

# TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ DUNG LƯỢNG THIẾT BỊ D-STATCOM KHẮC PHỤC HIỆN TƯỢNG SỤT GIẢM ĐIỆN ÁP NGẮN HẠN TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI SỬ DỤNG GIẢI THUẬT TỐI ƯU BẦY ĐÀN

OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF D-STATCOM FOR MITIGATING SHORT-TERM VOLTAGE SAGS IN DISTRIBUTION NETWORKS USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Nguyễn Văn Minh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Văn Lộc<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2025.323>

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất giải thuật tối ưu vị trí và dung lượng của thiết bị D-Statcom nhằm khắc phục hiện tượng sụt giảm điện áp ngắn hạn (SANH) do sự cố ngắn mạch ba pha trong lưới điện phân phối. Giải thuật tối ưu bầy đàn (PSO) được áp dụng để xác định cấu hình lắp đặt D-Statcom sao cho tổng độ lệch điện áp tại các nút được giảm thiểu, đồng thời đảm bảo chất lượng điện áp theo tiêu chuẩn Việt Nam. Mô hình lưới phân phối 16 nút được sử dụng để kiểm chứng hiệu quả thuật toán, với các kịch bản ngắn mạch tại các nút khác nhau và các giá trị tổng trở sự cố khác nhau. Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink R2021b cho thấy, so với phương pháp di truyền (GA), thuật toán PSO giúp cải thiện đáng kể số nút có điện áp duy trì trên 0,9pu và giảm giá trị hàm mục tiêu  $F_{min}$  từ 1,0796pu xuống còn 0,7719pu trong trường hợp điển hình ( $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu) tại nút 13). Qua đó, nghiên cứu khẳng định khả năng ứng dụng của PSO trong bài toán tối ưu thiết bị bù D-Statcom, góp phần nâng cao độ ổn định điện áp cho lưới điện phân phối.

**Từ khóa:** D-Statcom; sụt giảm điện áp ngắn hạn (SANH); ngắn mạch ba pha; giải thuật tối ưu bầy đàn (PSO); FACTS; chất lượng điện năng.

## ABSTRACT

This paper proposes an optimization method for determining the optimal location and capacity of the D-Statcom device to mitigate short-term voltage sags (SANH) caused by three-phase short-circuit faults in distribution networks. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is employed to configure the installation of D-Statcom so as to minimize the total voltage deviation at network buses, while ensuring voltage quality in compliance with Vietnamese standards. A 16-bus distribution network model is used to validate the algorithm's effectiveness under various short-circuit scenarios at different buses with different fault impedance values. Simulation results in MATLAB/Simulink R2021b show that, compared to the Genetic Algorithm (GA), PSO significantly improves the number of buses maintaining voltage above 0.9pu and reduces the objective function value  $F_{min}$  from 1.0796pu to 0.7719pu in the representative case ( $Z_f = 0.25 + j0.16$  (pu) at bus 13). The study thus confirms the potential of applying PSO in optimizing D-Statcom compensation, contributing to enhanced voltage stability in distribution networks.

**Keywords:** D-Statcom; short-term voltage sag (SANH); three-phase short-circuit; Particle Swarm Optimization (PSO); FACTS; power quality.

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>2</sup>Trường Cao đẳng Công đồng Hậu Giang

\*Email: minhnv@vlute.edu.vn

Ngày nhận bài: 11/7/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

**KÝ HIỆU**

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
P	W	Công suất tác dụng
Q	VAr	Công suất phản kháng
S	VA	Công suất biểu kiến

**CHỮ VIẾT TẮT**

SANH	Sụt giảm điện áp ngắn hạn
CLĐN	Chất lượng điện năng
FACTS	Flexible AC Transmission System (Hệ thống truyền tải điện xoay chiều linh hoạt)
CPD	Custom Power Device (Thiết bị tùy biến công suất)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Viện Kỹ thuật điện - điện tử Mỹ)
PSO	Particle Swarm Optimization (Giải thuật tối ưu bầy đàn)
GA	Genetic Algorithm (Giải thuật di truyền)
DE	Differential Evolution (Giải thuật tiến hóa vi phân)
DES	Distributed energy storage (Lưu trữ năng lượng phân tán)
VSC	Voltage Source Converter (Bộ biến đổi nguồn áp)
PLL	Phase Locked Loop (Vòng khóa pha)
pu	Per unit system (Hệ đơn vị tương đối)

**1. GIỚI THIỆU**

Theo IEEE1159, sụt giảm điện áp ngắn hạn (SANH) là hiện tượng chất lượng điện năng (CLĐN) mà trong đó trị số hiệu dụng thời gian dưới 1 phút [1]. Nhiều nguyên nhân gây ra hiện tượng SANH trong lưới điện phân phối: Sự cố ngắn mạch trong lưới điện; khởi động các tải lớn; Đóng cắt hoặc chuyển mạch tải; Dao động tần số và công suất phản kháng,... Trong đó sự kiện ngắn mạch là nguyên nhân dẫn đến 90% các sự kiện SANH trên hệ thống điện [10].

