

NÂNG CAO LỢI NHUẬN XÃ HỘI TRONG THỊ TRƯỜNG ĐIỆN CÓ THIẾT BỊ TCSC SỬ DỤNG GIẢI THUẬT COA

DƯƠNG THANH LONG, NGUYỄN THANH THUẬN

*Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh;
duongthanhlong@iuh.edu.vn*

Tóm tắt. Thị trường điện ra đời đã mang lại nhiều lợi nhuận xã hội. Tuy nhiên, nó cũng làm cho hệ thống thường xuyên bị nghẽn mạch. Nghẽn mạch làm ảnh hưởng trực tiếp đến các hợp đồng giao dịch, làm giảm lợi nhuận xã hội. Vì vậy, để giảm nghẽn mạch, cực đại lợi nhuận xã hội, cần phải xây dựng mới các đường dây truyền tải. Điều này thường gặp nhiều khó khăn từ việc điều tiết chính sách của nhà nước và môi trường. Do đó, việc cân bằng lại công suất trong hệ thống bằng cách sử dụng thiết bị Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) để nâng cao khả năng truyền tải và cực đại lợi nhuận xã hội là một trong những vấn đề quan trọng đối với người vận hành hệ thống điện. Để giải quyết vấn đề này, một số giải thuật tìm kiếm bầy đàn đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước. Tuy nhiên, việc áp dụng giải thuật Cuckoo Optimazation Algorithm (COA) để giải quyết vấn đề này chưa được các nhóm nghiên cứu đề xuất trước đây. Vì vậy, trong bài báo này, giải thuật Cuckoo Optimazation Algorithm (COA) đã được đề xuất và áp dụng để giải bài toán tối ưu cực đại lợi nhuận xã hội thông qua xác định vị trí và dung lượng hợp lý của TCSC. Phương pháp đề nghị được kiểm tra trên hệ thống IEEE 14 nút và kết quả mô phỏng được so sánh với các giải thuật Genetic Algorithm (GA) Grey Wolf Optimization (GWO) đã cho thấy, COA cũng là một trong những phương pháp hữu ích để tối ưu lắp đặt TCSC để cực đại lợi nhuận xã hội.

Từ khóa. Lợi nhuận xã hội, nghẽn mạch, thị trường điện, TCSC, FACTS

ENHANCING SOCIAL WELFARE IN ELECTRICITY MARKET WITH TCSC DEVICE USING CUCKOO OPTIMAZATION ALGORITHM

Abstract. The creating electricity market has brought much social welfare. However, it also causes the system to frequently congestion. Congestion has a direct impact on trading contracts and reduces social welfare. Therefore, in order to eliminate congestion, maximum social welfare, need to build new transmission lines. This is often difficult from regulating state and environmental policies. Thus, rebalancing power flow by using TCSC to improve its transfer capability and maximization social welfare is on of important problems for operator system. In order to solve this problem, many algorithms metaheuristic have been proposed in previous reseach. However, the application of **Cuckoo Optimazation Algorithm (COA)** to solve this problem hasn't been proposed by the research groups before. Thus, in this paper, COA has proposed and applicated to solve the OPF problem for maximization the social welfare via optimal installation of TCSC devices. The method proposed is tested with IEEE 14 bus test systems. Result simulations are compared with GA and GWO show that the COA also is one of the useful methods for TCSC installation to maximum social welfare.

Keywords. Congestion, Social Welfare, Electricity market, TCSC, FACTS.

1. GIỚI THIỆU

Xu hướng chuyển dịch từ hệ thống điện độc quyền cơ cấu theo chiều dọc sang thị trường điện cạnh tranh đã và đang diễn ra mạnh mẽ ở nhiều nước trên thế giới. Tại Việt Nam, lộ trình cho việc áp dụng thị trường điện cũng đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt. Hiện nay, đang áp dụng những bước thí điểm và sau đó tiến tới xây dựng một thị trường điện cạnh tranh. Việc xuất hiện thị trường điện đã làm tăng nhu cầu tiêu thụ điện và mang lại nhiều lợi nhuận xã hội. Tuy nhiên, điều này làm cho hệ thống thường xuyên bị nghẽn mạch do sự gia tăng nhu cầu tiêu thụ điện và các giao dịch công suất phát sinh ngoài kế hoạch định trước. Nghẽn mạch làm cho giá điện khác nhau đáng kể giữa các vùng với nhau. Đây là nguyên nhân

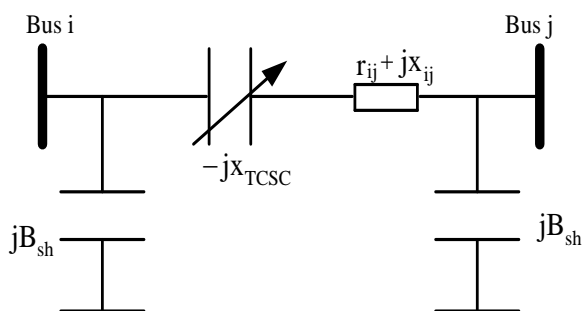
chính làm méo dạng thị trường và giảm lợi nhuận xã hội, trong khi mục tiêu chính của thị trường điện là nâng cao lợi nhuận xã hội. Vì vậy, để giải quyết vấn đề này, cần phải xây dựng mới các đường dây truyền tải. Nhưng việc này thường gặp nhiều khó khăn do chính sách nhà nước và môi trường. Do đó, nâng cao khả năng truyền tải của lưới điện hiện hữu bằng cách sử dụng thiết bị (Flexible Alternating Current Transmission System) FACTS để đáp ứng đầy đủ các giao dịch công suất trong thị trường điện trở thành một trong những thách thức cho người vận hành hệ thống điện.

Trong số các thiết bị FACTS [1], Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) là thiết bị hiệu quả trong việc điều khiển phân bố lại dòng công suất trong hệ thống, giúp hệ thống hiện hữu có thể nâng cao khả năng truyền tải. Vì vậy, việc lắp đặt TCSC trên hệ thống truyền tải là giải pháp thay thế tốt nhất để giải quyết nghẽn mạch và cực đại lợi nhuận xã hội.

Một số công trình nghiên cứu tối ưu hóa lợi nhuận xã hội sử dụng FACTS đã được đề nghị. Lin et al. [2] sử dụng phương pháp điểm nội để mở rộng hệ thống với UPFC để tối đa hóa lợi nhuận xã hội và quản lý tắc nghẽn. Yu et al. [3] sử dụng chương trình phi tuyến tính hỗn hợp để xác định vị trí tối ưu của FACTS để tối đa hóa lợi nhuận xã hội dựa trên nhiều khoảng thời gian. Giải thuật di truyền [4] được sử dụng để tối ưu hóa lắp đặt TCSC để quản lý nghẽn mạch và cực đại lợi nhuận xã hội. Trong [5] đề nghị giải thuật (Fuzzy-GA) để cực đại lợi nhuận xã hội thông qua tối ưu hóa lắp đặt TCSC. Giải thuật GA và GWO đã được đề nghị trong [6] để cực đại lợi nhuận xã hội có thiết bị TCSC.

