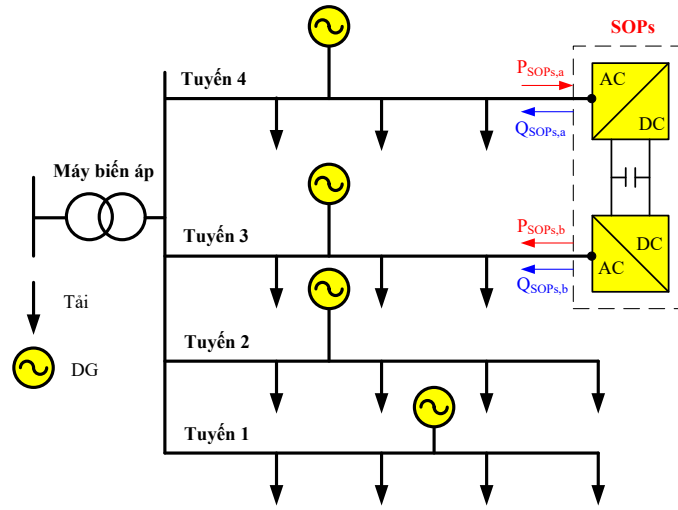
Ngoài ra, luận án này nghiên cứu cực tiểu tổng năng lượng được tạo ra bởi các nguồn điện thông thường trong một năm vận hành và chi phí mua điện từ lưới. Trong lưới phân phối cơ bản, các phụ tải được cung cấp nguồn từ máy biến áp. Máy biến áp nhận điện từ đường dây cao thế, các đường dây này có thể được cung cấp điện bởi các nhà máy điện thông thường như nhiệt điện, thủy điện, nhà máy điện hạt nhân. Máy biến áp, WT và PV cung cấp điện nhu cầu công suất tác dụng. Trong khi đó, nguồn điện, SCB và SOPs cung cấp nhu cầu công suất phản kháng. SOPs có thể hấp thụ công suất tác dụng ở một nút và bơm công suất hấp thụ vào nút khác. Hơn nữa, SOPs có thể bơm hoặc hấp thụ công suất phản kháng ở 2 nút. Trong khi đó, BESS cho phép lưu điện ở những thời điểm có nhu cầu tải thấp, chi phí bán điện thấp hoặc từ các nguồn năng lượng tái tạo phát dư công suất so với nhu cầu tải và được phát điện khi có nhu cầu tải cao, chi phí bán điện cao hoặc khi các nguồn năng lượng tái tạo và nguồn điện lưới thiếu hụt. Với vị trí lắp đặt, công suất định mức, và công suất vận hành của WT, PV, SCB, BESS và SOPs khác nhau, tổng tổn thất, năng lượng nhận từ máy biến áp, và chi phí mua điện từ lưới cũng khác nhau. Vì vậy, nhiệm vụ của nghiên cứu là xác định các vị trí phù hợp nhất để lắp đặt các thiết bị và công suất định mức phù hợp nhất của thiết bị trong bài toán thiết kế. Sau đó, công suất vận hành của chúng được xác định bởi bài toán vận hành. Bài toán đầu tiên đơn giản hơn bài toán thứ hai, nhưng đạt được giải pháp tốt nhất cho bài toán thứ hai là rất quan trọng. Phạm vi của công suất định mức trong bài toán đầu tiên trở thành không gian tìm kiếm của công suất vận hành trong bài toán thứ hai. Trong bài toán thứ 2, vận hành một năm được thực hiện, và số biến điều khiển lớn trở nên khó khăn đối với các thuật toán trước. Vì vậy, một thuật toán metaheuristic mạnh là rất hữu ích để nghiên cứu hai bài toán trên. Trong nghiên cứu này, thuật toán EEO (Enhanced Equilibrium Optimizer) được đề xuất, và lưới điện phân phối IEEE 69 nút và Nhà Bè 55 nút được lựa chọn để tối ưu lắp đặt SCB, PV, WT, BESS và SOPs trong giai đoạn đầu tiên, và vận hành các thiết bị này trong một năm ở giai đoạn 2.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Giới thiệu về SOPs

Soft Open Points (SOPs) là một thiết bị điện tử công suất. SOPs có thể điều khiển chính xác công suất phản kháng và công suất tác dụng của các tuyến dây được kết nối. SOPs thường được xem xét bao gồm 2 bộ biến đổi VSC (Voltage Source Converters), SOPs kết nối hai tuyến dây như được trình bày ở Hình 2.1.



Hình 2. 1: Kết nối tuyến 3 và tuyến 4 trong DPN bởi SOPs

2.2 Các ràng buộc của SOPs

$$P_{SOPs,a} = P_{SOPs,b} \quad (2.1)$$

$$\sqrt{Q_{SOPs,a}^2 + P_{SOPs,a}^2} \leq S_{SOPs}^a \quad (2.2)$$

$$\sqrt{Q_{SOPs,b}^2 + P_{SOPs,b}^2} \leq S_{SOPs}^b \quad (2.3)$$

$$0 \leq S_{SOPs}^a, S_{SOPs}^b \leq S_{SOP}^{max} \quad (2.4)$$

$$2 \leq L_{SOPs,b}, L_{SOPs,a} \leq N_n \quad (2.5)$$

$$L_{SOPs,b} \neq L_{SOPs,a} \quad (2.6)$$

2.3 Phương pháp áp dụng

2.7.2 Phương pháp EO (Equilibrium Optimizer)

Chi tiết về thuật toán EO đã được trình bày cụ thể trong tài liệu tham khảo [42]. Cấu trúc vận hành của thuật toán EO bao gồm các bước chính dưới đây:

- Bước 1: Khởi tạo giải pháp

$$E_i = E_i^{low} + Rd \times (E_i^{up} - E_i^{low}) \text{ với } i = 1, \dots, N_{PO} \quad (2.10)$$

N_{PO} là dân số; E_i^{low} là giới hạn cực tiểu, và E_i^{up} là giới hạn cực đại của không gian tìm kiếm; E_i là giải pháp thứ i ; Rd là số ngẫu nhiên, chọn từ 0 đến 1.

- Bước 2: Cập nhật giải pháp mới

$$E_i^{new} = E_{rf} + (E_i - E_{rf}) \times K + \frac{G}{R \times V} \times (1 - K) \quad (2.11)$$

$$E_{rf} \in [E_{b1}, E_{b2}, E_{b3}, E_{b4}, E_A] \quad (2.12)$$

$$E_A = \frac{E_{b1} + E_{b2} + E_{b3} + E_{b4}}{4} \quad (2.13)$$

2.7.3. Phương pháp Enhanced Equilibrium Optimizer (EEO)

Trong phần này, phương pháp EEO đề xuất được trình bày. EEO là một phiên bản cải tiến của EO dựa trên hai cải tiến đề xuất được thực hiện trên EO. Cải tiến đầu tiên là thay đổi cách xác định giải pháp trung tâm, cải tiến thứ 2 là cải thiện phương trình (2.11) để các giải pháp ứng viên mới được cập nhật. Giải pháp trung tâm đề xuất đạt được bởi:

$$E_A = (\varepsilon_1 \cdot E_{b1} + \varepsilon_2 \cdot E_{b2} + \varepsilon_3 \cdot E_{b3} + \varepsilon_4 \cdot E_{b4}) \quad (2.14)$$

Trong đó ε_1 , ε_2 , ε_3 , và ε_4 là các hệ số trọng số liên quan tới các giải pháp tốt nhất, tốt thứ 2, tốt thứ 3 và tốt thứ 4. Thông thường, tổng các hệ số này bằng 1,0. Việc chọn các giá trị này để tìm ra giải pháp trung tâm gần các giải pháp chất lượng cao hơn các giải pháp có chất lượng thấp.

Trong khi cập nhật, EEO phân loại các giải pháp hiện tại theo thứ tự chất lượng giảm dần. Nghĩa là thứ tự các giải pháp sẽ là giải pháp tốt nhất, tốt thứ hai, ..., và giải pháp tệ nhất. Sau đó, nửa đầu của dân số với các giải pháp chất lượng cao và nửa sau của dân số với các giải pháp chất lượng thấp được cập nhật dựa trên 2 phương trình như sau:

$$E_i^{new} = E_{rf} + (E_i - E_{rf}) \times K + \frac{G}{R \times V} \times (1 - K); i = 1, \dots, N'_p \quad (2.15)$$

$$E_i^{new} = E_{b1} + (E_i - E_{rf}) \times K + \frac{G}{R \times V} \times (1 - K); i = N'_p + 1, \dots, N_{PO} \quad (2.16)$$

CHƯƠNG 3

CỰC TIỂU TỔN THẤT CÔNG SUẤT VÀ TỔN THẤT NĂNG LƯỢNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TRONG MỘT NĂM

3.1 Giới thiệu

Lưới điện phân phối (DPN) cung cấp điện cho các phụ tải điện và đóng vai trò quan trọng trong hệ thống điện. Tổng tổn thất công suất trên hệ thống điện có thể bằng 13% tổng công suất điện phát ra, trong đó tổn thất trên DPN có thể chiếm khoảng 70% trong số tổn thất này [65] và tổn thất điện áp cao ở các giờ có nhu cầu tải đỉnh. Vì vậy, giảm tổn thất công suất và tổn thất điện áp trên DPN 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 bằng cách lắp đặt tụ bù (SCB), máy phát phân tán (DG), máy phát điện gió (WT), máy phát điện mặt trời (PV), năng lượng sinh khối, tái cấu trúc lưới điện (NR), khoá mềm (SOPs),... Trong chương này vị trí và công suất các SCB, WT, PV và SOPs sẽ được tối ưu để đạt được các lợi ích kinh tế và kỹ thuật cho DPN.