Trước đây, có nhiều giải pháp khắc phục hiện tượng SANH trên lưới điện tùy thuộc hiện tượng CLĐN, loại phụ tải nhạy cảm. Ứng dụng các thiết bị như FACTS, CPD càng phổ biến vì những ưu điểm vượt trội so với các giải pháp khác, nhất là khả năng phản ứng nhanh, rất phù hợp để khắc phục các hiện tượng CLĐN diễn biến nhanh xuất hiện ngày càng nhiều trên hệ thống điện. Ưu điểm này là vì các thiết bị FACTS hay CPD có sự hỗ trợ của các linh kiện điện

tử công suất đóng vai trò như các công tắc bán dẫn. Bên cạnh đó, các tính năng nâng cao chất lượng vận hành cho hệ thống điện cũng đồng thời được đảm bảo như nâng cao khả năng tải, cải thiện độ tin cậy của lưới điện [2].

Hệ thống truyền tải điện xoay chiều linh hoạt (FACTS) ứng dụng cho mạng truyền tải nhưng hiện nay cũng đã được áp dụng rộng rãi trong hệ thống phân phối. Trong các lưới phân phối hiện đại, hiện tượng SANH do ngắn mạch gây ra các vấn đề nghiêm trọng về chất lượng điện áp. D-Statcom, một thiết bị FACTS tiêu biểu, là giải pháp hiệu quả trong việc bù công suất phản kháng và nâng cao ổn định điện áp.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu áp dụng các thuật toán tối ưu như thuật toán di truyền (GA), bầy kiến (ACO), tiến hóa vi phân (DE) để xác định vị trí và dung lượng D-Statcom trong lưới điện phân phối, nhưng phần lớn các nghiên cứu này chưa khai thác đầy đủ khả năng hội tụ nhanh, cấu trúc đơn giản và khả năng tìm kiếm toàn cục mạnh mẽ của thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO). Bên cạnh đó, nhiều công trình trước chỉ tập trung trên các lưới IEEE tiêu chuẩn mà chưa hiệu chỉnh mô hình lưới phù hợp với đặc điểm lưới phân phối Việt Nam, nơi có nhiều sự cố và sự biến thiên phụ tải đáng kể. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng PSO cho bài toán tối ưu D-Statcom trên lưới phân phối phù hợp với thực tế Việt Nam vẫn còn là một khoảng trống cần được nghiên cứu sâu hơn.

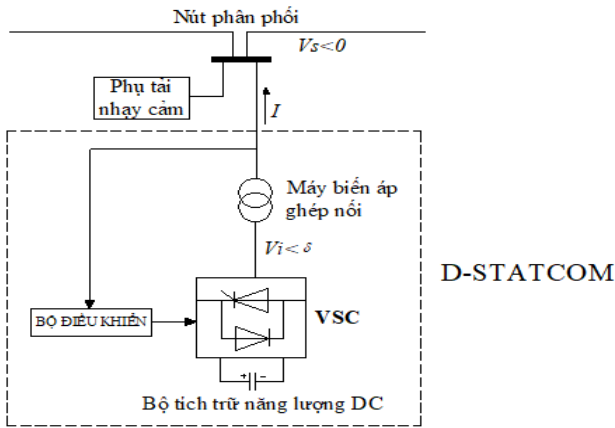
Bài báo này đóng góp một tiếp cận mới trong việc ứng dụng thuật toán PSO để tối ưu đồng thời vị trí và dung lượng D-Statcom trên lưới phân phối 16 nút, có hiệu chỉnh đặc điểm vận hành của lưới điện Việt Nam. So với các phương pháp trước, PSO giúp cải thiện hiệu quả bù áp, giảm độ lệch điện áp và tăng số lượng nút đạt tiêu chuẩn điện áp sau sự cố. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo quan trọng cho việc thiết kế và quy hoạch thiết bị bù trên lưới phân phối hiện đại.

**2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT**

**2.1. Giới thiệu về bù tĩnh D-Statcom**

D-Statcom là thiết bị điện tử công suất điều khiển dòng điện dựa trên bộ chuyển đổi nguồn áp (VSC) có khả năng duy trì mức điện áp hệ thống thông qua trao đổi công suất tác dụng và công suất phản kháng với hệ thống xoay chiều với sự trợ giúp của bộ lưu trữ năng lượng DC (DES- Distributed energy storage), máy biến áp ghép nối và bộ điều khiển [3].

Thiết bị thường được kết nối giữa lưới điện phân phối và tải cần bảo vệ, tại nút phân phối (PCC). Hình 1 thể hiện các khối cơ bản của thiết bị.



Hình 1. Sơ đồ biểu diễn D-Statcom

Thông qua việc chuyển đổi điện áp DC trong DES với sự trợ giúp của VSC, điện áp thanh cái cung cấp,  $V_s$  và điện áp đầu ra D-Statcom,  $V_i$  có các giá trị tức thời sau [2]:

$$\begin{aligned} V_{sa} &= \sqrt{2}V_s \sin \omega t \\ V_{sb} &= \sqrt{2}V_s \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{sc} &= \sqrt{2}V_s \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{ia} &= \frac{\sqrt{3}}{2} n m_a V_D \sin(\omega t + \delta) \\ V_{ib} &= \frac{\sqrt{3}}{2} n m_b V_D \sin(\omega t + \delta - 2\pi/3) \\ V_{ic} &= \frac{\sqrt{3}}{2} n m_c V_D \sin(\omega t + \delta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:  $V_D$ : Điện áp một chiều trên tụ;  $n$ : Tỷ số vòng dây của máy biến áp ghép nối;  $m_a, m_b, m_c$ : Tỷ số điều chế biên độ xung pha A, pha B, pha C;  $\delta$ : Độ lệch góc pha giữa điện áp lưới và điện áp VSC.