Gần đây, một giải thuật tìm kiếm bầy đàn gọi là Cuckoo Optimization Algorithm (COA) được đề xuất bởi Rajabioun, R. [7]. Giống như giải thuật CSA [8], COA bắt đầu bởi một quần thể ban đầu. Quần thể chim Cuckoo ở những môi trường sống khác nhau bao gồm 2 đối tượng là chim Cuckoo và trứng. Trong suốt quá trình đấu tranh sinh tồn một số con Cuckoo hoặc trứng của nó bị tiêu diệt, số còn lại sẽ di chuyển tới môi trường sống tốt hơn rồi tiếp tục quá trình sinh sản và đặt trứng. Quá trình thích nghi với môi trường sống của chim Cuckoo sẽ hội tụ lại tại một môi trường sống duy nhất và tốt nhất. Tuy nhiên, khác với giải thuật CSA, COA sử dụng bán kính đặt trứng để tìm nghiệm tối ưu thay vì sử dụng hướng bay như trong CSA. Ứng dụng của giải thuật COA đã được thử nghiệm trên các hàm toán học chuẩn đã cho thấy khả năng giải quyết các vấn đề tối ưu hóa có mức độ khó cao của giải thuật [7]. Tuy nhiên, việc áp dụng giải thuật COA mới chỉ được giới thiệu trong bài toán phân bố công suất tối ưu [9-10]. Do đó, trong bài báo này, tác giả đã trình bày chi tiết cách thực hiện giải thuật COA để giải quyết bài toán tối ưu với nhiều ràng buộc phương trình và bất phương trình để cực đại lợi nhuận xã hội thông qua tối ưu lắp đặt TCSC. Phương pháp đề nghị được kiểm tra trên hệ thống IEEE 14 nút và kết quả mô phỏng được so sánh với các giải thuật GA [6] và GWO [6] đã cho thấy, COA cũng là một trong những phương pháp hữu ích để tối ưu lắp đặt TCSC để cực đại lợi nhuận xã hội

2. MÔ HÌNH TÍNH CỦA TCSC



Hình 1: Mô hình hóa đường dây truyền tải có TCSC

Ảnh hưởng của TCSC trong mạng điện được xem như là một điện kháng điều khiển thêm vào đường dây truyền tải liên quan. Việc giảm tổng trở nối tiếp được thực hiện bằng cách giảm một phần điện kháng đường dây. Do đó công suất truyền tải được tăng lên. Mô hình mạng điện có TCSC được thể hiện trong Hình 2. TCSC có thể được xem xét như một điện kháng $-jX_{TCSC}$ dưới trạng thái tĩnh.

TCSC được tích hợp trong bài toán OPF bằng cách hiệu chỉnh lại thông số đường dây. Dung lượng bù lớn nhất của TCSC được giới hạn là 70% điện kháng của đường dây chưa bù mà ở đó TCSC được lắp đặt. Theo [11], điện kháng mới của đường dây được viết như sau

$$X_{New} = X_{ij} - X_{TCSC} \quad (1)$$

$$X_{New} = (1 - K)X_{ij} \quad (2)$$

Trong đó $K = X_{TCSC}/X_{ij}$ là mức độ bù nối tiếp và X_{ij} là điện kháng của đường dây ij .

Phương trình dòng công suất của đường dây có điện kháng mới như sau:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (4)$$

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 B_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

Trong đó

$$G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{New}^2} \quad \text{và} \quad B_{ij} = \frac{X_{New}}{R_{ij}^2 + X_{New}^2} \quad (7)$$

3. THỰC HIỆN VẤN ĐỀ

3.1 Hàm mục tiêu lợi nhuận xã hội

Mục tiêu của thị trường điện là tạo ra sự cạnh tranh giữa cung và cầu để tất cả những người tham gia, tức là các công ty sản xuất điện và khách hàng tiêu thụ điện nâng cao lợi nhuận của họ. Lợi nhuận sản xuất được biết đến như là chênh lệch giữa tiền nhận được từ việc bán điện và chi phí sản xuất. Giá bán điện là giá yêu cầu tối thiểu mà công ty phát điện chấp nhận để cung cấp một lượng điện năng cụ thể. Trong khi, lợi nhuận khách hàng là chênh lệch giữa giá của khách hàng bằng lòng trả và giá thực sự trả cho việc tiêu thụ một lượng điện năng cụ thể. Công ty vận hành hệ thống điện chịu trách nhiệm thực hiện hợp đồng mua và bán điện giữa các công ty phát điện và khách hàng dựa trên giá cung và cầu sao cho mục tiêu là cực đại lợi nhuận xã hội. Lợi nhuận xã hội được xem như là tổng lợi nhuận sản xuất và lợi nhuận khách hàng, được trình bày như công thức (8)

$$F_{obj} = \left(\sum_{i \in N_g} W_i(Pg_i) + \sum_{j \in N_d} W_j(Pd_j) \right) \quad (8)$$

Trong đó

$W_i(Pd_j)$ là lợi nhuận của khách hàng có được từ việc sử dụng điện sau khi trừ chi phí mua điện và được trình bày như công thức (9)

$$W_j(Pd_j) = B_j(Pd_j) - \lambda Pd_j \quad (9)$$

$W_i(Pg_i)$ là lợi nhuận thu được từ việc bán điện của công ty phát điện sau khi trừ chi phí sản xuất và được trình bày như công thức (10)

$$W_i(Pg_i) = \lambda Pg_i - C_i(Pg_i) \quad (10)$$

$C_i(Pg_i^p) = a_{gi}Pg_i^2 + b_{gi}Pg_i + c_{gi}$ và $B_j(Pd_j^p) = a_{dj}Pd_j^2 + b_{dj}Pd_j + c_{dj}$ là hàm chi phí vận hành của máy phát và hàm lợi nhuận khách hàng. P_{gi} , P_{dj} là công suất của máy phát và công suất tiêu thụ của khách hàng. λ là giá bán và mua cho mỗi MW. Giá này là giá mà người bán chấp nhận bán và người mua đồng ý mua.

a_g (\$/MW²h), b_g (\$/MWh), c_g là hệ số chi phí của máy phát. a_d (\$/MW²h), b_d (\$/MWh), c_d là hệ số lợi nhuận của khách hàng.

Từ phương trình (8-10) hàm mục tiêu lợi nhuận xã hội có thể viết lại như sau

$$F_{obj} = \left(\sum_{i \in N_d} B_j(Pd_j) - \sum_{i \in N_g} C_i(Pg_i) \right) \quad (11)$$

Vấn đề tối ưu cần giải quyết trong bài báo này là cực đại hàm mục tiêu (11). Mục tiêu cực đại lợi nhuận xã hội này có thể được xác định bằng cách giải quyết vấn đề tối ưu phân bố công suất sao cho thỏa mãn các ràng buộc phương trình và bất phương trình.

