

PHƯƠNG PHÁP TÁI CẤU TRÚC LƯỚI SAU SỰ CỐ TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI TRUNG ÁP

NETWORK RECONFIGURATION METHOD SUBSEQUENT TO FAULTS IN THE MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION GRID

Lê Xuân Sanh

Trường Đại học Điện lực; sanhlx@epu.edu.vn

Tóm tắt - Kết cấu lưới điện phân phối ngày càng đa dạng và phức tạp, nhằm nâng cao tính ổn định cung cấp điện và chất lượng điện năng cho khách hàng, thì các phương pháp khôi phục, dịch chuyển phụ tải sau sự cố theo phương pháp truyền thống không thể đáp ứng nhu cầu. Phục hồi và dịch chuyển phụ tải sau sự cố là một vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu, nhiều hạn chế và phức tạp. Xem xét mức độ ưu tiên, số lượng tải được khôi phục, số lượng hoạt động của thiết bị phân đoạn, tổn thất trên mạng sau khi tái lập, v.v. Bài báo thiết lập mô hình phục hồi dựa trên tình hình thực tế của lưới, với các mục tiêu và ràng buộc khác nhau, tìm sơ đồ với phân bố tải tối ưu để đáp ứng các yêu cầu về an toàn, ổn định và kinh tế của mạng điện sau sự cố. Kết quả nghiên cứu điển hình cho thấy mô hình đề xuất phù hợp với lưới điện hiện nay và có hiệu quả.

Từ khóa - khôi phục cấp điện; lưới điện trung áp; phân phối tải; tái cấu trúc lưới; tự khôi phục.

1. Đặt vấn đề

Lưới điện thông minh đang được nghiên cứu xây dựng và thử nghiệm nhiều nơi trên thế giới, một trong những đặc trưng của lưới thông minh là có thể tự khắc phục (self-healing) khi có sự cố, tự động cô lập vùng bị sự cố, nhanh chóng cấp điện lại cho các phụ tải, giảm thiểu thời gian mất điện và lượng phụ tải bị mất điện. Với bối cảnh lưới điện phân phối trung áp Việt Nam hiện nay, ở những nơi có tập trung mật độ phụ tải lớn, như các thành phố, khu công nghiệp thì lưới điện được kết nối dạng mạch vòng, vận hành hở. Khi sự cố xảy ra, việc xác định điểm sự cố và tái lập lưới đang được thực hiện thủ công bởi điều độ viên và công nhân vận hành, mất nhiều thời gian, ảnh hưởng đến chất lượng điện năng, tăng các chỉ số xấu trong vận hành, và có thể dẫn đến chưa tối ưu trong việc tái lập lưới sau sự cố. Theo lộ trình phát triển lưới điện thông minh mà Chính phủ đã phê duyệt, cũng như kế hoạch của các công ty điện lực phân phối, hiện nay một số thành phố lớn đang có kế hoạch tự động hóa lưới điện phân phối, thì một trong những vấn đề cần quan tâm đó là tái cấu trúc lưới sau sự cố.

Một số nước trên thế giới xem vấn đề phương pháp tái cấu trúc lưới sau sự cố là một trong những vấn đề quan tâm hàng đầu (vì nó ảnh hưởng đến chế độ vận hành, tổn hao, giới hạn dòng, điện áp, v.v...), đã có một số nghiên cứu về vấn đề này, đề xuất các phương pháp giải quyết vấn đề tái cấu trúc lưới, nội dung chủ yếu tập trung ở hai mặt: phương pháp tối ưu và mục tiêu khi tái lập lưới sau sự cố. Các bài báo sử dụng các phương pháp khác nhau, như phương pháp chuyên gia, toán học, tìm kiếm Heuristic, trí tuệ nhân tạo, thuật toán lai, v.v. với các hàm mục tiêu nào đó, ràng buộc hoặc xét trong các trường hợp riêng để tìm ra lời giải cho bài toán theo mục đích khác nhau [1, 2, 3, 5]. Nhìn chung, các mô hình toán học thường không thể bao quát tất cả các