Tần số của điện áp đầu ra 3 pha của VSC cùng với góc pha của nó chỉ phụ thuộc vào kiểu chuyển mạch của công tắc bán dẫn được sử dụng. Điều này được xác định bởi thuật toán điều khiển.

Việc trao đổi công suất tác dụng ( $P$ ) và công suất phản kháng ( $Q$ ) diễn ra giữa hệ thống và D-Statcom có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi cường độ và pha của điện áp đầu ra của D-Statcom và điện áp AC của nút cung cấp như mô tả trong công thức (3), (4) và (5) [3]:

Công suất tác dụng:

$$P = \frac{V_{vsc} V_{bus} \sin \delta}{X_L} \quad (3)$$

Công suất phản kháng:

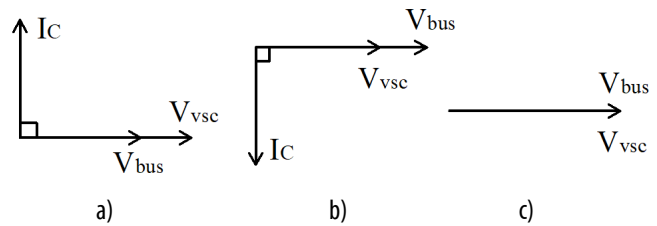
$$Q = \frac{V_{bus}^2}{X_L} - \frac{V_{vsc} V_{bus} \cos \delta}{X_L} \quad (4)$$

Độ lệch góc pha giữa điện áp lưới và điện áp VSC:

$$\delta = (\theta_{bus} - \theta_{vsc}) \quad (5)$$

Điện áp xoay chiều được chuyển đổi (đầu ra VSC) được ghép vào lưới điện thông qua điện kháng của biến áp ghép nối. D-Statcom được vận hành ở ba chế độ [12]:

- Chế độ 1: Nếu điện áp D-Statcom ( $V_{VSC}$ ) lớn hơn điện áp lưới ( $V_{bus}$ ), D-Statcom cung cấp công suất phản kháng cho lưới nên chế độ này được gọi là chế độ điện dung (hình 2a).

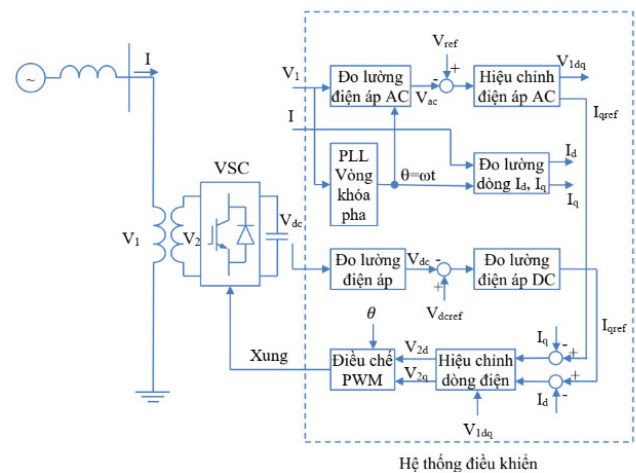


Hình 2. Chế độ hoạt động của D-Statcom

- Chế độ 2: Nếu điện áp D-Statcom ( $V_{VSC}$ ) nhỏ hơn điện áp lưới ( $V_{bus}$ ), D-Statcom hấp thụ công suất phản kháng nên chế độ này gọi là chế độ điện cảm (hình 2b).

- Chế độ 3: Nếu điện áp lưới ( $V_{bus}$ ) bằng điện áp D-Statcom ( $V_{VSC}$ ) thì không có sự trao đổi công suất phản kháng (hình 2c).

### 2.2. Hệ thống điều khiển D-Statcom



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển của Statcom

Hình 3 thể hiện sơ đồ đơn tuyến của Statcom và sơ đồ khối hệ thống điều khiển của nó. Hệ thống điều khiển bao gồm:

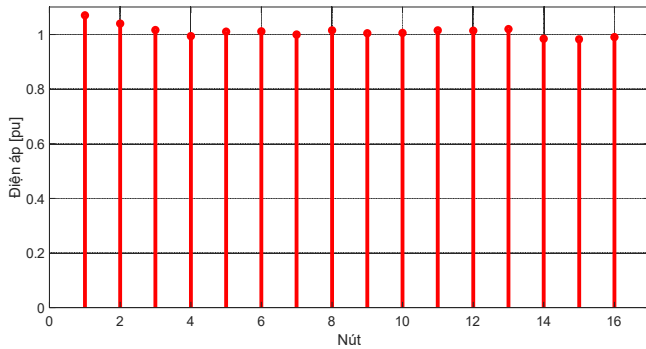
- Một vòng lặp khóa pha (PLL) đồng bộ hóa trên các thành phần thứ tự dương của điện áp ba pha sơ cấp  $V_1$ . Đầu ra của PLL (góc  $\theta = \omega t$ ) được sử dụng để tính toán các thành phần dọc trục và ngang trục của điện áp và dòng điện ba pha AC ( $I_d, I_q$ ).