Ràng buộc

- Phương trình cân bằng công suất

$$P_i(V, \delta) + P_{di} - P_{gi} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (12)$$

$$Q_i(V, \delta) + Q_{di} - Q_{gi} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (13)$$

- Giới hạn công suất máy phát

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (14)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (15)$$

- Giới hạn điện áp

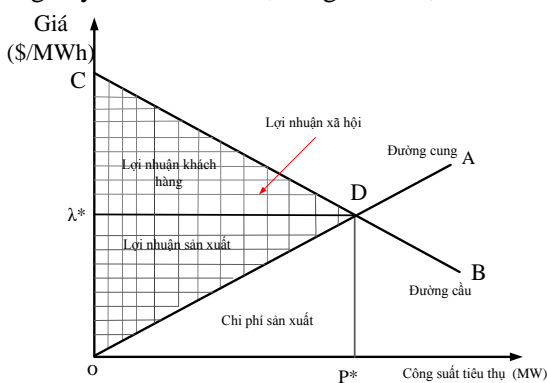
$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, \dots, N_b \quad (16)$$

- Giới hạn công suất chạy trên đường dây

$$S_l \leq S_{l, \max} \quad l = 1, \dots, N_l \quad (17)$$

3.2 Ảnh hưởng của TCSC đến lợi nhuận xã hội

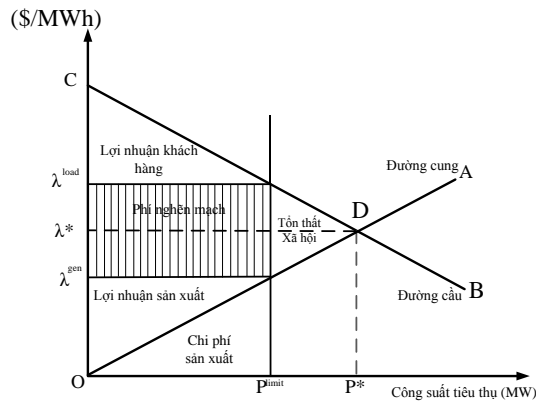
Xét một hệ thống đơn giản có 2 nút, máy phát tại nút 1 và tải tại nút 2 [12]. Giới hạn đường dây giữa nút 1 và 2 là P_{limit} , tổn thất đường dây rất nhỏ. Đồ thị cung cầu được chỉ ra trong Hình 2.



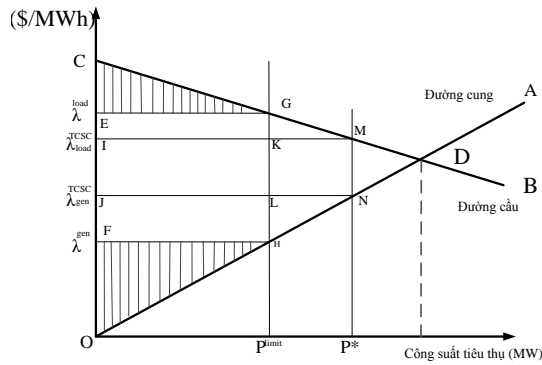
Hình 2. Lợi nhuận sản xuất và lợi nhuận khách hàng trong trường hợp không có ràng buộc

Khi bỏ qua ràng buộc đường dây, điểm cân bằng là tại λ^* (\$/MWh) và P^* (MW). Tuy nhiên, khi xét giới hạn đường dây như Hình 3, thì đã xuất hiện sự chênh lệch giá giữa hai nút này. Tại nút máy phát, giá giảm trong khi tại nút tải, giá tăng. Kết quả này đã làm giảm lợi nhuận sản xuất và lợi nhuận khách hàng như chỉ ra trong Hình 3.

Điều này đã gây ra tổn thất xã hội. Bởi vì giá được xác định ngay tại các nút máy phát và nút tải tương ứng. Kết quả là đã tạo ra thặng dư cho người vận hành thị trường. Thặng dư này được biết đến như là phí nghẽn mạch. Nó được sử dụng để bù vào tổn thất hoặc bù vào việc huy động lưới truyền tải hoặc chuyển đến cho các thành viên tham gia dựa trên quy luật thị trường.



Hình 3. Thặng dư tiêu thụ và khách hàng trong trường hợp có ràng buộc không có TCSC



Hình 4. Thặng dư trong trường hợp có xét ràng buộc và có TCSC

Khi TCSC được lắp đặt tại vị trí hợp lý với dung lượng phù hợp thì nghẽn mạch sẽ được giảm, kết quả mô phỏng hệ thống 2 nút chỉ ra trong Hình 4.

Như thấy trong Hình 4, công suất lớn nhất có thể chuyển tải qua đường dây không có TCSC là P_{limit} và giá tại nút máy phát và nút tải là λ_{gen} và λ_{load} tương ứng. Phí nghẽn mạch mà người vận hành nhận được được cho bởi vùng EGHFE, đó chính là chênh lệch giá nhân với lượng công suất lớn nhất chạy qua các đường dây kết nối; $P_{limit} \times (\lambda_{load} - \lambda_{gen})$. Thặng dư tiêu thụ và sản xuất được cho bởi vùng tam giác EGCE và FHOJ tương ứng. TCSC có thể nhanh chóng cân bằng lại công suất bằng cách điều khiển dòng công suất chạy qua những nhánh không bị quá tải, nâng cao khả năng truyền tải để loại bỏ nghẽn mạch. Nó được cho bởi P_{TCSC} . Giá tại 2 vị trí này cũng thay đổi. Giá tại nút tải được giảm đến λ_{load}^{TCSC} và giá tại nút máy phát tăng đến λ_{gen}^{TCSC} , vì vậy giá nút trên toàn hệ thống sẽ nhỏ. Ảnh hưởng đó làm cho thặng dư tiêu thụ và sản xuất tăng lên và được cho bởi vùng IMCI và JNOJ tương ứng. Phí nghẽn mạch cũng thay đổi và được thể hiện trong vùng IMNJI. Trước khi lắp đặt TCSC, phí nghẽn mạch là trong vùng EGHFE mà lớn hơn vùng IMNJI. Thặng dư xã hội được tăng lên do sử dụng TCSC được chỉ ra trong vùng GMNHG.

4. ÁP DỤNG GIẢI THUẬT COA GIẢI QUYẾT BÀI TOÁN CỰC ĐẠI LỢI NHUẬN XÃ HỘI

4.1 Giới thiệu Cuckoo Optimization Algorithm (COA)

Giải thuật COA được phát triển dựa trên đời sống của quần thể chim Cuckoo [7]. Những điểm đặc biệt trong cách sinh sống, cách đẻ trứng và phát triển của chúng là nền tảng cho việc phát triển COA. Chim Cuckoo đẻ trứng nhưng không ấp trứng và nuôi dưỡng chim non, sau khi đẻ trứng chúng sẽ gắp trứng bỏ vào tổ của loài chim khác, nếu không bị phát hiện chim Cuckoo non sẽ được ấp và nuôi dưỡng bởi loài chim khác. Giống như những giải thuật tiến hóa khác, COA bắt đầu bởi một quần thể ban đầu.