3.4 Thành lập bài toán

3.4.1 Hàm mục tiêu

Giảm tổn thất công suất trong một giờ và cực tiểu tổng tổn thất năng lượng trong một ngày và một năm vận hành là mục tiêu chính, được trình bày như sau:

$$\text{Giảm: } \Delta P_{loss,h,s} = \sum_{j=1}^{N_{br}} 3 \cdot I_{brj,h,s}^2 \cdot R_{brj} \text{ (kW)} \quad (3.1)$$

Cực tiểu tổn thất năng lượng trong một ngày vận hành với 24 giờ được xem xét như sau:

$$\text{Cực tiêu } \Delta E_{loss,s}^{day} = \sum_{h=1}^{24} \Delta P_{loss,h,s} * h \quad (3.2)$$

Trong đó: $\Delta E_{loss,s}^{day}$ là tổn thất năng lượng trong một ngày ở tháng thứ s, $h = 1 \div 24$.

$$\text{Cực tiêu: } \Delta E_{loss}^{year} = \sum_{s=1}^{N_{ms}} N_{day,s} \cdot \Delta E_{loss,s}^{day} \text{ (kWh)} \quad (3.3)$$

3.4.2 Các ràng buộc

$$P_{cps,h,s} + \sum_{m=1}^{N_{PV}} P_{PVM,h,s} + \sum_{k=1}^{N_{WT}} P_{WTK,h,s} = \sum_{i=1}^{N_n} P_{Li,h,s} + \sum_{j=1}^{N_{br}} 3 \cdot I_{brj,h,s}^2 \cdot R_{brj} \quad (3.4)$$

$$Q_{cps,h,s} + \sum_{f=1}^{N_{SOP}} Q_{SOPf,h,s} + \sum_{x=1}^{N_{SCB}} Q_{SCBx,h,s} = \sum_{i=1}^{N_n} Q_{Li,h,s} + \sum_{j=1}^{N_{br}} 3 \cdot I_{brj,h,s}^2 \cdot X_{brj} \quad (3.5)$$

3.6 Kết quả nghiên cứu trên DPN IEEE 33 nút

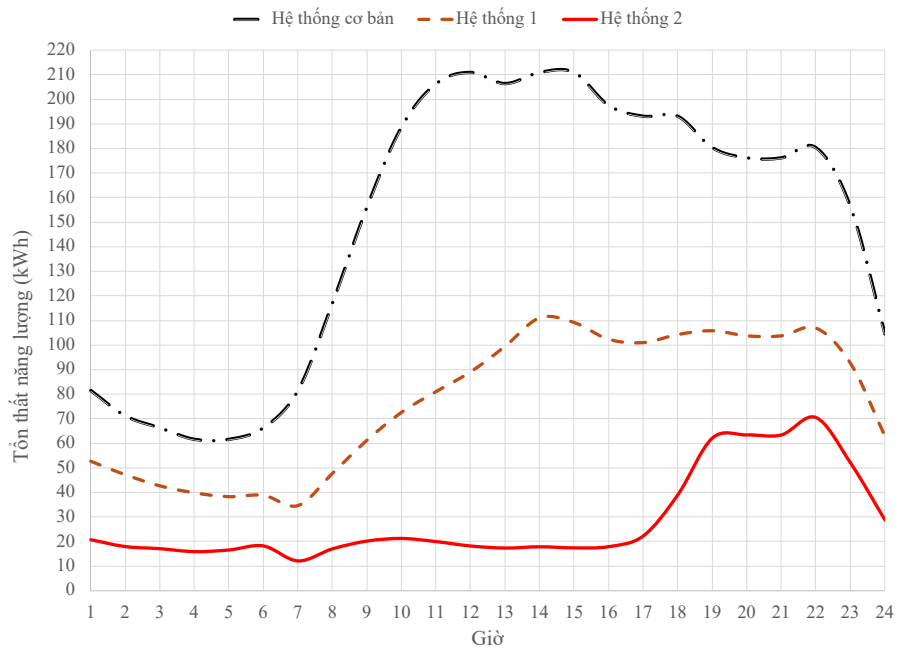
3.6.2 Tối ưu vị trí và công suất của SOPs trên DPN IEEE 33 nút

3.6.2.1. Trường hợp 1: Tối ưu vị trí và công suất của SOPs trong DPN cơ bản

Bảng 3. 1: So sánh tổn thất công suất trên DPN 33 nút với các trường hợp khác nhau

Trường hợp	Công suất tối ưu của SOPs (MVA)	Vị trí tối ưu của SOPs	Tổn thất công suất (kW)	Giảm tổn thất công suất (%)
Cơ bản	-	-	210,9983	0
1	$S_{VSC,6}=3,00;$ $S_{VSC,2}=2,56$	6 - 2	75,2201	64,35
2	$S_{VSC,24}=1,32;$ $S_{VSC,29}=1,70$	24 - 29	18,8941	91,05

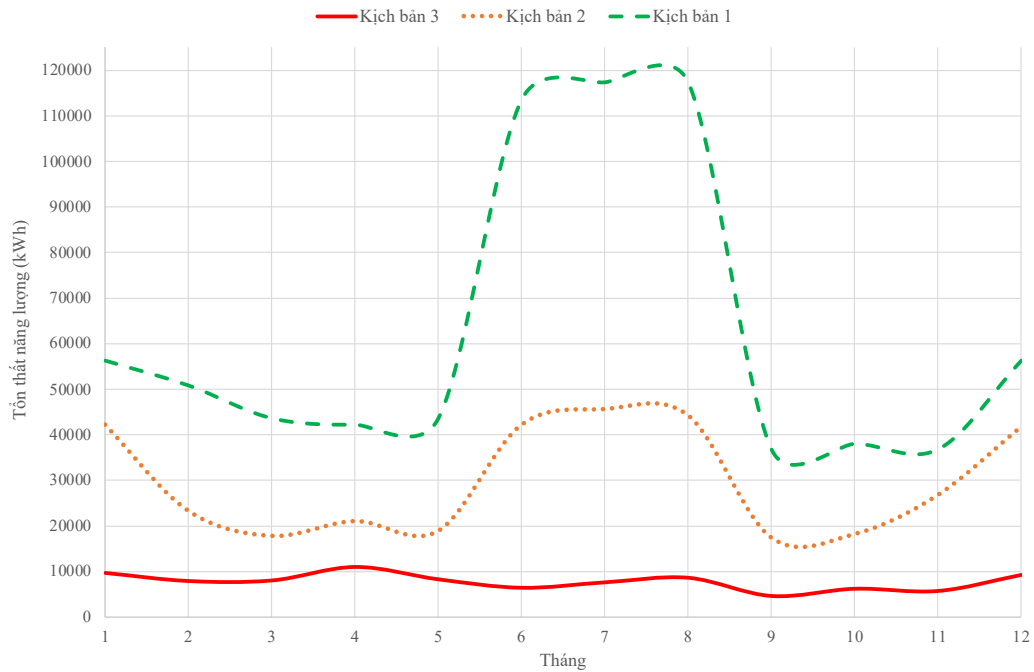
3.6.2.3. Trường hợp 3: Tối ưu vận hành SOPs trong DPN xem xét tải thay đổi theo thời gian và năng lượng tái tạo thâm nhập liên tục với các mức khác nhau trong 24 giờ.



Hình 3. 1: Tổng thất năng lượng trong 24 giờ của 3 hệ thống khác nhau

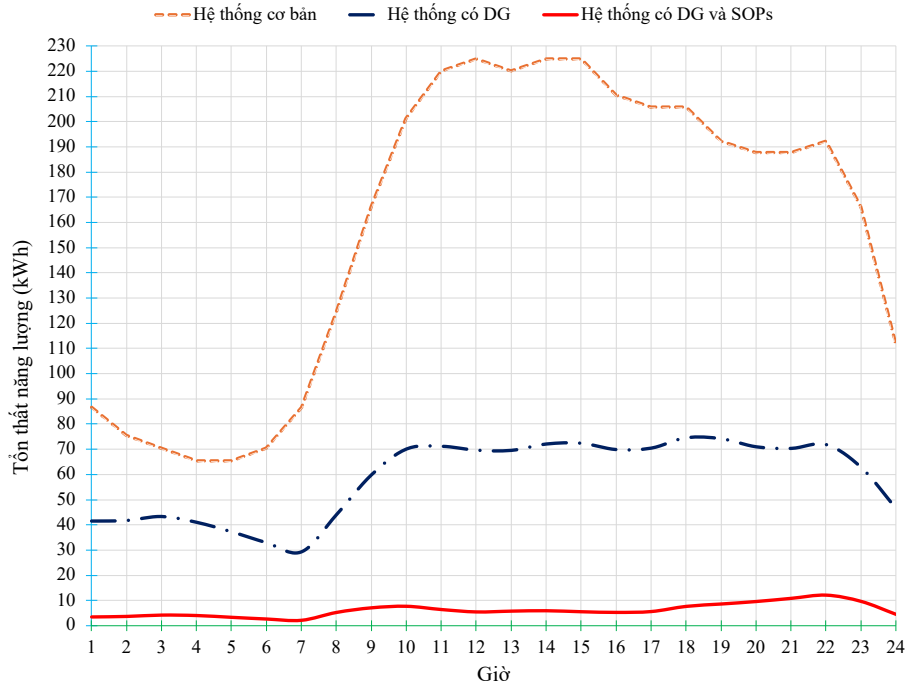
3.7 Kết quả nghiên cứu trên DPN IEEE 69 nút