Abstract - As the distribution network structure becomes more and more diverse and complex, in order to enhance the stability of electricity supply as well as electricity quality for customers, conventional approaches of recovery and load shift subsequent to faults have failed to meet the demands. The recovery and load shift subsequent to faults is a multi-target optimization affair with a variety of constraints and complexity. Priority levels, the number of restored loads, the activity quantity of segmented devices, network losses after reestablishment, etc. are taken into consideration. This article establishes a recovery model based on actual conditions of the grid with various objectives and restrictions, seeking to set up a diagram with optimal load distribution to meet requirements of network safety, stability and economy. Results from case studies demonstrate that the proposed model is consistent with the existing grid and results in efficiency.

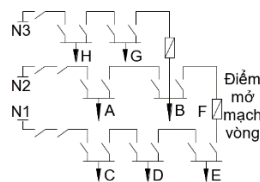
Key words - electricity service restoration; medium-voltage grid; load distribution; network reconfiguration; self-healing.

khía cạnh, và có các vấn đề trong hội tụ thuật toán, dẫn đến các giải pháp tối ưu cục bộ hoặc không hội tụ được, ví dụ phương pháp Heuristic thường cho kết quả có độ tin cậy cao, tuy nhiên tương đối khó khăn khi xét đến một cách tổng thể, chỉ phù hợp với cấu trúc lưới đơn giản. Đối với trong nước, tác giả chưa thấy nghiên cứu nào đưa ra một phương pháp cụ thể, đa mục tiêu, trình bày các bước thực hiện rõ ràng và mạch lạc trong vấn đề tái cấu trúc lưới trung áp sau sự cố. Vì vậy, bài viết với mục tiêu đưa ra một phương pháp mới đa mục tiêu với các ràng buộc khác nhau trong vấn đề tái cấu trúc lưới trung áp sau sự cố và nội dung phương pháp trình bày một cách tường minh dễ tiếp cận.

2. Giới thiệu phương pháp tái cấu trúc lưới

2.1. Nguyên lý cơ bản tái cấu trúc

Hiện nay, lưới đang kết theo kiểu mạch vòng, vận hành hở (Hình 1). Theo nguyên tắc, khi bị sự cố thì cầu dao (bài viết dùng từ ‘cầu dao’ để chỉ thiết bị đóng cắt phân đoạn) hai đầu đoạn sự cố sẽ cắt và cô lập đoạn sự cố, những đoạn còn lại sẽ được cấp điện lại bình thường. Tuy nhiên, phương pháp tái lập sẽ phân thành hai phía, phía từ điểm sự cố về phía nguồn sẽ tiếp tục được cấp điện, phía còn lại (từ điểm sự cố đến điểm mở mạch) gọi là vùng không sự cố bị mất điện - cần được khôi phục cấp điện. Nếu như nhanh chóng, hiệu quả, tin cậy thì vấn đề tái lập như vậy là một hàm đa mục tiêu, tối ưu phi tuyến tính [3].



Hình 1. Kết lưới dạng mạch vòng

2.2. Mô hình toán học thường dùng để tái cấu trúc

2.2.1. Mô hình toán học hàm mục tiêu [4, 5, 6, 7]

(1) Hàm mục tiêu lớn nhất là giảm mức độ tối đa số phụ tải mất điện

$$\min S_{nr} = \sum_i^{N_{nr}} S_{lost-i} \quad (1)$$

Trong đó: N_{nr} là nút tải mà không thể hồi phục cấp điện; S_{nr} là lượng phụ tải không thể hồi phục cấp điện; S_{lost-i} là lượng phụ tải bị mất điện không thể khôi phục tại điểm i .