Quần thể Cuckoo ở những môi trường sống khác nhau bao gồm hai đối tượng là chim Cuckoo và trứng. Trong suốt quá trình đấu tranh sinh tồn một số con Cuckoo hoặc trứng của nó bị tiêu diệt, số còn lại sẽ di chuyển tới môi trường sống tốt hơn rồi tiếp tục quá trình sinh sản và đặt trứng. Sự thích nghi với môi trường sống của chim Cuckoo hy vọng sẽ hội tụ lại tại một môi trường sống duy nhất và tốt nhất. Các bước thực hiện của thuật toán COA để giải một bài toán tối ưu điển hình được thực hiện như sau:

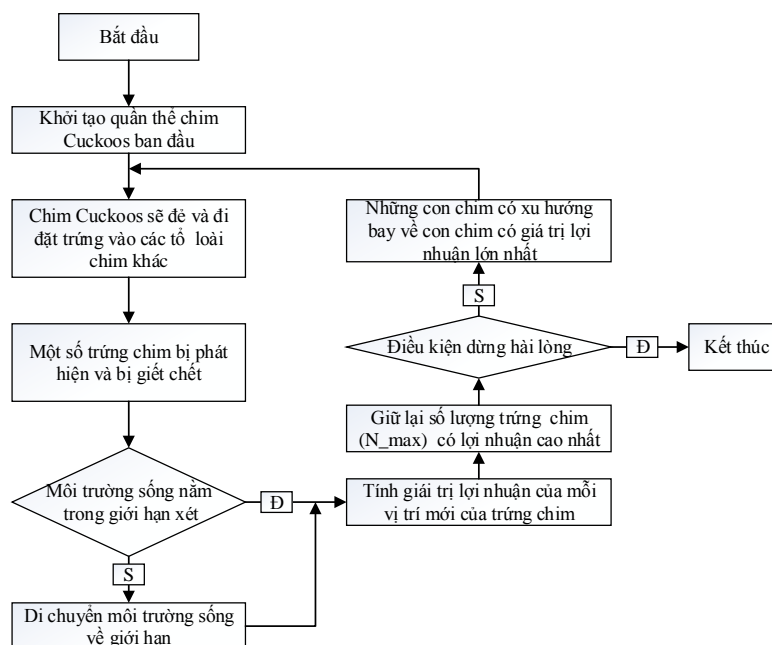
4.1.1 Khởi Tạo Quần Thể Cuckoo Ban Đầu

Để giải một bài toán tối ưu, việc cần thiết là phải đưa các biến về dưới dạng một mảng. Mảng này trong giải thuật GA nó được gọi là nhiễm sắc thể (Chromosome), trong PSO nó được gọi là vị trí bầy đàn (Particle Position), còn trong COA nó được gọi là môi trường sống (Habitat). Bài toán tối ưu hóa N chiều với N là số lượng các biến cần tối ưu hóa. Một môi trường sống (Habitat) là một mảng 1xN biểu thị cho môi trường sống của Cuckoo, được định nghĩa bởi:

$$\text{Môi trường sống} = [x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}] \quad (18)$$

Mỗi một tập hợp biến $(x_1, x_2, \dots, x_{Nvar})$ là các biến số thực. Giá trị hàm thích nghi của môi trường sống được cho bởi một hàm thích nghi fp như sau:

$$\text{Hàm thích nghi} = fp(x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}) \quad (19)$$



Hình 5. Lưu đồ giải thuật Cuckoo Optimization Algorithm

4.1.2 Quá trình đặt trứng của chim Cuckoo

Một thói quen khác của con chim Cuckoo là nó thường đặt trứng trong một bán kính nhất định gọi là bán kính đặt trứng ELR (Egg Laying Radius). Giá trị ELR này được cho bởi công thức sau:

$$ELR_i = \alpha * \frac{\text{numbercuckoo's eggs}}{\text{Total Number of egg}} (\text{var}_{hi} - \text{var}_{low}) \quad (20)$$

Với α là số nguyên dùng để điều khiển cực đại ELR, tỉ số giữa số lượng trứng của mỗi con chim Cuckoo và tổng số trứng của tất cả các con Cuckoo. var_{hi} và var_{low} là các giới hạn lớn nhất và nhỏ nhất của các biến cần tối ưu hóa.

4.1.3 Sự cân bằng sinh thái trong quần thể chim Cuckoo

Chim Cuckoo non sống sót sau một thời gian sẽ tiếp tục phát triển. Tuy nhiên do điều kiện cân bằng sinh thái, điều kiện môi trường sống và nguồn thức ăn có hạn nên chỉ có một số lượng tối đa N_{max} chim Cuckoo non ở những nơi tốt (có giá trị lợi nhuận cao) phát triển thành chim Cuckoo trưởng thành. Số lượng Cuckoo còn lại nằm ở những vùng xấu (giá trị lợi nhuận thấp) sẽ bị tiêu diệt.

4.1.4 Sự di chuyển tới môi trường sống tốt hơn của chim Cuckoo

Trong số những chim Cuckoo trưởng thành sẽ có một con sống trong môi trường tốt nhất (có giá trị lợi nhuận cao nhất). Những con Cuckoo trưởng thành khác sẽ di chuyển đến gần môi trường sống tốt nhất đó ở. Khi đến mùa sinh sản, những con chim này tiếp tục lặp lại chu trình đẻ trứng và đặt trứng. Cứ như thế, sau nhiều lần lặp đi lặp lại, quần thể Cuckoo sẽ hội tụ lại tại một môi trường sống tốt nhất.

4.2 Trình tự thực hiện COA trong bài toán cực đại lợi nhuận xã hội

Bước 1: Khởi động các biến và chọn thông số COA

$$X_{id} = [P_{g2} \dots P_{gNg}, P_{d2} \dots P_{dNd}, V_{g1} \dots V_{gNg}, N_{TCSC}, K_{TCSC}] \quad (21)$$

- Giá trị khởi động của X_{id} được xác định như sau:

$$X_{id} = X_{id}^{\min} + rand1 * (X_{id}^{\max} - X_{id}^{\min}) \quad (22)$$

- Một vị trí mục tiêu của chim cuckoo cũng được khởi tạo một cách ngẫu nhiên như sau:

$$GoalPoint = X_{id}^{\min} + rand1 * (X_{id}^{\max} - X_{id}^{\min}) \quad (23)$$

Với: rand1 là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng [0,1].