3.7.1.3 Trường hợp 5: Tối ưu vận hành 1 SOPs và 2 SCB trong 1 năm



Hình 3. 2: Tổng thất năng lượng hàng tháng của các hệ thống

3.7.2 Tối ưu vị trí và công suất của SOPs trên DPN IEEE 69 nút

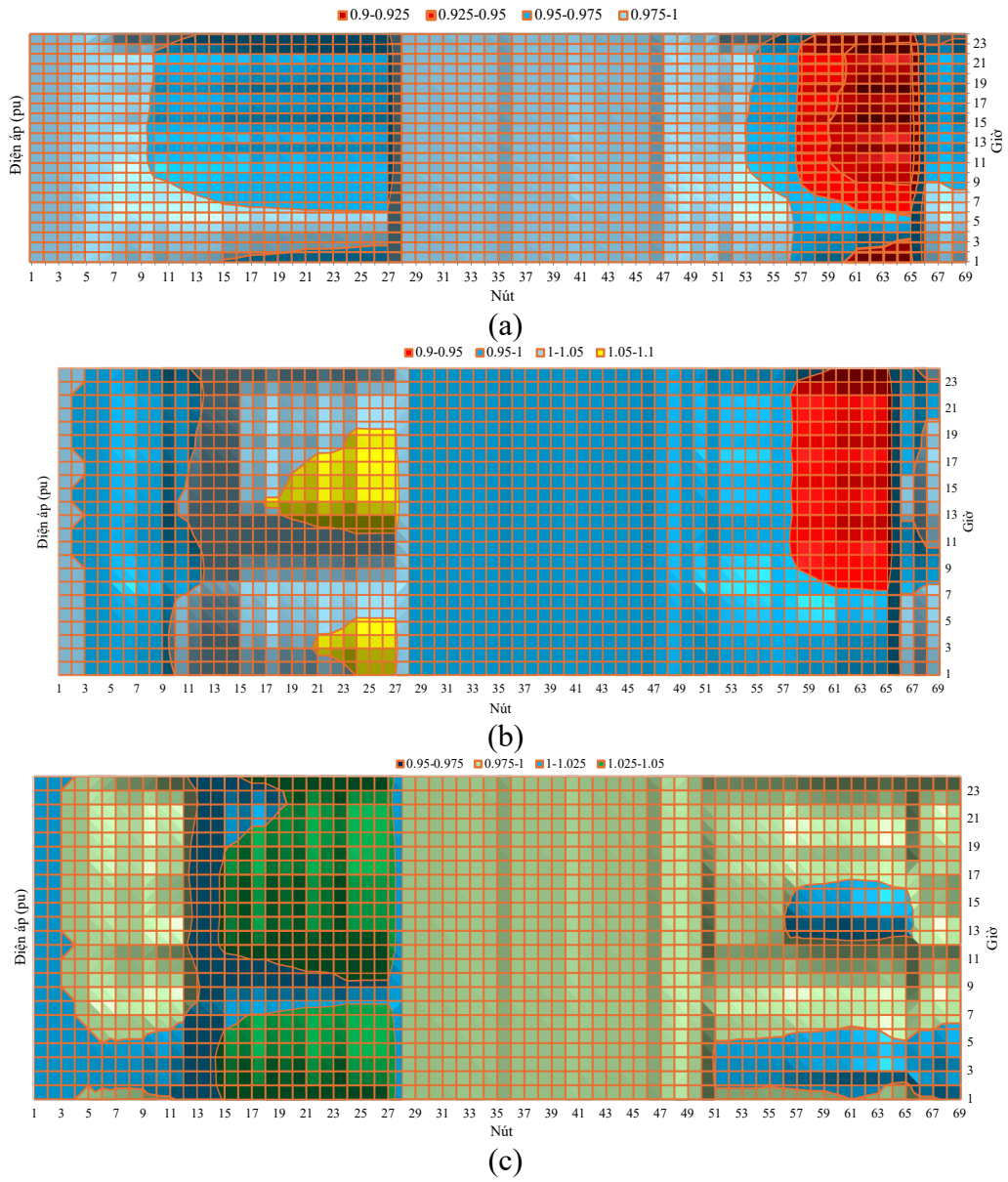


Hình 3. 3: Tổn thất năng lượng của các hệ thống khác nhau trong một ngày

Bảng 3. 2: So sánh tổn thất công suất với các mức thâm nhập khác nhau của năng lượng tái tạo

Trường hợp	Các mức thâm nhập của DG (%)	Mức thâm nhập (%)				
		0	25	50	85	100
Không có SOPs – Không áp dụng thuật toán	Tổn thất công suất (kW)	225	145,9294	96,2662	69,7663	72,1456
	Giảm tổn thất (%)	0	35,14	57,22	68,99	67,94
Có SOPs chạy tối ưu bằng WSO	Tổn thất công suất (kW)	23,2	17,252	13,122	5,334	6,787
	Giảm tổn thất (%)	89,69	88,18	86,37	92,35	90,59
	Vị trí/	2-61/	2-61/	2-61/	17-61/	12-61/

	<p>công suất tối ưu của SOPs (MVA)</p>	$S_2=2,34;$ $S_{61}=2,24$	$S_2=1,94;$ $S_{61}=1,83$	$S_2=1,62;$ $S_{61}=1,50$	$S_{17}=0,36;$ $S_{61}=1,24$	$S_{12}=0,6;$ $S_{61}=1,23$
--	--	------------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------------	--------------------------------



Hình 3. 4: Điện áp của các hệ thống: (a) Hệ thống cơ bản; (b) Hệ thống có DG; (c) Hệ thống có DG và SOPs

3.8 Kết luận

Các đóng góp của chương 3 được tóm tắt như sau:

- Tìm ra EO và WSO, đây là các thuật toán hiệu quả nhất đạt được tổn thất công suất nhỏ hơn các thuật toán trước, bao gồm: PSO [40], TM [54], MOTA [54], BA [55], HSA [56], LSPSO [15], MPSO [13], CSA [13], AO [13], and DSSA [13].

- Đối với lưới phân phối cơ bản khi không có năng lượng tái tạo tham gia, tối ưu vị trí và công suất của SOPs giúp giảm tổn thất công suất tới 64,35% đối với DPN IEEE 33 nút và 89,69% đối với DPN IEEE 69 nút, nâng cao điện áp tại tất cả các nút trên DPN gần bằng 1,0 pu.

- Đối với lưới điện phân phối có sự thâm nhập cao của năng lượng tái tạo, SOPs tham gia điều khiển linh hoạt dòng công suất ở 2 vị trí kết nối, góp phần giảm đáng kể tổn thất công suất. Sự thâm nhập của năng lượng tái tạo kết hợp phân bố tối ưu SOPs đã giúp giảm tổn thất công suất tới 91,05% so với hệ thống cơ bản trên DPN IEEE 33 nút, và giảm 96,98% tổn thất công suất trên DPN IEEE 69 nút.

- Khi năng lượng tái tạo thâm nhập liên tục trong một ngày với các mức thâm nhập khác nhau, thay đổi liên tục theo 24 giờ thì sử dụng SOPs là giải pháp khả thi. Kết quả trên DPN IEEE 33 nút cho thấy với sự vận hành tối ưu của SOPs trong 24 giờ đã góp phần giảm 2870,7237 kWh (khoảng 80,7%) so sánh với hệ thống cơ bản, và giảm 1161,3453 kWh (khoảng 62,85%) so với hệ thống khi chỉ có năng lượng tái tạo tham gia mà không có SOPs. Kết quả trên DPN IEEE 69 nút cho thấy Hệ thống có DG và SOPs đã đạt được mức giảm đáng kể 3638,6229 kWh (khoảng 96,1%) so với hệ thống cơ bản và mức giảm ấn tượng 1257,2779 kWh (khoảng 89,49%) so với hệ thống chỉ có DG.

Kết quả trường hợp 5 trên DPN IEEE 69 nút cho thấy hiệu quả của giải pháp kết hợp đồng thời vận hành tối ưu SCB và SOPs khi năng lượng tái tạo thâm nhập thay đổi theo giờ và theo các tháng trong năm, tải thay đổi theo các mùa trong năm. Vận hành tối ưu SCB và SOPs trong một năm có thể giảm 660193,772 kWh so với hệ thống cơ bản khi không có năng lượng tái tạo tham gia; và giảm 266264,637 kWh so với hệ thống có năng lượng tái tạo thâm nhập. Giảm tổn thất năng lượng này có thể quy đổi ra tiền bằng cách sử dụng giá điện 60 \$/MWh. Kết quả, trong một năm có thể tiết kiệm 39612 \$ so với hệ thống cơ bản và 15976 \$ so với hệ thống có thâm nhập của năng lượng tái tạo.