(2) Hàm mục tiêu giảm tổn hao trong mạng điện

Khi khôi phục cấp điện thì kết cấu lưới cũng thay đổi, dòng công suất thay đổi, ảnh hưởng đến tổng tổn hao trong mạng điện, miêu tả hàm mục tiêu:

$$\min L = \sum_i^{N_b} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i} \cdot R_i \quad (2)$$

Trong đó: N_b là số nhánh trong lưới điện; U_i là điện áp điểm cuối của nhánh thứ i ; P_i , Q_i , R_i lần lượt là công suất tác dụng, phản kháng và điện trở của nhánh thứ i .

(3) Hàm mục tiêu về chất lượng điện áp

Hàm mục tiêu về điện áp thấp nhất của toàn bộ các điểm trong lưới điện được tính như sau:

$$\min U_d = \sum_i^D \left| \frac{U_i - U_0}{U_0} \right| \quad (3)$$

Trong đó: D – tập hợp các điểm nút trong mạng điện. U_i , U_0 – lần lượt là điện áp của nút thứ i và điện áp nguồn; U_d – tổng giá trị chênh lệch điện áp.

Ngoài ra, sử dụng chỉ số điện áp cân bằng có thể cải thiện chất lượng điện áp nguồn của mạng lưới phân phối sau khi khôi phục nguồn điện.

$$\min \sum_{i,j \in \alpha} V_{BL-ij} \quad (4)$$

$$V_{BL-ij} = \frac{\max[U_i, U_j]}{\min[U_i, U_j]} \quad (5)$$

Trong đó: α – tập hợp các điểm liên kết giữa các phân đoạn; V_{BL-ij} – chỉ số cân bằng điện áp tại các điểm nút giữa các đoạn thứ i và j .

(4) Hàm mục tiêu về số lần tác động của các thiết bị phân đoạn

Việc đóng và mở thường xuyên sẽ rút ngắn tuổi thọ của cầu dao, làm tăng tổn hao, tăng thời gian phục hồi lưới điện ảnh hưởng đến sự vận hành an toàn, ổn định của lưới điện, hàm mục tiêu như sau:

$$N = \sum_{i=1}^m (1 - C_i) + \sum_{j=1}^l O_j \quad (6)$$

Trong đó: N – Số lần thao tác đóng/cắt cầu dao.

C_i , O_j lần lượt là dao phân đoạn thường đóng và dao thường mở trong trường hợp vận hành bình thường, lấy giá trị là 1 thể hiện dao đóng, giá trị 0 thể hiện dao mở.

(5) Hàm mục tiêu cân bằng phụ tải

Thông qua quá trình hồi phục sau sự cố sẽ có sự chuyển dịch phụ tải trên các phân nhánh, làm cho phụ tải phân bố đều, giảm thiểu quá tải, giảm tổn hao, nâng cao tính an toàn trong vận hành và giảm rủi ro cho mạng điện.

$$L_{Bsys} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} L_{Bi} \quad (7)$$

$$L_{Bi} = \frac{S_i}{S_i^{\max}} \quad (8)$$

Trong đó: L_{Bsys} , L_{Bi} lần lượt là chỉ tiêu chỉ số tải cân bằng của hệ thống và nhánh thứ i ; S_i , $S_i^{\max}$ lần lượt là công suất thực tế và giới hạn dung lượng chảy qua nhánh i . n_b là tổng các nhánh trong hệ thống.

2.2.2. Các ràng buộc thường được sử dụng

(1) Ràng buộc về kết cấu lưới

Lưới điện phân phối hiện nay chủ yếu là cấu trúc mạch vòng, vận hành hở, do vậy khi vận hành bình thường hay tái lập sau sự cố phải đảm bảo cấu trúc mạch vòng.

(2) Ràng buộc dung lượng truyền tải và điện áp trên đường dây

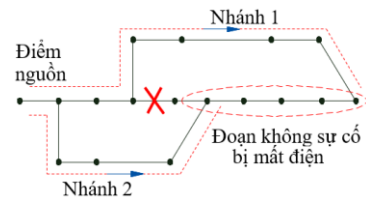
Để đảm bảo lưới điện an toàn, chất lượng và tin cậy, dòng điện thực tế chảy qua đường dây không được vượt quá giới hạn (quá tải) cho phép của đường dây. Điện áp tại các nút vượt quá giới hạn cho phép.