Bước 2: tính toán số lượng trứng cho chim cuckoo

$$Numbercuckoo's\ eggs = (MaxEggs - MinEggs) * rand2 + MinEggs \quad (24)$$

Bước 3: tính bán kính đặt trứng và cho chim Cuckoo đặt trứng

$$ELR_i^{\max} = \frac{numbercuckoo's\ eggs * (X_{id}^{\max} - X_{id}^{\min}) * RadiusCoeff}{Total\ Number\ of\ egg} \quad (25)$$

$$ELR_i = ELR_i^{\max} * rand3 \quad (26)$$

- Để đặt trứng ta cần tính một giá trị sai lệch vị trí do chim cuckoo di chuyển khi bay gây ra, giá trị đó được tính như sau:

$$Add_i = ((-1)^{rand4} * ELR_i * \cos(\text{in}(\text{angles})) + ELR_i * \sin(\text{angles})) \quad (27)$$

- Cập nhật vị trí cho các trứng chim Cuckoo theo như dưới đây

$$X_{id}^{(1)} = X_{id} + Add_i \quad (28)$$

Mỗi $X_{id}^{(1)}$ là một ứng viên cho lời giải của bài toán cực đại lợi nhuận xã hội, sau bước này chúng ta cập nhật lại các giá trị cận trên và cận dưới cho $X_{id}^{(1)}$ và quá trình đặt trứng đã hoàn tất.

Bước 4: Tiêu diệt các trứng nằm chung một tổ

- Vì mỗi tổ chỉ có một trứng chim có cơ hội sống sót do đó ở bước này ta kiểm tra các giá trị $X_{id}^{(1)}$ nào giống nhau thì tiêu diệt và chỉ giữ lại một ứng viên duy nhất. Việc làm này có mục đích làm giảm thời gian tính toán lặp lại không cần thiết.

Bước 5: Thực hiện phân bố công suất theo Newton-Raphson

Bước 6: đánh giá hàm thích nghi (F_{obj}) cho từng ứng cử viên X_{id}

$$F_f = F_{obj} - k_p \sum_{i=1}^{NB} (P_{gi} - P_{gi}^{\lim})^2 - k_q \sum_{i=1}^{NB} (Q_{gi} - Q_{gi}^{\lim})^2 - k_v \sum_{i=1}^{NB} (V_i - V_i^{\lim})^2 - k_s \sum_{i=1}^{NL} (S_{li} - S_{li}^{\max})^2 \quad (29)$$

Bước 7: Cân bằng sinh thái quần thể chim cuckoo

- Để đạt được trạng thái cân bằng sinh học trong quần thể chim cuckoo mới, ta giữ lại một số lượng chim cuckoo tối đa có thể tồn tại trong cùng một khoảng thời gian và tiêu diệt các con còn lại.

Bước 8: Di chuyển tới điểm mục tiêu

- Các con chim cuckoo còn lại sẽ bay tới gần điểm mục tiêu (GointPoint) theo công thức sau:

$$X_{id}^{(2)} = (Goalpoint - X_{id}^{(1)}) * rand5 * MotionCoeff + X_{id}^{(1)} \quad (30)$$

Bước 9: Cập nhật lại quần thể chim cuckoo

- Vị trí mới của quần thể chim cuckoo được cập nhật mới thành $X_{id}^{(2)}$

- Lưu giá trị của GoalPoint và Bestcost

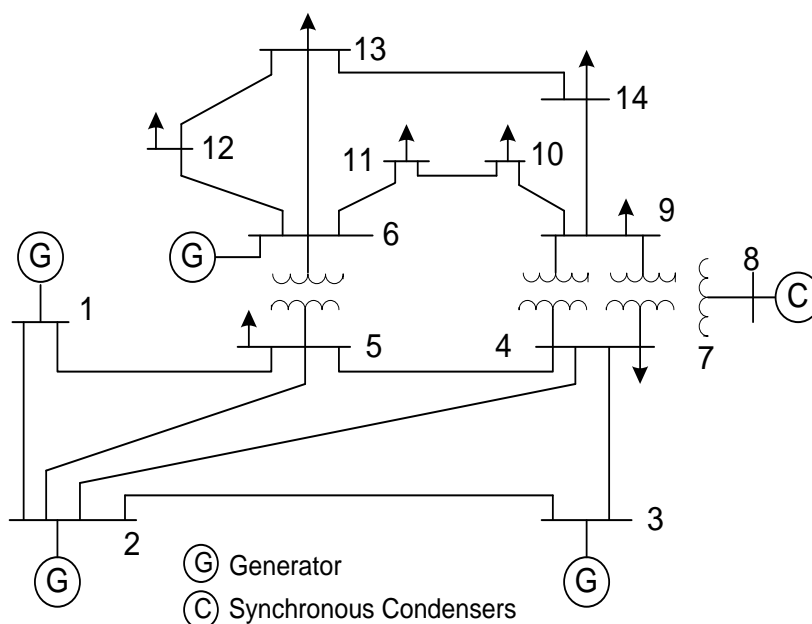
Bước 10: Kiểm tra điều kiện dừng

- Kiểm tra điều kiện dừng, nếu $Iter < Iter_{max}$ thì $Iter = Iter + 1$ và trở lại bước số 2. Ngược lại thì dừng chương trình.

5. MÔ PHỎNG TRÊN HỆ THỐNG ĐIỆN IEEE 14 NÚT

Hệ thống IEEE 14 nút [11] bao gồm 5 máy phát 20 đường dây như Hình 6. Các nút 1, 2, 3, 6 là các vị trí đặt các máy phát G1, G2, G3, G4. Các nút 4, 5, 9 đến 14 là vị trí của các phụ tải. Thông tin chi tiết về các thông số có thể tham khảo [13] và bảng phụ lục.

- *Thiết lập các thông số cho giải thuật COA*
- NumCuckoos: Số cá thể trong quần thể ban đầu = 4
- Itermax: Số bước lặp tối đa = 100
- MinEggs: Số lượng trứng tối thiểu = 4
- MaxEggs: Số lượng trứng tối đa = 7
- MotionCoeff: Hệ số điều khiển hướng tới điểm mục tiêu của chim cuckoo = 1.2
- MaxCuckoos: Số lượng cá thể chim Cuckoo có thể sống cùng một thời điểm xét trên điều kiện đảm bảo cân bằng sinh thái = 4
- RadiusCoeff: Hệ số bán kính điều khiển quá trình đặt trứng của chim Cuckoo = 18
- Npar: Số lượng biến tối ưu hóa, đây cũng chính là số lượng biến điều khiển = 21
- Các ràng buộc cận trên và dưới của các biến tối ưu.
- Hệ số phạt chung cho tất cả các ràng buộc cân bằng công suất, đường dây truyền tải, điện áp nút máy phát, chọn $K = 10^6$



Hình 6. Hệ thống IEEE 14 nút

Kết quả lợi nhuận xã hội, công suất phát của các máy phát và công suất tiêu thụ của khách hàng trong trường hợp có và không có TCSC được trình bày trong Bảng 1-4. Từ Bảng 1 có thể thấy rằng, tổng công suất phát của các máy phát và tổng công suất tiêu thụ của các nút tải (chữ in đậm) trong trường hợp sử dụng giải thuật COA là cao hơn so với giải thuật GA [6] và GWO [6]. Hơn nữa, sự phân bố công suất tiêu thụ tại các nút tải của giải thuật COA so với GA, GWO cũng khác nhau đã phản ánh được giá trị cực đại lợi nhuận xã hội của giải thuật đề xuất như thấy trong Bảng 3. Từ Bảng 3 có thể thấy rằng, lợi nhuận xã hội của giải thuật GA[6], GWO [6] tương ứng là 1501.81 (\$/h), 1551.12 (\$/h) trong khi COA là 1557.30 (\$/h). So sánh với giải thuật GA và GWO, lợi nhuận xã hội của giải thuật COA cao hơn 3.56% so với giải thuật GA và cao hơn 0.39% so với giải thuật GWO. Ngoài ra, có thể thấy từ Hình 6, Hình 7, công suất trên các nhánh và điện áp tại các nút khi sử dụng giải thuật COA cũng đều thỏa mãn các giới hạn cho phép.