- Các thành phần đo lường đo các thành phần  $p$  và  $q$  của điện áp và dòng điện thứ tự dương AC được điều

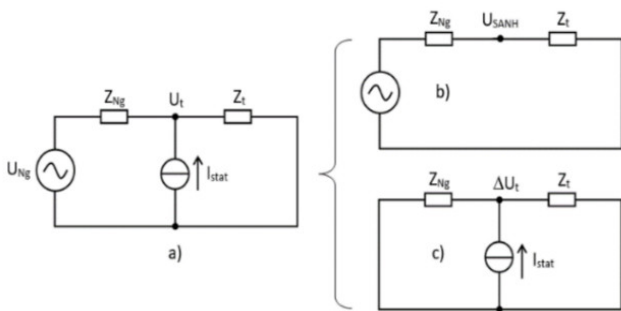


Matlab R2021b theo từng trường hợp được phân tích ở mục 4.

Để khắc phục SANH trên toàn bộ lưới điện, bài báo xem xét việc đặt một thiết bị D-statcom. Về mặt lý thuyết, ứng với mỗi vị trí đặt D-Statcom, công suất D-Statcom được tính theo phương pháp xếp chồng [5].



Hình 6. Phân bố điện áp nút trong chế độ làm việc bình thường.



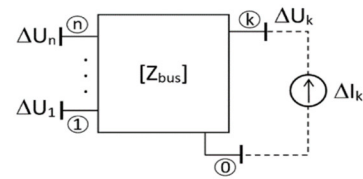
Hình 7. Sơ đồ lưới điện 1 nút phụ tải có đặt D-Statcom

Trong trường hợp đơn giản, hình 7a thể hiện sơ đồ mô tả lưới điện một nguồn và có bù điện áp bởi D-Statcom tại nút phụ tải. Nhờ có D-Statcom cung cấp dòng  $I_{stat}$  vào lưới, điện áp tại nút tải (cũng là nút kết nối D-Statcom) có thể được bù đến giá trị  $U_t$ . Hình 7b mô tả lưới điện chưa xét D-Statcom, khi đó điện áp tại nút tải là  $U_{SANH}$ . Hình 7c thể hiện sơ đồ lưới điện không xét nguồn lưới, khi đó chỉ xét mạch bù điện áp  $\Delta U_t$  ( $\Delta U_t = U_t - U_{SANH}$ ) nhờ D-Statcom cung cấp dòng  $I_{stat}$ . Để tính trị số dòng điện  $I_{stat}$ , có thể xem mạch hình 7a là xếp chồng của mạch hình 7b và mạch hình 7c [6]:

$$I_{stat} = \frac{\Delta U_t}{Z_{th}} = \frac{U_t - U_{SANH}}{Z_{th}} \quad (6)$$

Trong đó:  $Z_{th}$ : Tổng trở Thevenin của lưới điện nhìn từ nút tải;  $U_t$ : Điện áp nút tải sau khi đặt D-Statcom;  $Z_{Ng}$ : Tổng trở nguồn điện;  $Z_t$ : Tổng trở phụ tải.

Thực tế, đối với lưới điện như lưới phân phối 16 nút được mô phỏng trong bài báo thì việc tính  $I_{stat}$  cũng theo nguyên tắc xếp chồng dựa trên định lý Thevenin đối với ma trận tổng trở nút như sau [6]:



Hình 8. Lưới điện mô tả theo tổng trở nút và xét một D-Statcom nối vào nút k

Giả sử trường hợp lưới chưa ngắn mạch, chưa xét D-Statcom thì phương trình điện áp nút như sau:

$$[U^0] = [Z_{bus}] \times [I^0] \quad (7)$$

Trong đó:  $[U^0]$ : Ma trận điện áp nút ở trạng thái ban đầu;  $[I^0]$ : Ma trận dòng điện cung cấp vào các nút ở trạng thái ban đầu;  $[Z_{bus}]$ : Ma trận tổng trở nút của lưới điện.  $[Z_{bus}]$  được tính từ ma trận tổng dẫn nút:  $[Z_{bus}] = [Y_{bus}]^{-1}$ .

Khi có xét D-Statcom, tương tự như khi cung cấp dòng  $\Delta I_k = I_{stat}$  vào nút k thì phương trình điện áp nút của lưới điện được tính theo định lý Thevenin như sau [6]:

$$\begin{aligned} [U] &= [Z_{bus}] \times ([I^0] + [\Delta I]) \\ &= [Z_{bus}] \times [I^0] + [Z_{bus}] \times [\Delta I] \\ &= [U^0] + [\Delta U] \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó:  $[\Delta U] = [Z_{bus}] \times [\Delta I]$

Tương tự:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \dots \\ \Delta U_k \\ \dots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = [Z_{bus}] \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta I_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1k} \\ \dots \\ Z_{kk} \\ \dots \\ Z_{nk} \end{bmatrix} \times I_{stat} \quad (9)$$

Trong đó:  $\Delta U_i$ : Độ tăng điện áp nút i,  $i = 1, n$  khi cung cấp thêm dòng  $\Delta I_k$  vào nút k ( $I_{stat}$ ).

Vì chỉ xét một D-Statcom trên hệ thống nên ma trận dòng cung cấp vào các nút  $[\Delta I]$  chỉ có phần tử  $\Delta I_k \neq 0$ , còn các phần tử khác đều bằng 0.