(3) Ràng buộc số lần thao tác (đóng/cắt) của cầu dao

Số lần thao tác đóng/cắt cầu dao nhiều sẽ ảnh hưởng đến phần mềm điều khiển (yêu cầu về phần mềm phức tạp), độ chính xác thực hiện, dẫn đến sự vận hành an toàn ổn định của hệ thống.

2.3. Nguyên lý phân phối tải sau sự cố cho lưới trung áp nhiều đường dây [7, 8]

Trong các trường hợp thông thường, lưới điện khi thiết kế hay lập phương thức vận hành đều có một dung lượng dự phòng nhất định, việc hồi phục cấp điện cho những đoạn bị mất, ưu tiên cần khảo sát đến dòng điện từ những nhánh đường dây chính, nếu công suất dự phòng không đủ mới xét đến các nhánh đường dây phụ. Ở đây, tác giả chủ yếu xem xét đến nhánh đường dây chính đủ dung lượng dự phòng để thực hiện tái cấu trúc lưới. Sau đây, lấy ví dụ hồi phục cấp điện cho khu vực không sự cố đối với mô hình gồm 2 đường dây cấp nguồn như Hình 2.



Hình 2. Mô hình 2 nhánh cấp điện

2.3.1. Quy tắc tính tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn

Căn cứ điều kiện ràng buộc: dòng điện các đường dây không được quá tải, điện áp tại các điểm nút của cầu dao liên lạc không được vượt quá giới hạn để thiết lập nên miền khả thi của tỉ lệ phân phối phụ tải, trong đó các giá trị biên là tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn.

(1) Tính toán dung lượng dự phòng của cầu dao liên lạc.

Dung lượng dự phòng của cầu dao liên lạc thứ i :

$$I_{rs-i} = \min \{ I_{N-k} - I_{real-k} / k = 1, 2, \dots, Num \} \quad (9)$$

Trong đó: I_{N-k} là dòng điện định mức của nhánh k .

I_{real-k} là dòng điện thực tế của nhánh k , ở thời điểm sau

khi tách sự cố nhưng trước khi tái lập lưới.

Num là số đường dây nhánh cấp điện.

Hàm điều kiện tỉ lệ phân phối dung lượng tải là:

$$\alpha_{I-res-i} = \frac{I_{rsv-i}}{I_r} \quad (10)$$

Trong đó: I_r là tổng phụ tải vùng bị mất điện.

(2) *Tính toán điện áp nút không vượt quá giới hạn.*

Cài đặt điện áp nguồn điện U_s , điện áp điểm nút cầu dao liên lạc tuyến dây 1 là:

$$U_{c-1} = U_s - \Delta U_1 - z_{12} I_r - (z_{11} - z_{12}) I_r \alpha \quad (11)$$

Cài đặt giá trị giới hạn điện áp thấp nhất điểm nút cầu dao liên lạc $U_{c-min-1}$, tức là điện áp của tuyến dây 1 quy định tỉ lệ phân phối phụ tải là:

$$\alpha_{u-res-1} = \frac{U_s - U_{c-min-1} - \Delta U_1 - z_{12} I_r}{(z_{11} - z_{12}) I_r} \quad (12)$$

Khi có nhiều đường dây để hồi phục cấp điện cho vùng mất điện, mà các đường cấp điện không có đoạn trùng nhau, tức là thỏa mãn:

$$z_{ij} = 0, \forall i, j \text{ và } i \neq j \quad (13)$$

Trong đó, z_{ij} là trở kháng của đoạn dây trùng nhau giữa hai tuyến cấp điện i và j .