Bảng 1: So sánh công suất phát và công suất tiêu thụ của giải thuật GA, GWO và COA trong trường hợp không có TCSC của hệ thống IEEE 14 nút.

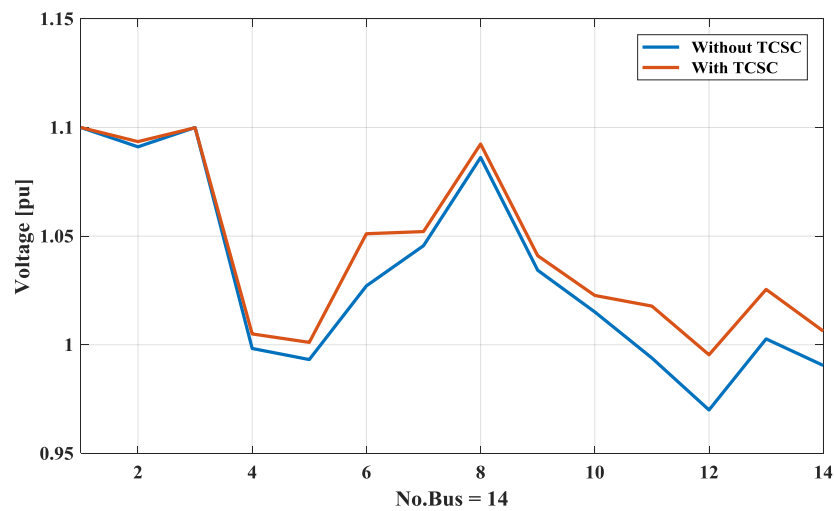
	Bus no	GA [6]			GWO [6]			COA		
		V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)
Máy phát	1	1.1	94.97	45.43	1.1	97.55	43.51	1.1	97.675	39.895
	2	1.089	100.0	56.58	1.089	100.0	54.57	1.091	100.00	59.818
	3	1.095	100.0	29.86	1.095	100.04	29.18	1.100	100.00	34.050
	6	1.035	52.08	7.22	1.035	50.31	15.29	1.027	52.176	10.825
	8	1.09	0	25.28	1.09	0	25.21	1.086	0	24.995
Tổng Tải			347.0	164.67		347.9	167.76		349.8	169.58
	4	0.997	110.9	53.75	0.998	110.9	53.73	0.998	110.11	53.330
	5	0.991	131.3	63.61	0.994	117.6	56.99	0.993	118.79	57.536
	9	1.039	5.01	2.43	1.04	5.02	2.43	1.045	0	0
	10	1.019	20.82	10.08	1.022	11.15	5.4	1.034	5.0015	2.4223
	11	1.01	18.19	8.81	1.0	29.92	14.49	1.015	13.897	6.7306
	12	0.998	18.51	8.97	0.978	31.35	15.18	0.993	28.420	13.764
	13	1.01	14.42	6.98	1.01	5.63	2.73	0.970	31.485	15.249
14	1.009	12.07	5.85	0.998	19.51	9.45	1.002	5.0000	2.4216	
Tổng			331.3	160.49		331.16	160.39		332.83	161.20

Bảng 2: So sánh công suất phát và công suất tiêu thụ của giải thuật GA, GWO và COA trong trường hợp có TCSC của hệ thống IEEE 14 nút.

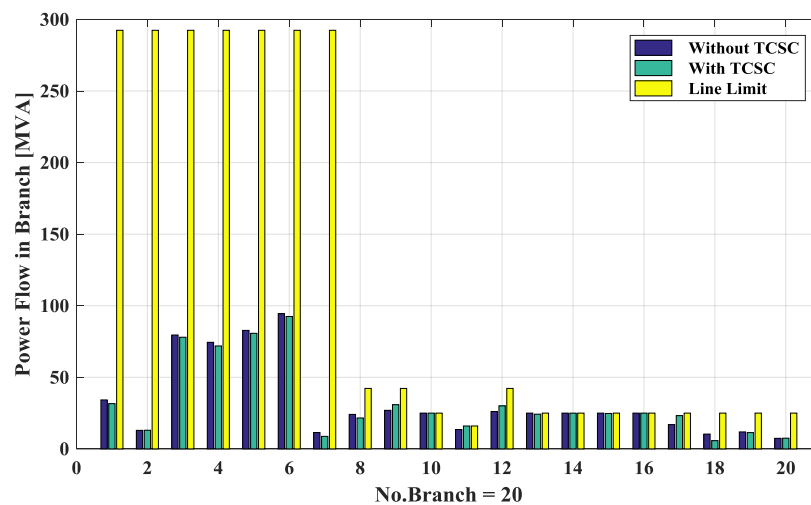
	Bus no	GA [6]			GWO [6]			COA		
		V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V (pu)	P (MW)	Q (Mvar)
Máy phát	1	1.1	98.37	53.65	1.1	93.83	44.26	1.1	94.903	32.391
	2	1.089	100.1	53.66	1.089	101.1	52.95	1.093	100.03	59.480
	3	1.095	100.0	30.1	1.095	101.1	28.42	1.099	100.00	28.517
	6	1.035	64.25	7.92	1.035	49.8	15.42	1.051	49.492	19.235
	8	1.09	0	25.49	1.09	0	26.0	1.092	0	24.987
Tổng Tải			362.8	170.82		344.8	344.87		344.43	164.61
	4	0.997	125.4	60.74	0.999	102.8	49.79	1.000	116.8	56.60
	5	0.995	129.1	62.54	0.994	118.7	57.71	0.997	117.6	56.97
	9	1.039	5.0	2.42	1.036	5.0	2.42	1.038	5.001	2.422
	10	1.019	20.12	9.74	1.019	14.46	7.0	1.019	22.14	10.72
	11	1.007	20.48	9.92	1.001	26.95	13.05	1.014	20.13	9.749
	12	0.995	27.99	13.55	0.981	27.71	13.42	1.014	22.03	10.67
	13	1.012	10.5	5.09	1.002	8.57	4.15	1.019	11.45	5.546
14	1.016	7.69	3.72	0.985	24.14	11.69	0.996	22.85	11.06	
Tổng			346.3	167.74		328.37	159.04		328.1	158.88