CHƯƠNG 4

ÁP DỤNG EEO CHO BÀI TOÁN CỰC TIỂU ĐIỆN NĂNG MUA TỪ LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TRONG MỘT NĂM

4.4 Thành lập bài toán

4.4.1 Hàm mục tiêu

$$\text{Cực tiểu } E_{grid} = \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{d=1}^{N_{dm}} \sum_{h=1}^{T_h} (P_{Load,h,d} + \Delta P_{loss,h,d} - P_{WT,h,d} - P_{PV,h,d}) * h \quad (\text{kWh}) \quad (4.1)$$

$$P_{Load,h,d} = \sum_{p=1}^{N_b} P_{Loadp,h,d} \quad (\text{kW}) \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{loss,h,d} = \sum_{ij=1}^{N_{ij}} 3 \cdot I_{ij,h,d}^2 \cdot R_{ij} \quad (\text{kW}) \quad (4.3)$$

$$P_{WT,h,d} = \sum_{k=1}^{N_{WT}} P_{WTk,h,d} \quad (\text{kW}) \quad (4.4)$$

$$P_{PV,h,d} = \sum_{n=1}^{N_{PV}} P_{PVn,h,d} \quad (\text{kW}) \quad (4.5)$$

4.4.2 Các ràng buộc

Các giới hạn cân bằng công suất: Nghiên cứu này xem xét lắp đặt WT, PV, SOPs và SCB trong lưới điện phân phối. SOPs và SCB 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:

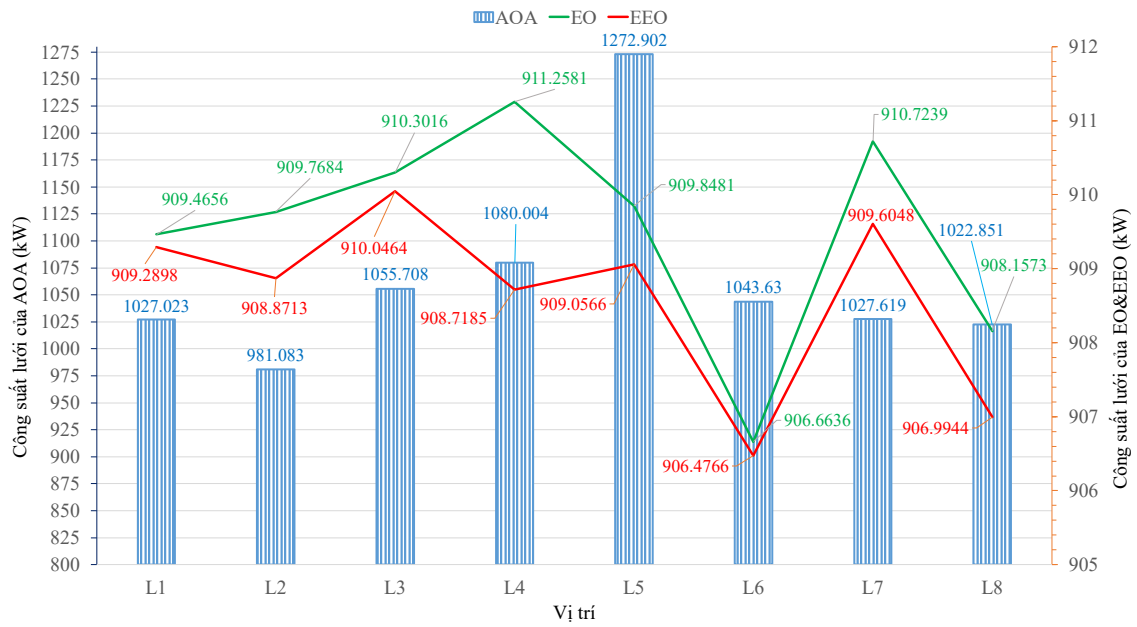
$$\sum_{n=1}^{N_{PV}} P_{PVn,h,d} + \sum_{k=1}^{N_{WT}} P_{WTk,h,d} + P_{Grid,h,d} = \Delta P_{loss,h,d} + P_{Load,h,d} \quad (4.6)$$

$$\sum_{f=1}^{N_{SOP}} Q_{SOPf,h,d} + \sum_{q=1}^{N_{SCB}} Q_{SCBq,h,d} + Q_{Grid,h,d} = \sum_{ij=1}^{N_{ij}} 3 \cdot X_{ij} \cdot I_{ij,h,d}^2 + \sum_{p=1}^{N_b} Q_{Loadp,h,d} \quad (4.7)$$

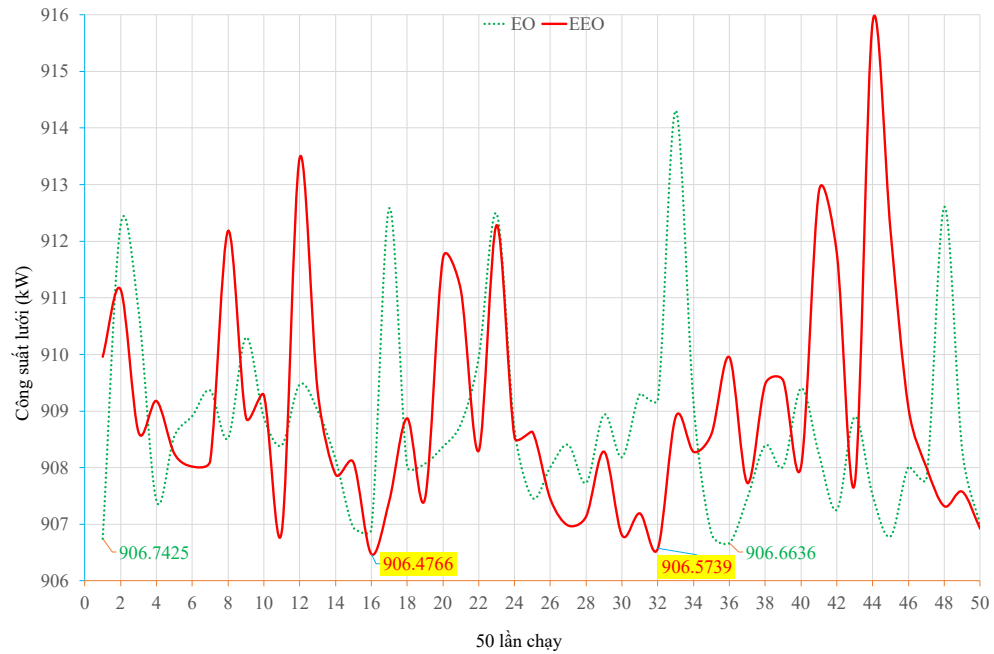
4.6 Kết quả nghiên cứu chương 4

4.6.2 Kết quả nghiên cứu trên DPN IEEE 69 nút

4.6.2.2 Các kết quả đạt được ở trường hợp 1



Hình 4. 1: Công suất lưới với các vị trí khác nhau của SOPs ở trường hợp 1

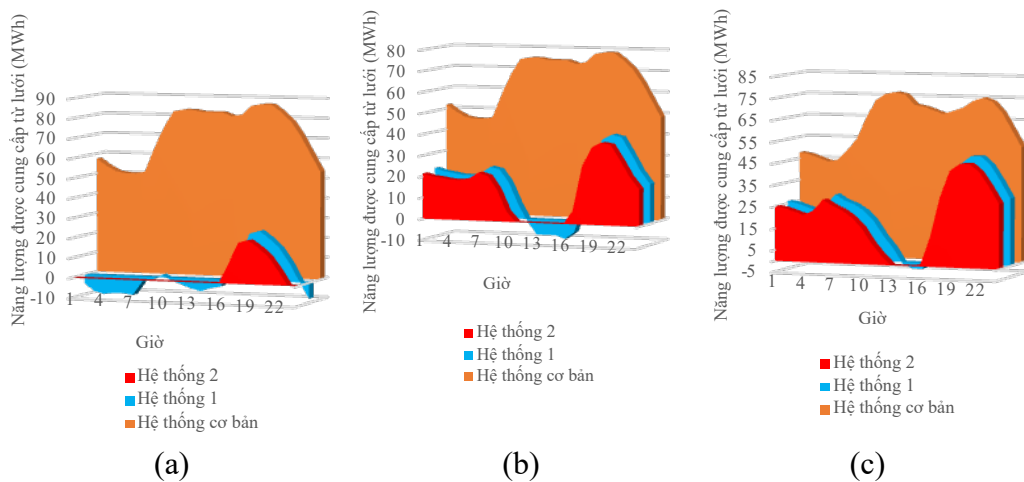


Hình 4. 2: So sánh 50 giải pháp đạt được bởi EO và EEO khi lắp đặt SOPs ở L6

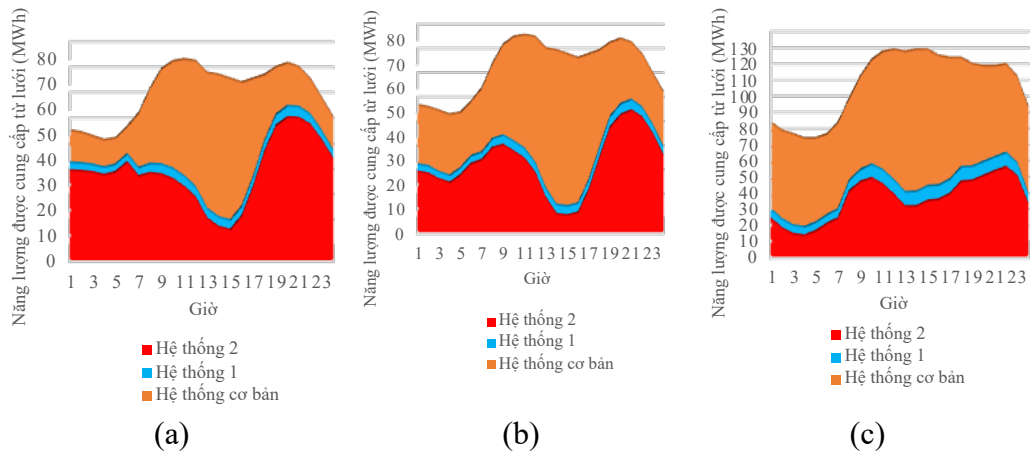
Bảng 4. 1: Tối ưu vị trí và công suất của DG, SCB, và SOPs ở trường hợp 1 đạt được bởi 3 thuật toán