Giả thiết điện áp tại nút k nối với D-statcom sẽ tăng từ  $U_k^0 = U_{SANH.k}$  lên đến  $U_k = 1$ . Dòng điện D-Statcom tương ứng được tính như sau [6]:

$$I_{stat} = \Delta I_k = \frac{\Delta U_k}{Z_{kk}} = \frac{1}{Z_{kk}} \times (1 - U_{SANH.k}) \quad (10)$$

Công suất của D-Statcom [6]:

$$S_{stat.k} = U_k \times I_{stat} \quad (11)$$

Độ tăng điện áp tại các nút i ( $i = 1-n; i \neq k$ ) khi lưới có D-Statcom [6]:

$$U_i = \Delta U_i + U_i^0 = Z_{ik} \times I_{stat} + U_{SANH,i} \quad (12)$$

Tất cả các tính toán như mô tả lưới  $Z_{bus}$ , tính toán công suất  $S_{stat}$  của D-Statcom và kiểm tra độ lệch điện áp khi có lắp đặt D-Statcom trên lưới được mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink.

### 3.3. Hàm mục tiêu của bài toán tối ưu

Hàm mục tiêu là tối thiểu hóa chỉ tiêu tổng độ lệch điện áp lưới điện trong thời gian tồn tại ngắn mạch hoặc SANH. Chỉ tiêu này cũng tương tự chỉ tiêu năng lượng SANH bị mất [7].

$$f = \Delta U = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{dm} - U_i)^2} \Rightarrow \text{Min} \quad (13)$$

Trong đó:  $U_i$ : Điện áp các nút lưới điện  $i = 1 \div n$ .  $n$  số nút lưới điện  $n = 16$ .

$U_{dm}$ : Điện áp định mức của lưới điện. Tính toán theo đơn vị tương đối,  $U_{dm} = 1pu$ .

Điều kiện ràng buộc:

$$S_{DS} \leq S_{DS-max} \quad (14)$$

$S_{DS-max}$ : Giới hạn công suất lớn nhất của D-Statcom. Trong đề xuất nghiên cứu này, chọn  $S_{DS-max} = 3pu$ .

### 3.4. Giới thiệu giải thuật tối ưu bầy đàn

Tối ưu hóa bầy đàn (PSO) đầu tiên được giới thiệu bởi Kennedy và Eberhart. Kỹ thuật này dựa trên việc mô phỏng hành vi xã hội giữa các cá thể "bay" qua một không gian tìm kiếm đa chiều, trong đó mỗi cá thể đại diện cho một giao điểm (intersection) của tất cả các chiều tìm kiếm [8].

Trong PSO, mỗi cá thể có một giá trị thích nghi, được đánh giá bằng hàm đo độ thích nghi và một vận tốc để định hướng việc bay để tìm thức ăn của nó.

Thuật toán PSO đầu tiên sẽ khởi tạo một nhóm cá thể ngẫu nhiên, sau đó cập nhật các cá thể (lần lặp). Trong mỗi cá thể được cập nhật bởi hai giá trị:  $P_{best}$  là nghiệm tốt nhất đạt được cho tới thời điểm hiện tại;  $G_{best}$  là nghiệm tốt nhất mà cá thể lân cận cá thể này đạt được cho tới thời điểm hiện tại. Quá trình cập nhật các cá thể dựa trên hai công thức sau [9]:

$$V_{i,m}^{(k+1)} = w * v_{i,m}^{(k)} + c_1 * r_1 * (P_{best_{i,m}} - x_{i,m}^{(k)}) + c_2 * r_2 * (G_{best_{i,m}} - x_{i,m}^{(k)}) \quad (15)$$

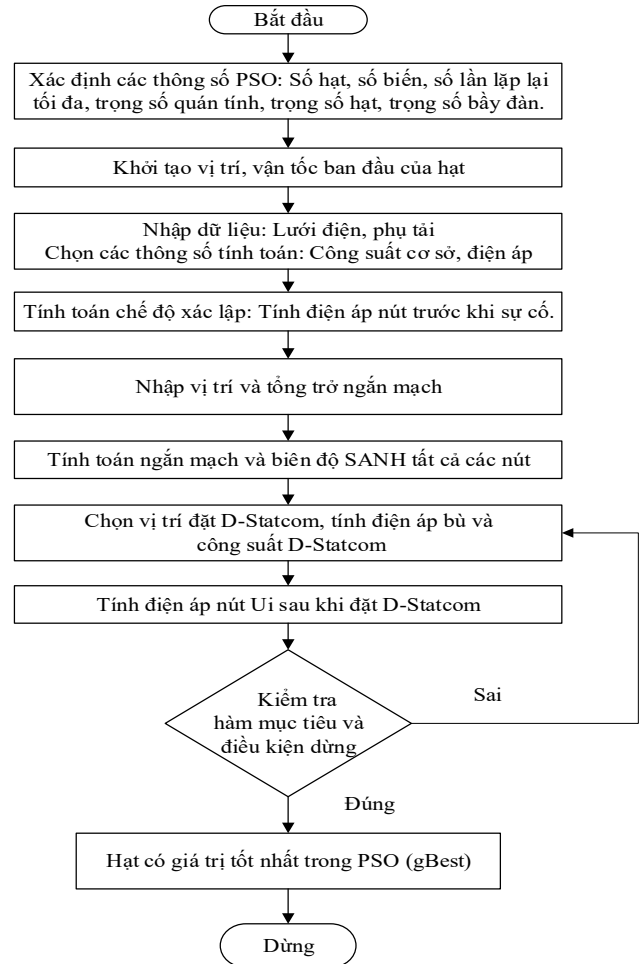
$$x_{i,m}^{(k+1)} = x_{i,m}^{(k)} + V_{i,m}^{(k+1)} \quad (16)$$

Trong đó:  $c_1, c_2$  là hằng số vận tốc;  $r_1, r_2$  là hai số ngẫu nhiên với phân bố đồng đều trong khoảng  $[0, 1]$ ;  $w$  là hệ số trọng lượng quán tính;  $x_{i,m}^{(k)}$  là vị trí cá thể thứ  $i$  tại thế

hệ thứ  $k$ ;  $V_{i,m}^k$  là vận tốc của cá thể thứ  $i$  tại thế hệ thứ  $k$ ;  $P_{best_i}$  là vị trí tốt nhất của cá thể thứ  $i$ ;  $G_{best_i}$  là vị trí tốt nhất của cá thể trong quần thể.