Bảng 3: So sánh lợi nhuận xã hội của giải thuật COA với giải thuật GA[6] và GWO[6]

	Không có TCSC			Có TCSC		
	GA [31]	GWO [31]	COA	GA [31]	GWO [31]	COA
Máy phát	1408.93	1415.50	1424.87	1494.77	1401.62	1396.48
Tải	2910.75	2966.62	2982.17	3014.85	2969.66	3022.30
Lợi nhuận xã hội	1501.81	1551.12	1557.30	1520.08	1568.03	1581.21
Vị trí TCSC				Dây 1-5	Dây 6-13	Dây 7-9
Dung lượng TCSC (pu)				-0.2315	-0.49	-0.693



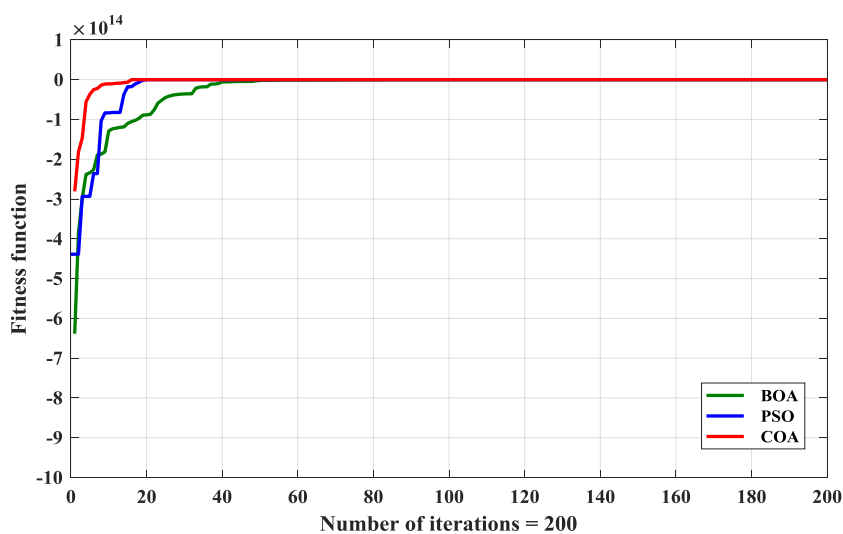
Hình 6: Đồ thị điện áp trong trường hợp có và không có TCSC



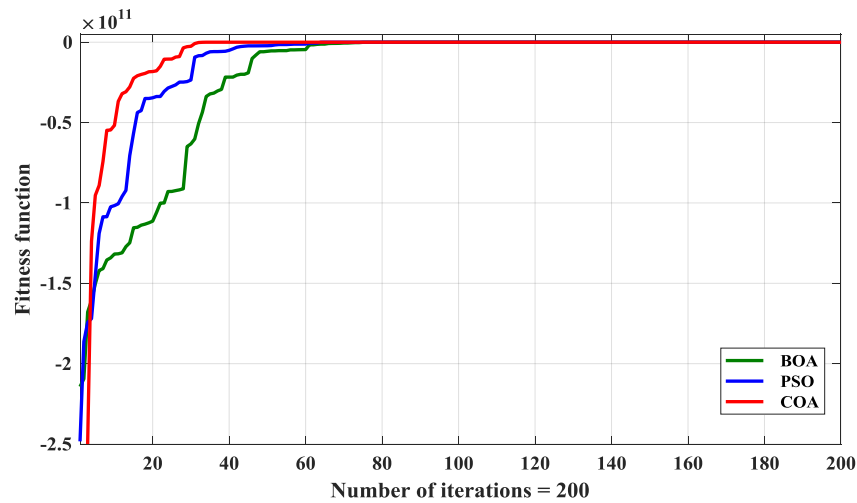
Hình 7: Đồ thị công suất nhánh trong trường hợp có và không có TCSC

Bảng 4: Kết quả điều độ công suất máy phát và điều độ tải trường hợp có và không có TCSC sử dụng giải thuật COA

		Không có TCSC			Có TCSC		
	Bus numbers	Voltage (pu)	Real power (MW)	Reactive power (Mvar)	Voltage (pu)	Real power (MW)	Reactive power (Mvar)
Máy phát	1	1.1	97.6759	39.8956	1.1	94.9034	32.3914
	2	1.0911	100.0001	59.8188	1.0935	100.0353	59.4800
	3	1.1000	100.0003	34.0500	1.0999	100.0024	28.5171
	6	1.0271	52.1765	10.8259	1.0511	49.4929	19.2359
	8	1.0862	0	24.9951	1.0924	0	24.9875
Tổng Tải			349.8529	169.5854		344.4340	164.6120
	4	0.9983	110.1130	53.3301	1.0050	103.1062	49.9366
	5	0.9932	118.7988	57.5369	1.0011	115.3352	55.8594
	7	1.0456	0	0	1.0521	0	0
	9	1.0343	5.0015	2.4223	1.0410	5.0037	2.4234
	10	1.0151	13.8970	6.7306	1.0227	22.2554	10.7788
	11	0.9939	28.4203	13.7646	1.0178	19.7659	9.5731
	12	0.9700	31.4859	15.2493	0.9954	30.8817	14.9567
13	1.0027	5.0000	2.4216	1.0255	5.0174	2.4301	
14	0.9905	20.1220	9.7455	1.0063	26.6867	12.9250	
Tổng			332.8384	161.2010		328.0524	158.8830



Hình 8: So sánh tốc độ hội tụ của giải thuật COA với giải thuật PSO và BOA trong trường hợp không có TCSC



Hình 9: So sánh tốc độ hội tụ của giải thuật COA với giải thuật PSO và BOA trong trường hợp có TCSC