Thuật toán	DG (WT; PV1; PV2)		SCB (SCB1; SCB2)		SOPs	
	Vị trí	Công suất (kW)	Vị trí	Công suất (kVAr)	Vị trí	Công suất (MVA)
AOA	58; 2; 9	2000; 500; 400	57; 25	734,254; 1032,217	L2	$S_{VSC,13}=1,203$ $S_{VSC,21}=1,465$
EO	3; 11; 18	2000; 500; 400	17; 67	277,63; 220,804	L6	$S_{VSC,2}=2,081$ $S_{VSC,61}=2,06$
EEO	2; 11; 17	2000; 500; 400	11; 18	339,606; 257,526	L6	$S_{VSC,2}=1,723$ $S_{VSC,61}=2,056$

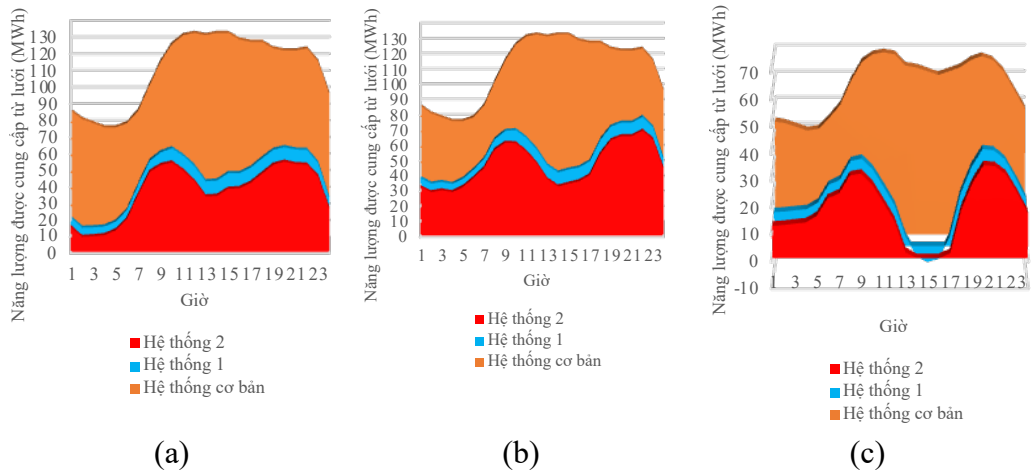
4.6.2.5 Các kết quả đạt được ở trường hợp 4



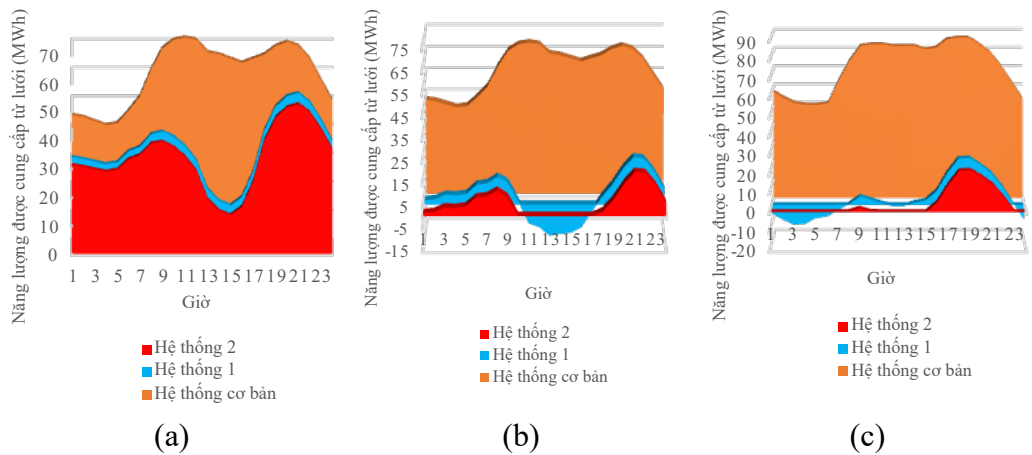
Hình 4. 3: Công suất lưới theo giờ của các hệ thống: a) Tháng 1, b) Tháng 2, c) Tháng 3



Hình 4. 4: Công suất lưới theo giờ của các hệ thống: a) Tháng 4, b) Tháng 5, c) Tháng 6

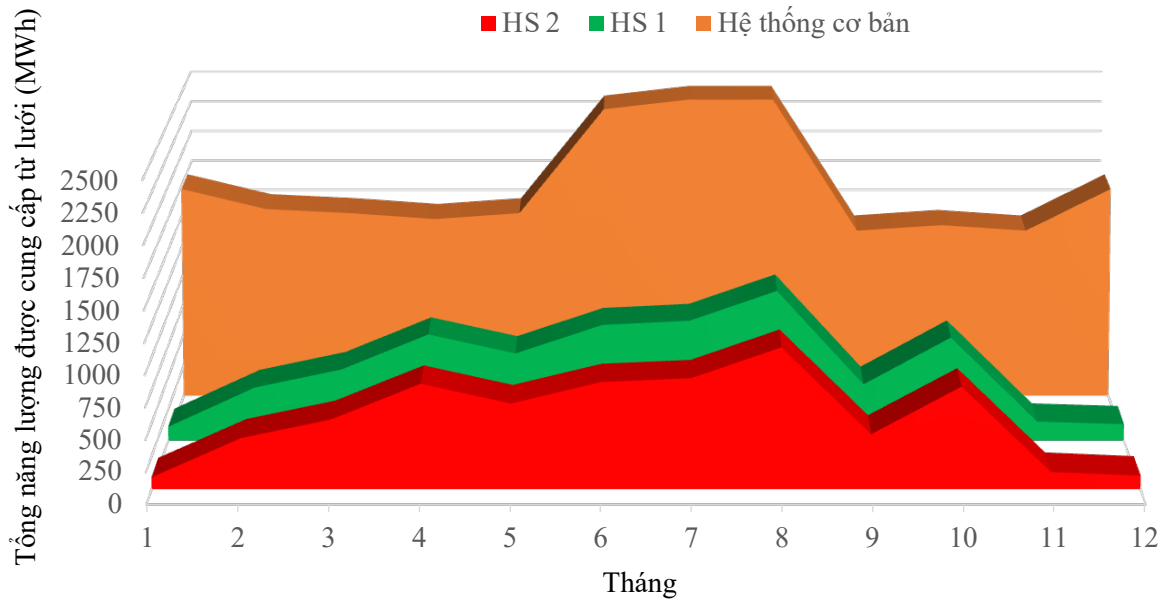


Hình 4. 5: Công suất lưới theo giờ của các hệ thống: a) Tháng 7, b) Tháng 8, c) Tháng 9



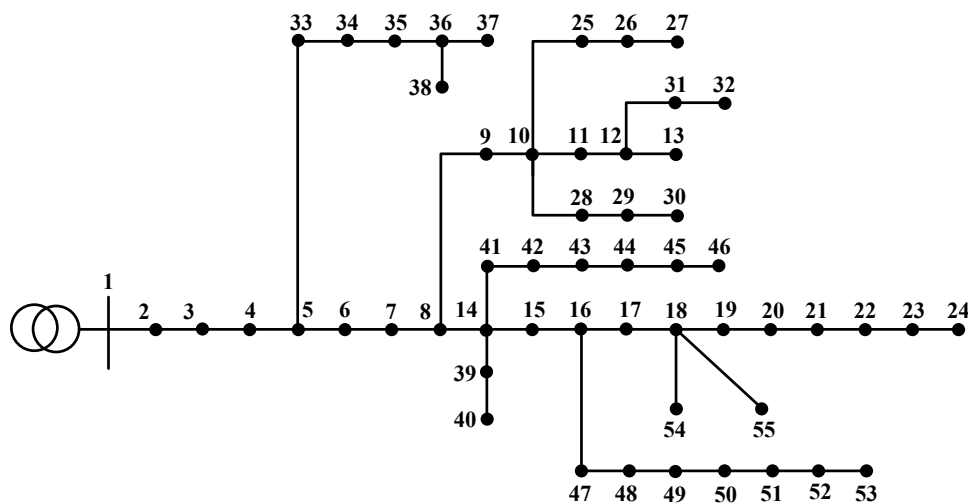
Hình 4. 6: Công suất lưới theo giờ của các hệ thống: a) Tháng 10, b) Tháng 11, c) Tháng 12

Tổng năng lượng được cung cấp bởi lưới điện ở mỗi tháng được trình bày ở Hình 4.7. HS2 sử dụng năng lượng từ lưới thấp nhất trong 3 hệ thống, thấp hơn HS1 bằng 569,605 MWh và thấp hơn hệ thống cơ bản bằng 14178,175 MWh, tương ứng thấp hơn khoảng 7,7% đối với HS1 và 67,5% đối với hệ thống cơ bản.