### 3.5. Áp dụng giải thuật PSO vào lưới điện phân phối 16 nút

Trình tự tính toán như thể hiện trong hình 9.



Hình 9. Sơ đồ khối các bước tính toán lựa chọn vị trí đặt D-Statcom để cải thiện SANH do ngắn mạch trên lưới phân phối

## 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

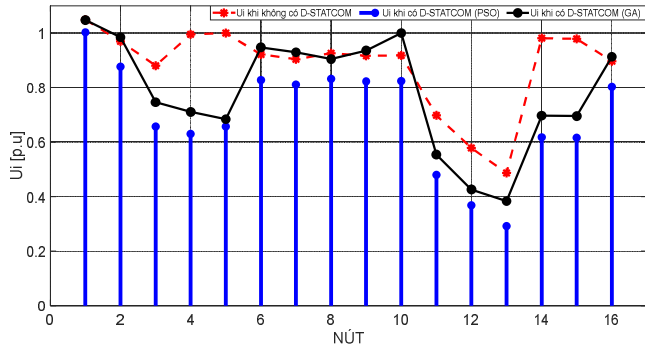
### 4.1. Các trường hợp nghiên cứu

- Vị trí 01 thiết bị D-Statcom được lắp đặt bất kỳ tại các nút trong lưới điện (trừ nút nguồn).

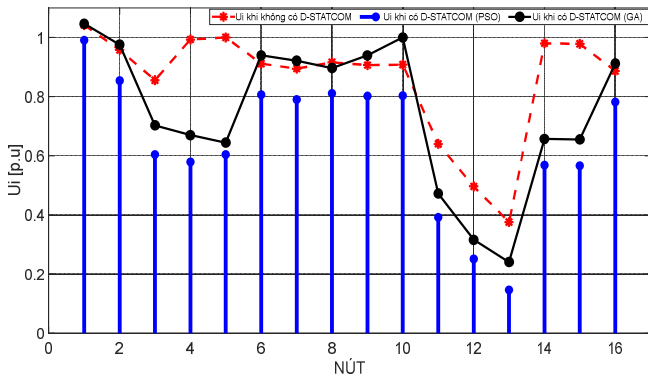
- Sự kiện ngắn mạch ba pha qua tổng trở sự cố  $Z_f$  khác nhau sẽ cho dữ liệu điện áp sự cố trên lưới phân phối 16 nút khác nhau.

### 4.2. Kết quả

- Trường hợp 1: Chọn  $Z_f = 0,25 + j0,16 (pu)$ . Ngắn mạch tại nút 13. Điện áp các nút lưới điện ở chế độ ngắn mạch ứng với việc có và không lắp đặt D-Statcom như hình 10a.



a)



b)

Hình 10. Điện áp trước và sau khi lắp đặt D-Statcom

Vị trí tối ưu để đặt D-Statcom cùng với công suất và hàm mục tiêu trong trường hợp 1 như thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số khi lắp đặt D-Statcom, ngắn mạch nút số 13 với  $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu)

Giải thuật	GA[11]	PSO
Vị trí đặt tối ưu	Nút 10	Nút 5
Hàm mục tiêu $f_{min}$ (pu)	1,0796	0,7719
Công suất (pu)	0,7589	0,7727
Số nút có điện áp > 0,9pu	Nút: 2;6;7;8;9;10;16	Nút: 2;4;5;6;7;8;9;10;14;15

- Trường hợp 2: Chọn  $Z_f = 0,1 + j0,08$  (pu). Ngắn mạch tại nút 13. Điện áp các nút lưới điện ở chế độ ngắn mạch ứng với việc có và không lắp đặt D-Statcom như hình 10b.

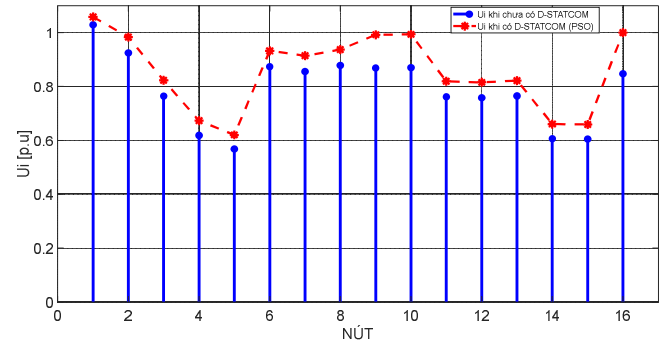
Vị trí tối ưu để đặt D-Statcom cùng với công suất và hàm mục tiêu trong trường hợp 2 như thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số sau khi lắp D-Statcom, ngắn mạch tại nút 13 với  $Z_f = 0,1 + j0,08$  (pu)