Công suất phát và công suất tiêu thụ tại các nút trong trường hợp có TCSC của giải thuật COA cũng được trình bày trong Bảng 2. TCSC đã phân bố lại luồng công suất trên các đường dây, nâng cao lợi nhuận xã hội. Vị trí tối ưu của TCSC là tại đường dây 7-9 với dung lượng $X_{TCSC} = -0.693pu$ khi sử dụng giải thuật COA. Từ Hình 2, Hình 3 có thể thấy rằng, dòng công suất trên các nhánh trong hệ thống được phân bố lại cân bằng hơn, điện áp tại các nút cũng đều nằm trong giới hạn sau khi lắp đặt TCSC. Lợi nhuận xã hội của giải thuật GA, GWO và COA khi có TCSC cũng được trình bày trong Bảng 3 (Chữ in đậm). Từ bảng này có thể thấy rằng, lợi nhuận xã hội khi có TCSC của giải thuật COA cao hơn 3.86% so với giải thuật GA khi có TCSC và cao hơn 0.83% so với giải thuật GWO khi có TCSC. Kết quả điều độ công suất máy phát và điều độ tải trường hợp có và không có TCSC sử dụng giải thuật COA được trình bày trong Bảng 4. Từ bảng này có thể thấy rằng, tổng công suất phát và tổng công suất tiêu thụ tại các nút trong trường hợp có TCSC là nhỏ hơn một ít so với trường hợp không có TCSC, tuy nhiên lợi nhuận xã hội trong trường hợp có TCSC lại cao hơn so với không có TCSC như chỉ ra trong Bảng 3. Điều này cho thấy rằng TCSC đã nâng cao lợi nhuận xã hội. TCSC đã phân bố lại luồng công suất, nâng cao khả năng truyền tải, do đó tại các nút tải mà có hệ số lợi nhuận cao có xu hướng tăng công suất tiêu thụ như thấy trong Bảng 4 (nút 10, nút 14), trong khi tại các nút tải mà có hệ số lợi nhuận thấp có xu hướng giảm công suất tiêu thụ như thấy trong Bảng 4 (nút 11, nút 4), vì vậy lợi nhuận khách hàng được tăng lên và kết quả lợi nhuận xã hội trong trường hợp có TCSC cao hơn 1.51% so với khi không có TCSC. Ngoài ra, để cho thấy được khả năng hội tụ của giải thuật COA so với các giải thuật khác, bài báo đã chạy giải thuật Particle Swarm Optimization (PSO) và Butterfly Optimization Algorithm (BOA) để so sánh. Từ Hình 8, Hình 9 có thể thấy rằng, COA có khả năng hội tụ nhanh so với PSO và BOA. Điều này cho thấy giải thuật COA có khả năng tìm vị trí và dung lượng hợp lý của TCSC để nâng cao lợi nhuận xã hội trong thị trường điện cũng như khả năng hội tụ của giải thuật COA đề xuất.

6. KẾT LUẬN

Sự xuất hiện thị trường điện đã mang lại nhiều lợi nhuận cho các thành viên tham gia thị trường, tuy nhiên nó cũng tạo ra nhiều thách thức mới cho người vận hành trong việc đảm bảo an ninh hệ thống. Để giải quyết vấn đề này mà không cần phải xây dựng đường dây mới, việc sử dụng thiết bị TCSC là một trong những giải pháp thay thế hiệu quả. Bài báo này đã trình bày chi tiết cách thực hiện giải thuật COA để giải quyết bài toán tối ưu với nhiều ràng buộc phương trình và bất phương trình để cực đại lợi nhuận xã hội thông qua tối ưu lắp đặt TCSC. Từ kết quả phân tích, có thể thấy rằng lợi nhuận xã hội phụ thuộc vào điều độ tối ưu của các công ty phát điện, nhu cầu sử dụng điện của khách hàng và khả năng truyền tải của hệ thống. Những kết quả mô phỏng từ phương pháp đề nghị được so sánh với giải thuật GA và GWO đã cho thấy COA cũng là một trong những phương pháp hữu ích để tối ưu lắp đặt TCSC để cực đại lợi nhuận xã hội.

Appendix A

Table A1: Generator data for IEEE 14-bus test system

Gen no	Bus	P (MW)		Q (MVAR)		Generator cost factor		
		Max	Min	Max	Min	a(\$/MW ² h)	b(\$/MWh)	c(\$/h)
G1	1	100	20	50	-40	0.0245	1	0
G2	2	500	100	60	-40	0.0351	1	0
G3	3	500	100	40	-40	0.0389	1	0
G4	6	100	20	24	-6	0.0372	1	0
G5	8	-	-	26	-6	-	-	0

$$C_{gm}(P_{gm}) = a_m P_{gm}^2 + b_m P_{gm} + c_m$$

Table A2: Load data for IEEE 14-bus test system

Load no	Bus	P (MW)		Q (MVAR)		Customer profit factor		
		Max	Min	Max	Min	a(\$/MW ² h)	b(\$/MWh)	c(\$/h)
L1	4	200	50	200	-200	-0.015	10	0
L2	5	200	50	200	-200	-0.015	10	0
L3	9	100	5	200	-200	-0.010	5	0
L4	10	100	5	200	-200	-0.015	10	0
L5	11	100	5	200	-200	-0.015	10	0
L6	12	100	5	200	-200	-0.018	12	0
L7	13	100	5	200	-200	-0.018	12	0
L8	14	100	5	200	-200	-0.018	12	0

$$B_{dn}(P_{dn}) = a_n P_{dn}^2 + b_n P_{dn} + c_n$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hingorani, N.G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. Proc. IEEE. 1988, 76, 481-482.
- [2] Lin Whei-Min, Chen shi-Jaw and Su Yuh-Sheng., An application of interior-point based OPF for system expansion with FACTS devices in a deregulated environment, in Proc. IEEE conference (0-7803-6338-8/00/\$10) 2000
- [3] Yu Zuwei and Lusan D., Optimal placement of FACTS devices in deregulated systems considering line losses, Electrical power and energy systems, vol. 26 (2004) 813-819.
- [4] Nabavi SMH, Kazemi A and Masoum MAS. Social welfare maximization with fuzzy based genetic algorithm by TCSC and SSSC in double sided auction market. Scientia Iranica 2012; 19: 745–758.

- [5] Seyed Mohammad Hosseini Nabavi, Nazanin Alsadat Hosseinipoor, Somayeh Hajforoosh. Social Welfare Maximization by Optimal Locating and Sizing of TCSC for Congestion Management in Deregulated PowerMarkets. International Journal of Computer Applications. (2010) 0975 – 8887
- [6] Saswati Kumari Behera.; Nalin Kant Mohanty. Social welfare maximization with thyristor-controlled series compensator using grey wolf optimization algorithm. International Journal of Electrical Engineering Education, DOI: 10.1177/0020720918822754, (2019) 1-14
- [7] Rajabioun R. Cuckoo optimization algorithm. Applied Soft Computing 11 (7) (2011).
- [8] Yang, X.S. Deb, S. Engineering optimisation by cuckoo search. Int. J. Math. Model. Num. Optim. 2010, 1, 330-343.
- [9] Nguyen Tu Le Anh and Dieu Ngoc Vo. Cuckoo optimization algorithm for optimal power flow. Springer International Publishing Switzerland. Vol 3, pp. 319-337. 2015.
- [10] Duong Thanh Long and Cao Văn Tuấn. Optimal power flow with TCSC using Cuckoo algorithm. Journal of Science and Technology. Vol. 11, 2016.
- [11] Thanh Long Duong, Yao Jian Gang, Truong Viet Anh. A new method for secured optimal power flow under normal and network contingencies via optimal location of TCSC. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 52, (2013) 68–80
- [12] Shrestha GB and Feng W. Effect of series compensation on spot price power markets. Electric Power Energy Syst 2005; 27: 428–436.
- [13] Zimmermann RD, Murillo-Sa´ nchez CE and Thomas RJ. MATPOWER, a MatlabVR power system simulation package, User’s Manual, Version 3.2, 2007.

Ngày nhận bài:07/03/2019

Ngày chấp nhận đăng:22/11/2019