Hình 4. 7: Tổng năng lượng của lưới phân phối IEEE 69 nút ở mỗi tháng

4.6.3 Cực tiểu điện năng cung cấp từ lưới điện phân phối Nhà Bè 55 nút



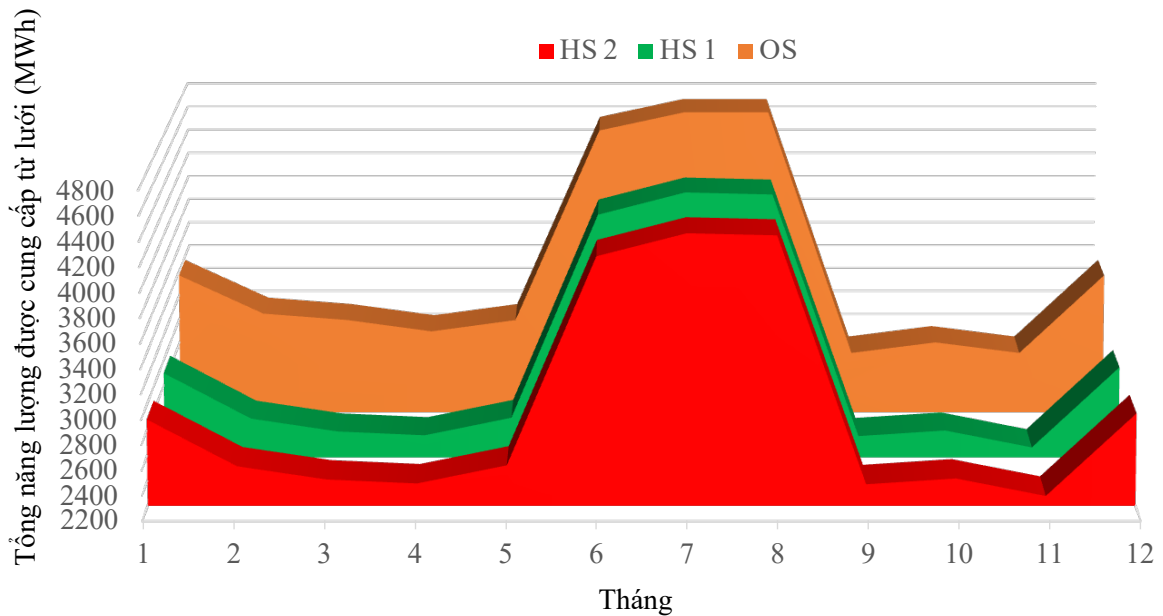
Hình 4. 8: Lưới điện phân phối Nhà Bè 55 nút ở Thành phố Hồ Chí Minh

4.6.3.1 Các kết quả của kịch bản 1

Bảng 4. 2: Tối ưu vị trí và công suất của các thiết bị điện ở kịch bản 1 và công suất lưới điện

Thiết bị	Nút	Công suất	Công suất lưới của hệ thống cơ bản (kW)	Công suất lưới của kịch bản 1 (kW)	Giảm công suất lưới (kW) / (%)
PV1, PV2 (kW)	22; 44	1000; 1000	7706,803	5666,643	(2040,16) / (26,47)
SCB1; SCB2 (kVAr)	22; 8	1000; 973.195			
SOPs (MVA)	2-20	$S_{VSC,2}=3$; $S_{VSC,20}=3$;			

4.6.3.2 Các kết quả của kịch bản 2



Hình 4. 9: Tổng công suất lưới ở mỗi tháng trong lưới phân phối Nhà Bè 55 nút

4.7 Kết luận

Chương 4 đề xuất thuật toán EEO cải tiến để cực tiểu tổng năng lượng được cung cấp bởi lưới điện phân phối trong một năm bằng cách xác định công suất và các giá trị vận hành tối ưu của 1 SOPs, 1 WT, 2 PV, và 2 SCB trong lưới điện phân phối IEEE 69 nút và Nhà Bè 55 nút ở Việt Nam. Thuật toán EEO cải tiến được so sánh với các thuật

toán khác được thực hiện trong chương này, bao gồm EO, AOA, EEFA, và POA và các nghiên cứu trước bằng cách sử dụng 2 trường hợp cho lưới điện phân IEEE 33 và 69 nút. Trong DPN IEEE 33 nút, trường hợp 1 xem xét hệ số công suất bằng 1 cho 3 PV và trường hợp 2 xem xét hệ số công suất từ 0 đến 1. Trong DPN IEEE 69 nút, trường hợp 1 tối ưu đồng thời 1 SOPs, 1 WT, 2 PV, và 2 SCB; trường hợp 2 tối ưu 1 WT, 2 PV, và 2 SCB ở giai đoạn đầu, sau đó tối ưu 1 SOPs ở giai đoạn sau. Đối với các trường hợp, vị trí của 1 WT, 2 PV, và 2 SCB được tối ưu hoá, nhưng vị trí của SOPs được xác định 1 trong 8 vị trí có sẵn (L1, L2, ..., L8). Ngược lại, công suất của 1 SOPs, 1 WT, 2 PV, và 2 SCB đều được tối ưu hoá. Vì vậy có 8 kịch bản cho mỗi trường hợp, và mỗi kịch bản được chạy 50 lần thử nghiệm. Các kết quả được trình bày như sau:

- Trong DPN IEEE 33 nút, thuật toán EEO cải tiến có thể tìm cùng giá trị tổn thất công suất với một số thuật toán bằng 72,788 kW ở trường hợp 1 và 11,741 kW ở trường hợp 2; trong khi đó các thuật toán còn lại khác cho tổn thất công suất cao hơn, từ 72,79 kW tới 83,72 kW ở trường hợp 1 và từ 11,76 kW tới 53,127 kW ở trường hợp 2. Vì vậy, thuật toán EEO cải tiến phù hợp hơn nhiều thuật toán khác cho DPN IEEE 33 nút xem xét trong 1 giờ, bao gồm cả 3 thuật toán được áp dụng: EO, EEFA, và POA.

- Ở trường hợp 1 của DPN IEEE 33 nút, thuật toán EEO cải tiến có thể tìm tổn thất công suất tốt nhất bằng 72,7882 kW với các cài đặt (60 và 50) và (50 và 75) đối với dân số và số vòng lặp, trong khi đó, EO tìm được giá trị tổn thất công suất này với các cài đặt (80 và 50) và (50 và 100) cho dân số và số vòng lặp. Vì vậy, EEO cải tiến nhanh hơn EO ban đầu với dân số bằng 20 và 25 cho số lần lặp ở trường hợp 1. Tương tự, EEO cải tiến nhanh hơn EO với dân số bằng 50 và 50 cho số lần lặp ở trường hợp 2.

- Khi chạy thuật toán EEO cải tiến và các thuật toán khác ở trường hợp 1 của DPN IEEE 69 nút xem xét trong 1 giờ, EEO cải tiến có thể tìm công suất lưới bằng 906,4766 kW, nhưng đối với các thuật toán khác, công suất lưới này từ 906,6636 kW tới 981,083 kW. Tương tự, ở trường hợp 2, EEO cải tiến có thể tìm công suất lưới bằng 907,9939 kW, trong khi đó đối với các thuật toán khác, công suất lưới này từ 908,4779 kW tới 979,9003 kW. Vì vậy, EEO cải tiến hiệu quả hơn các thuật toán khác khi xem xét một giờ ở DPN IEEE 69 nút.

- Khi chạy EEO cải tiến cho DPN IEEE 69 nút trong 1 năm để tối ưu vận hành WT, PV, SCB và SOPs, tổng năng lượng được cung cấp từ lưới điện phân phối trong một năm thấp hơn hệ thống cơ bản bằng 14178,175 MWh (khoảng 67,5%), và thấp hơn hệ thống chỉ có WT và PV bằng 569,605 MWh (khoảng 7,7%).

- Khi chạy EEO cải tiến để tối ưu vị trí và vận hành của 2 PV, 1 SOPs, và 2 SCB trong DPN Nhà Bè 55 nút, tổng năng lượng được cung cấp bởi lưới điện phân phối trong một năm bằng 35642,775 MWh. Trong khi đó, tổng năng lượng được cung cấp bởi lưới điện đối với hệ thống cơ bản bằng 40964,218 MWh, và đối với hệ thống chỉ có 2 PV tham gia bằng 35727,183 MWh. Giải pháp của EEO cải tiến có thể giảm năng lượng từ lưới bằng 84,407 MWh (khoảng 0,24%) và 5321,443 MWh (khoảng 13%) tương ứng với hệ thống chỉ có 2 PV và hệ thống cơ bản.

CHƯƠNG 5

CỰC TIỂU CHI PHÍ MUA ĐIỆN TỪ LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TRONG MỘT NĂM

5.4. Thành lập bài toán

5.4.1 Hàm mục tiêu

Cực tiểu tổng chi phí mua điện trong một năm từ lưới điện phân phối:

Cực tiểu

$$TCPMD = \sum_{i=1}^{N_{my}} \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{h=1}^{T_h} (P_{LD,h,i} + \Delta P_{loss,h,i} + P_{BESS,h,i} - P_{PV,h,i}) * \text{Giá điện}_{h,i} \quad (5.1)$$

$$P_{LD,h,i} = \sum_{m=1}^{N_n} P_{LDm,h,i} \quad (\text{kW}) \quad (5.2)$$

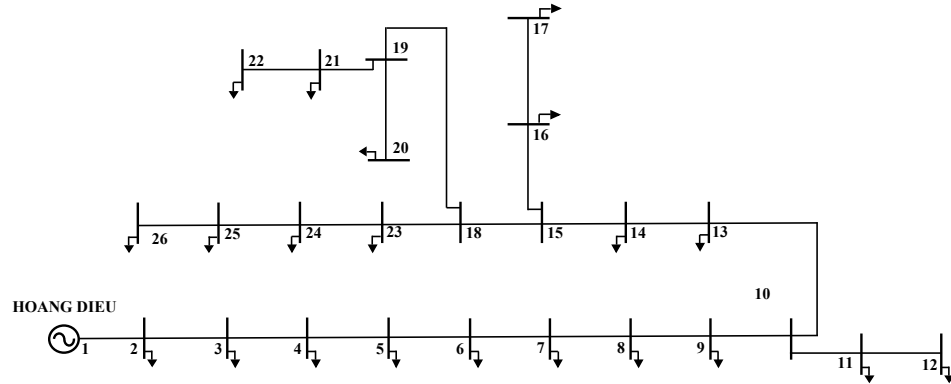
$$\Delta P_{loss,h,i} = \sum_{n=1}^{N_{bn}} 3 \cdot I_{n,h,i}^2 \cdot R_n \quad (\text{kW}) \quad (5.3)$$