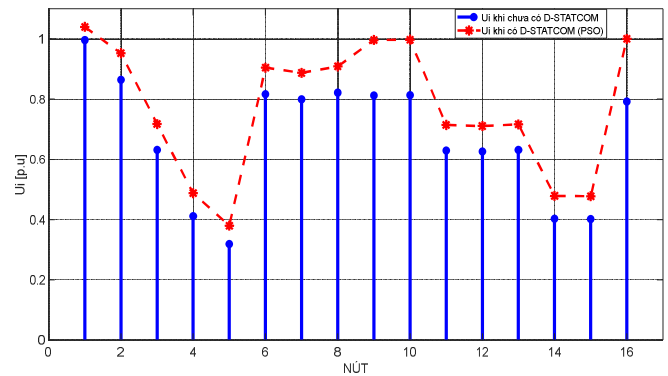
Giải thuật	GA[11]	PSO
Vị trí đặt tối ưu	Nút 10	Nút 5
Hàm mục tiêu $f_{min}$ (pu)	1,2330	0,9243

Công suất (pu)	0,8447	0,8640
Số nút có điện áp > 0,9(pu)	Nút: 2;6;7;9;10;16	Nút: 2;4;5;6;8;9;10;14;15

Trường hợp 3: Mô phỏng ngắn mạch tại nút 5 với 02 sự kiện ngắn mạch. Trường hợp 3a ( $Z_f = 0,5 + j0,8$  (pu)); Trường hợp 3b ( $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu)).



a)



b)

Hình 11. Kết quả mô phỏng lưới 16 nút IEEE khi không và có đặt D-Statcom trường hợp 3

Bảng 3. Các thông số khi lắp đặt D-Statcom, trường hợp ngắn mạch nút số 5

Trường hợp	Trường hợp 3a $Z_f = 0,5 + j0,8$ (pu)	Trường hợp 3b $Z_f = 0,25 + j0,16$ (pu)
Vị trí đặt tối ưu	Nút 16	Nút 16
Hàm mục tiêu $F_{min}$ (pu)	0,7955	1,2456
Công suất (pu)	0,4859	0,7260

**Nhận xét chính:**

Trong trường hợp xảy ra sự cố ngắn mạch tại nút số 13, hai giải thuật tối ưu hóa là GA [11] và PSO được áp dụng để xác định vị trí và dung lượng lắp đặt thiết bị D-Statcom. Theo bảng 1 và hình 10a, trường hợp tổng trở sự cố là  $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu), thuật toán PSO đề xuất vị trí lắp đặt tại nút số 5 với hàm mục tiêu  $F_{min} = 0,7719$ pu, nhỏ hơn đáng kể so với giá trị 1,0796pu kết quả từ thuật toán GA với vị trí lắp đặt tại nút số 10. Bên cạnh đó, số lượng

nút có điện áp  $> 0,9\text{pu}$  khi sử dụng PSO là 10 nút, vượt trội hơn so với 7 nút trong trường hợp dùng GA. Tuy nhiên, công suất yêu cầu của D-Statcom với PSO cao hơn  $0,0138\text{pu}$  ( $0,7727\text{pu}$  so với  $0,7589\text{pu}$ ).

Khi giảm tổng trở sự cố xuống  $Z_f = 0,1 + j0,08$  (pu), hình 10b, hiệu quả của PSO vẫn tiếp tục được thể hiện rõ. Theo bảng 2, hàm mục tiêu đạt được là  $F_{\min} = 0,9243\text{pu}$ , thấp hơn so với  $1,2330\text{pu}$  của GA; đồng thời số nút có điện áp  $> 0,9\text{pu}$  đạt 9 nút so với 6 nút của GA. Mặc dù công suất D-Statcom theo PSO ( $0,8640\text{pu}$ ) vẫn cao hơn GA ( $0,8447\text{pu}$ ), nhưng mức cải thiện điện áp tổng thể tốt hơn, thể hiện hiệu quả rõ rệt trong quá trình tối ưu hóa.

Bảng 3 và hình 11a, khi sự cố xảy ra tại nút số 5 với tổng trở  $Z_f = 0,5 + j0,8$  (pu), thuật toán PSO xác định vị trí tối ưu lắp đặt D-Statcom tại nút số 16, với giá trị hàm mục tiêu  $F_{\min} = 0,7955\text{pu}$  và công suất D-Statcom là  $0,4859\text{pu}$ . Trong trường hợp tổng trở sự cố giảm xuống  $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu) (hình 11b), vị trí tối ưu vẫn không thay đổi (nút 16), nhưng giá trị hàm mục tiêu tăng lên  $F_{\min} = 1,2456\text{pu}$ , đồng thời công suất D-Statcom cũng tăng đáng kể lên  $0,7260\text{pu}$ .

### 4.3. Thảo luận

Kết quả mô phỏng cho thấy, giải thuật tối ưu bầy đàn (PSO) có khả năng xác định vị trí và dung lượng D-Statcom tối ưu trên lưới phân phối 16 nút, giúp cải thiện rõ rệt chất lượng điện áp khi xảy ra sự cố ngắn mạch ba pha.