$$P_{BESS,h,i} = \sum_{k=1}^{N_{BESS}} \left(\frac{P_{BESSk,h,i}^{In}}{\eta_{kIn}} - \eta_{kOut} * P_{BESSk,h,i}^{Out} \right) \quad (\text{kW}) \quad (5.4)$$

$$P_{PV,h,i} = \sum_{l=1}^{N_{SG}} P_{PVI,h,i} \quad (\text{kW}) \quad (5.5)$$

5.5 Kết quả nghiên cứu

5.5.1 Kết quả nghiên cứu trên lưới điện Hoàng Diệu 26 nút



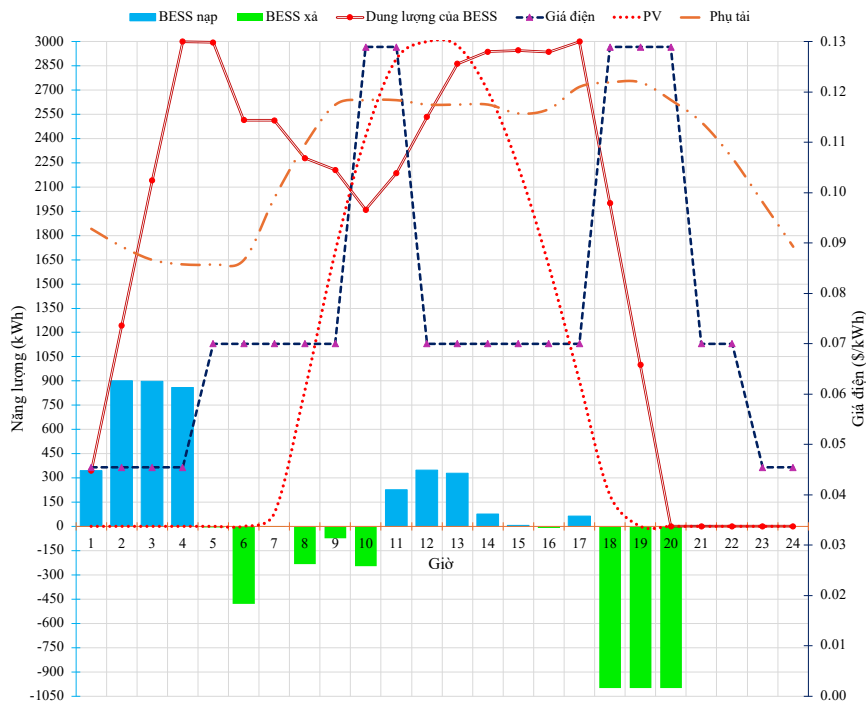
Hình 5. 1: Lưới điện Hoàng Diệu 26 nút ở thành phố Hồ Chí Minh

5.5.1.1. Các kết quả đạt được ở trường hợp 1

Bảng 5. 1: Tổng chi phí của lưới điện cơ bản và trường hợp 1

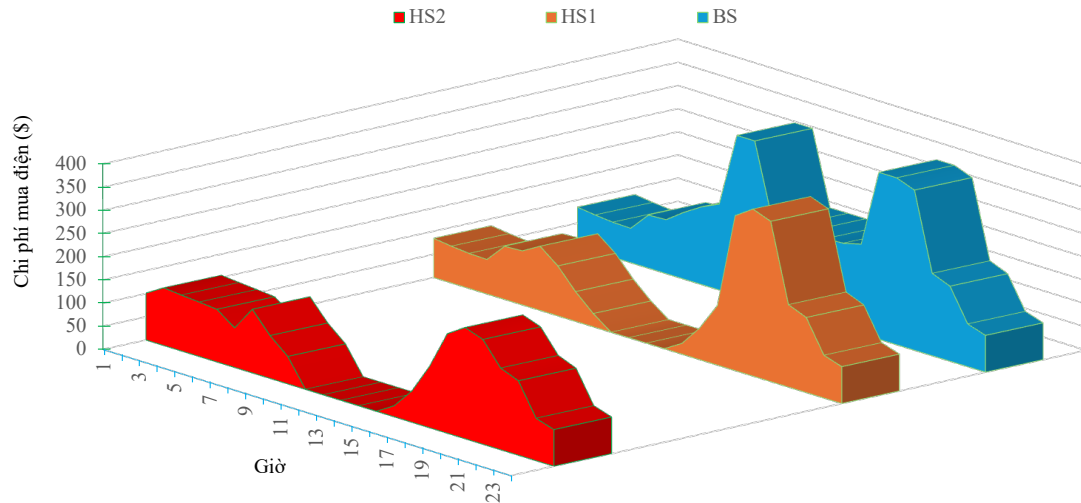
Chi phí lưới điện cơ bản (\$)	Chi phí ở trường hợp 1 (\$)	Giảm chi phí (\$ / %)
277,2198	60,9786	216,2412 / 78

5.5.1.2. Các kết quả đạt được ở trường hợp 2



Hình 5. 2: Năng lượng nạp và xả của BESS ở nút 2 trong 24 giờ

Vận hành tối ưu SOPs và BESS trong một ngày, HS2 đã giảm 2062,5543\$ (khoảng 46,63%) so sánh với BS, và giảm 292,2087\$ (khoảng 11,01%) so sánh với HS1.



Hình 5. 3: Chi phí mua điện từ lưới của 3 hệ thống khác nhau

5.5.2 Kết quả nghiên cứu trên lưới điện phân phối Nhà Bè 55 nút

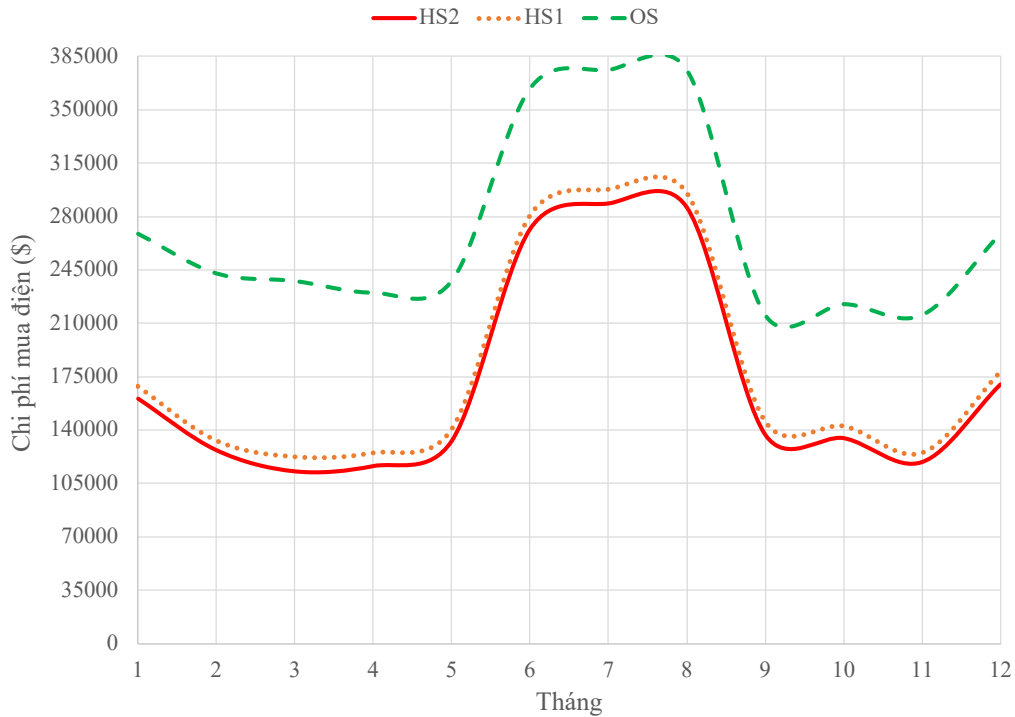
5.5.2.1 Kết quả kịch bản 1

Bảng 5. 2: Vị trí và công suất tối ưu của PV, SCB, và SOPs ở kịch bản 1

Thiết bị	Nút	Công suất	Chi phí mua điện của hệ thống cơ bản (\$)	Chi phí mua điện của trường hợp 1 (\$)	Giảm chi phí mua điện (\$) / (%)
PV1; PV2; PV3; PV4; PV5 (kW)	55; 35; 20; 8; 43	1000; 1000; 1000; 1000; 1000	539,4891	185,9772	(353,5119) / (65,53)
SCB1; SCB2 (kVar)	5; 47	526,564; 679,952			
SOPs (MVA)	2-22	$S_{VSC,2}=2,28$; $S_{VSC,22}=2,49$;			

5.5.2.2 Kết quả kịch bản 2

HS2 có chi phí mua điện thấp nhất trong 3 hệ thống mô phỏng, HS2 tiết kiệm 1194990,954 \$ (tương ứng 36,73 %) so với OS; HS2 tiết kiệm 98854,905 \$ (tương ứng 4,58 %) so với HS1.



Hình 5. 4: Chi phí mua điện của 3 hệ thống khác nhau trong lưới điện phân phối Nhà Bè

5.6 Kết luận

Chương 5 đã tối ưu vị trí và công suất của SOPs, PV, SCB và BESS trên lưới điện phân phối Hoàng Diệu 26 nút và Nhà Bè 55 nút để cực tiểu chi phí mua điện từ lưới điện phân phối. Đối với lưới điện phân phối Hoàng Diệu, phương pháp WSO được sử dụng để xác định vị trí và công suất tối ưu của PV, BESS, và SOPs. Ở trường hợp 1, ba PV và 1 SOPs được tối ưu đồng thời với mức tải định mức ở tất cả các nút. Ở trường hợp 2, sử dụng các vị trí tối ưu của 3 PV và 1 SOPs được xác định ở trường hợp 1, tối ưu vị trí lắp đặt BESS và vận hành tối ưu BESS và SOPs trong 24 giờ để cực tiểu chi phí mua điện từ lưới. Đối với lưới Nhà Bè, EEO được áp dụng để tối ưu vị trí, công suất của PV, SOPs, SCB và BESS. Trong kịch bản 1, tối ưu đồng thời 5 PV, 2 SCB, và 1 SOPs bằng cách sử dụng tải định ở tất cả các nút. Kịch bản 2 sử dụng kết quả ở kịch bản 1 và tối ưu vận hành BESS, 2 SCB và 1 SOPs để cực tiểu chi phí mua điện từ lưới trong một năm vận hành. Các kết quả được trình bày như sau:

- Trường hợp 1 ở lưới Hoàng Diệu, tối ưu đồng thời 3 PV và SOPs giúp giảm 78% tổng chi phí mua điện từ lưới trong 1 giờ vận hành khi so sánh với hệ thống cơ bản không có 3 PV và SOPs tham gia.
- Sử dụng kết quả ở trường hợp 1, vận hành tối ưu SOPs và BESS trong một ngày

ở trường hợp 2, HS2 đã giảm 2062,5543\$ (khoảng 46,63%) so sánh với BS, và giảm 292,2087\$ (khoảng 11,01%) so sánh với HS1.

- Bằng việc tối ưu vị trí và công suất lắp đặt của 5 PV, 2 SCB, và 1 SOPs ở kịch bản 1 trong lưới điện phân phối Nhà Bè, chi phí mua điện từ lưới giảm 353,5119 \$ (tương ứng 65,53%).

- Sử dụng kết quả ở kịch bản 1, kết hợp vận hành tối ưu SOPs, BESS và SCB, HS2 tiết kiệm 1194990,954 \$ (tương ứng 36,73 %) so với OS; và HS2 tiết kiệm 98854,905 \$ (tương ứng 4,58 %) so với HS1.

CHƯƠNG 6

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN TRONG TƯƠNG LAI

6.1 Kết luận

Luận án đã thành công trong việc áp dụng các thuật toán mới, hiệu quả như EO, WSO, và thuật toán cải tiến EEO để tối ưu vị trí và công suất của SOPs, WT, PV, SCB, và BESS trên các lưới điện phân phối IEEE 33 nút, IEEE 69 nút, Hoàng Diệu 26 nút và Nhà Bè 55 nút, góp phần giảm tổn thất công suất, tổn thất năng lượng, công suất và chi phí mua điện từ các lưới điện phân phối.

6.2 Các hạn chế của luận án

Luận án này vẫn có các hạn chế, bao gồm không xem xét tổn thất công suất trong 2 bộ biến đổi của SOPs, và khoảng cách thực tế giữa 2 nút lắp đặt SOPs. Chưa xem xét chi phí đầu tư và bảo trì của SOPs, DG, SCB, và BESS. Trong tương lai, EEO cải tiến sẽ được áp dụng để giải quyết các ràng buộc bổ sung, và các kết quả sẽ cho thấy quan điểm toàn diện của việc lắp đặt và vận hành của các nguồn năng lượng tái tạo, tụ bù, BESS và SOPs trong các lưới điện phân phối.

6.3 Hướng phát triển trong tương lai

- Cải tiến hơn nữa thuật toán EEO để nâng cao độ ổn định và hiệu suất cho các bài toán kỹ thuật đa mục tiêu trong tương lai.

- Xem xét đưa khoảng cách thực tế giữa 2 nút kết nối SOPs và tổn thất trên 2 bộ biến đổi của SOPs vào bài toán nghiên cứu.

- Nghiên cứu áp dụng SOPs cho các mục tiêu khác liên quan đến nâng cao chất lượng điện năng; cực tiểu tổng chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì của SOPs, DG, SCB, và

BESS; giảm chi phí phát thải để bảo vệ môi trường; nhận diện, bảo vệ và khôi phục các sự cố cho lưới điện.

- Nghiên cứu mở rộng áp dụng SOPs cho lưới truyền tải, trong đó có xem xét yếu tố giá điện trong thị trường điện ở tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sadiq, E. H., & Antar, R. K.: Minimizing power losses in distribution networks: A comprehensive review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 10(4), 20-36 (2024).

[2]. Bansal, Akash & Singh, Ram.: Hunter-Prey Optimization Framework for UPQC Allocation to Improve Efficiency and Voltage Reliability of Power Distribution Network. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 14. 21-33 (2026).

[3]. 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 Comput Appl* 34(8), 6119–6148 (2022).

[4]. Gallego, L.A., Lopez-Lezama, J.M., Carmona, O.G.: A Mixed-Integer Linear Programming Model for Simultaneous Optimal Reconfiguration and Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks. *IEEE Access* 10, 52655–52673 (2022).

[5]. Ayalew, M., Khan, B., Giday, I., et al.: Integration of Renewable Based Distributed Generation for Distribution Network Expansion Planning. *Energies (Basel)* 15(4), 1378 (2022).

[6]. Kien, L.C., Nguyen, T.T., Phan, T.M., Nguyen, T.T.: A study on the placement of photovoltaic units in the North and South of Vietnam for energy loss reduction by using a proposed slime mould algorithm. *Neural Comput Appl* 35(31), 23225–23247 (2023).

[7]. Nguyen, L.D.L., Nguyen, P.K., Vo, V.C., Vo, N.D., Nguyen, T.T., Phan, T.M.: Applications of Recent Metaheuristic Algorithms for Loss Reduction in Distribution Power Systems considering Maximum Penetration of Photovoltaic Units. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2023, 1–23 (2023).

.....

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

[1] **Van Tran, H.**, Truong, A. V., Phan, T. M., & Nguyen, T. T. (2024). Optimal placement and operation of soft open points, capacitors, and renewable distributed generators in distribution power networks to reduce total one-year energy loss. *Heliyon*, Vol. 10, Issue 5, e26845, **Elsevier, SCIE, Q1**. <https://doi.org/10.1016/helivon.2024.e26845>.

[2] **Van Tran, H.**, Truong, A. V., Phan, T. M., & Nguyen, T. T. (2025). Minimize the One-Year Energy for Distribution Power Grids With Renewable Energies-Based Distributed Generators,

Capacitors, and Soft Open Points. *International Journal of Energy Research*, 2025(1), 3457520, **Wiley, SCIE, Q2**. <https://doi.org/10.1155/er/3457520>.

[3] **Tran, H. V.**, Nguyen, T. T., & Truong, A. V. (2025). War Strategy Optimization for Energy Loss and Electricity Purchase Cost Minimization in Distribution Power Grids by Optimizing Location and Capacity of Clean Power Sources and Soft Open Point Components. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2025(1), 5119735, **Wiley, SCIE, Q2**. <https://doi.org/10.1155/etep/5119735>.

[4] **Van Tran, H.**, Phan, T.M., Truong, A.V., Nguyen, T.T., Ton, T.N. (2024). Optimal Allocation of Soft Open Points on Distribution Power Grid with High Penetration of Renewable Energy to Reduce Energy Loss for One day. In: Huang, YP., Wang, WJ., Le, HG., Hoang, AQ. (eds) *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development. GTSD 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1199. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76232-1_19.

[5] **Trần Văn Hải**, Trương Việt Anh, Trần Trọng Hiếu, Phạm Thị Xuân Hoa. (2025). 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. *Tạp chí Khoa học Đại học Công Thương (HUIT Journal of Science – HUITJournal)*, Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh, 25 (5) (2025) 119-129. https://doi.org/10.62985/j.huit_ojs.vol25.no5.318.

[6] **Hai Van Tran**, Anh Viet Truong, Trieu Ngoc Ton, Thang Trung Nguyen, Ly Huu Pham. (2024). Optimizing the placement of soft open points in the IEEE 69-node distribution network to power loss reduction. The 9th International Conference on Advanced Engineering - Theory and Applications, 07-08 November, 2024, Czech Republic, **Lecture Notes in Electrical Engineering series (Springer)**.

[7] **Hai Van Tran**, Xuan Hoa Thi Pham, Anh Viet Truong, Thang Trung Nguyen. (2025). Optimizing the location and size of soft open points, solar-based distributed generators, and battery energy storage systems to minimize electricity purchasing costs of distribution electric grids. *International Conference on Electrical and Power Electronics (ICEPE-2025) on 25th - 26th April 2025 in Singapore, Singapore*.

[8] **Tran Van Hai**, Xuan Hoa Thi Pham, Anh Viet Truong, Ly Huu Pham, Thang Trung Nguyen. (2025). Environmental And Economic Optimization For Distribution Power Grids With Soft Open Points, Solar-Based Distributed Generators, And Battery Energy Storage Systems. *International Journal of Environmental Sciences*, ISSN: 2229-7359, Vol. 11 No. 17s, 2025.

[9] Xuan Hoa Thi Pham, Anh Viet Truong, **Hai Van Tran**. (2026). Reducing electricity purchasing costs for distribution networks with soft open points, solar generators, and battery energy storage systems. 2026 The 10th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA 2026) on March 6-8, 2026 Hanoi, Vietnam. **IEEE Conference Proceedings**.