So với thuật toán di truyền (GA), PSO đạt được giá trị hàm mục tiêu  $F_{\min}$  thấp hơn trong tất cả các kịch bản mô phỏng. Cụ thể, ở trường hợp ngắn mạch tại nút 13 với tổng trở  $Z_f = 0,25 + j0,16$  (pu), PSO giúp giảm  $F_{\min}$  từ  $1,0796\text{ pu}$  (GA) xuống  $0,7719\text{pu}$  và tăng số nút có điện áp  $> 0,9\text{pu}$  từ 7 lên 10 nút. Ở các kịch bản khác, xu hướng cải thiện tương tự cũng được ghi nhận. Đồng thời, PSO cho phép lựa chọn các vị trí lắp đặt D-Statcom hợp lý hơn, giúp phân phối công suất bù hiệu quả hơn trong lưới, qua đó cải thiện điện áp đồng đều hơn tại các nút.

Một ưu điểm nổi bật của PSO so với GA là khả năng hội tụ nhanh hơn, ít phụ thuộc vào cấu hình tham số ban đầu, trong khi vẫn đảm bảo tính ổn định và khả năng tìm kiếm toàn cục tốt. Điều này đặc biệt quan trọng trong các bài toán tối ưu có không gian tìm kiếm lớn như tối ưu thiết bị FACTS trên lưới điện.

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại mới chỉ thực hiện mô phỏng trên mô hình tĩnh của lưới 16 nút. Một số yếu tố thực tế như: Tác động của tải không đối xứng; Biến thiên phụ tải theo thời gian; Đặc tính động của D-Statcom và

hệ thống điều khiển chưa được xét đến trong mô hình. Đây là những yếu tố quan trọng cần được nghiên cứu bổ sung để đánh giá khả năng áp dụng thực tế của phương pháp trên các lưới điện Việt Nam.

Ngoài ra, trong một số trường hợp, công suất bù yêu cầu của D-Statcom tối ưu theo PSO có giá trị cao hơn so với GA, cho thấy cần có thêm các nghiên cứu về bài toán tối ưu đa mục tiêu (ví dụ: đồng thời tối ưu hiệu quả bù áp và chi phí đầu tư thiết bị).

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng giải thuật tối ưu bầy đàn (PSO) để xác định vị trí và dung lượng tối ưu của D-Statcom trên lưới điện phân phối 16 nút, nhằm giảm thiểu hiện tượng sụt giảm điện áp ngắn hạn (SANH) do ngắn mạch ba pha. Kết quả cho thấy PSO giúp cải thiện rõ rệt chất lượng điện áp, với giá trị hàm mục tiêu  $F_{\min}$  thấp hơn và số nút có điện áp đạt yêu cầu cao hơn so với thuật toán di truyền (GA). Cụ thể, ở trường hợp ngắn mạch tại nút 13,  $F_{\min}$  giảm từ  $1,0796\text{pu}$  (GA) xuống  $0,7719\text{pu}$  (PSO), số nút có điện áp  $> 0,9\text{pu}$  tăng từ 7 lên 10 nút. Phương pháp đề xuất cho thấy khả năng ứng dụng cao trong quy hoạch và vận hành thiết bị bù D-Statcom trên lưới phân phối thực tế. Hạn chế của nghiên cứu là chưa xét đến đặc tính động và tải không đối xứng. Trong các hướng nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả dự kiến kết hợp PSO với các thuật toán lai và mở rộng mô phỏng trên các lưới có quy mô lớn hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. IEEE Std. 1159-2006, 2009, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, doi: 10.1109/IEEESTD.1994.8684637.
- [2]. Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho, *FACTS-Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons, LTD, 2022.
- [3]. Abdullahi Bala Kunya, Tankut Yalcinoz, Gaddafi Sani Shehu, "Voltage Sag and Swell Alleviation in Distribution Network using Custom Power Devices; D-STATCOM and DVR," in *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition Antalya, Turkey*, 2014.
- [4]. N. Văn Minh, B. Quốc Khánh, P. Việt Phương, "Lựa chọn vị trí và dung lượng của thiết bị điều áp động (DVR) nhằm hạn chế hậu quả của sụt giảm điện áp ngắn hạn trên lưới phân phối điện 16 nút bằng thuật toán di truyền," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 11 (120), 2017.
- [5]. M. H. J. Bollen, *Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions*. IEEE Press, 2000.

- [6]. K. Tomsovic, V.Venkatasubramanian, *The Electrical Engineering Handbook*. Power System Analysis, 2005.
- [7]. N. Văn Minh, B. Quốc Khánh, "Lựa chọn vị trí và dung lượng của thiết bị D-Statcom nhằm khắc phục sụt giảm điện áp ngắn hạn trên lưới điện phân phối 16 nút sử dụng thuật toán di truyền", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 5 (126), 2018.
- [8]. J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1942-1948, 4, 1995.
- [9]. N. Đức Minh, "Ứng dụng Matlab trong giảng dạy thuật toán tối ưu hóa dựa trên tìm kiếm bầy đàn - PSO," *Journal of Educational Equipment: Education Management*, 1, 130-132, 2023.
- [10]. T. Đình Long và cộng sự, *Sách tra cứu về chất lượng điện năng*. Nhà xuất bản Bách Khoa - Hà Nội, 2013
- [11]. N. V. Minh, *Nghiên cứu các giải pháp nâng cao chất lượng điện năng trong lưới phân phối điện sử dụng các thiết bị D-FACTS*. Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2018.
- [12]. B. Kanchanapalli, S. Banka, "Power Quality Improvement in Distribution System," in *Power Quality - New Insights*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.110259.

---

#### AUTHORS INFORMATIONS

**Nguyen Van Minh<sup>1</sup>, Nguyen Van Loc<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Vinh Long University of Technology and Education, Vietnam

<sup>2</sup>Hau Giang Community College, Vietnam