Tức là điện áp điểm nút cầu dao liên lạc là:

$$\begin{bmatrix} U_{c-min-1} \\ U_{c-min-i} \\ \vdots \\ U_{c-min-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ \vdots \\ U_{si} \\ \vdots \\ U_{sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{11} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & z_{ii} & \\ 0 & & & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{u-res-1} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-i} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-n} \end{bmatrix} I_r \quad (14)$$

Trong đó: $\alpha_{u-res-1}$ là điều kiện điện áp của tỉ lệ phân phối phụ tải nhánh dây i , U_{s1} là điện áp nguồn nhánh i , $U_{c-min-1}$ là giá trị giới hạn điện áp thấp nhất điểm nút cầu dao liên lạc của nhánh i , ΔU_i là độ giảm điện áp giữa nguồn và nút cầu dao liên lạc nhánh i ; z_{ii} là tổng trở kháng của nhánh i .

Do đó ta được điều kiện điện áp quy định của tỉ lệ phân phối phụ tải:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{u-res-1} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-i} \\ \vdots \\ \alpha_{u-res-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_{11}} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \frac{1}{z_{ii}} & \\ 0 & & & \frac{1}{z_{nn}} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} U_{s1} \\ \vdots \\ U_{si} \\ \vdots \\ U_{sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{c-min-1} \\ \vdots \\ U_{c-min-i} \\ \vdots \\ U_{c-min-n} \end{bmatrix} \right) \cdot \left(\frac{1}{I_r} \right) \quad (15)$$

(3) *Tính toán tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn.*

Tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn lấy giá trị nhỏ nhất của dung lượng quy định tỉ lệ phân phối phụ tải $\alpha_{I-res-1}$ và điện áp quy định tỉ lệ phân phối phụ tải $\alpha_{u-res-1}$:

$$\alpha_{rev-i} = \min \{ \alpha_{u-res-i}, \alpha_{I-res-i} \} \quad (16)$$

2.3.2. *Quy tắc tính tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị*

a, *Tính toán gần đúng tổng tổn hao mạng*

(1) Bỏ qua sự thay đổi góc pha của dòng điện trước và sau tải cấu trúc, gần đúng lượng tăng tổn hao mạng là:

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= (I + \Delta I)^2 \cdot R - I^2 \cdot R = 2(IR) \cdot \Delta I + R \Delta I^2 \\ &= 2(\Delta U \cdot \cos \phi_z) \cdot \Delta I + R \Delta I^2 \end{aligned} \quad (17)$$

(2) Tổng độ lệch điện áp của các đoạn mạch nhánh trên

đường dây tương đương với lượng giảm điện áp của đường dây này, tức là:

$$\sum_n \Delta U_{1branch-n} \cdot \cos \phi_{z1branch-n} = \Delta U_1 \cdot \cos \phi_{z1} \quad (18)$$

Trong đó: $\Delta U_{1branch}$ là độ giảm điện áp đoạn mạch nhánh thứ n của đường dây 1, $\cos \phi_{z1branch-n}$ là cosin góc trở kháng của đoạn thứ n đường dây 1, ΔU_1 là tổng độ giảm điện áp của đường dây 1, $\cos \phi_{z1}$ là cosin góc tổng trở kháng của đường dây 1.

b, *Tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị*

Tổn hao của mạng tính gần đúng như trên, lượng tăng tổng tổn hao trên mạng được tính như sau:

$$\begin{aligned} \delta P &= 2\Delta U_1 \cos \phi_{z1} \Delta I_1 + 2\Delta U_2 \cos \phi_{z2} \Delta I_2 \\ &+ r_{11} (\Delta I_1)^2 + r_{22} (\Delta I_2)^2 + 2r_{12} \Delta I_1 \Delta I_2 \\ &= (r_{11} + r_{22} - 2r_{12}) I_r^2 \alpha^2 + r_{22} I_r^2 + 2\Delta U_2 \cos \phi_{z2} I_r \\ &+ 2(r_{12} I_r - r_{22} I_r + \Delta U_1 \cos \phi_{z1} - \Delta U_2 \cos \phi_{z2}) I_r \alpha \end{aligned} \quad (19)$$

Khi $\frac{\delta \delta P}{\delta \alpha} = 0$, tìm ra tỉ lệ phân phối phụ tải khi tổng tổn

hao trong mạng là nhỏ nhất, tức là tìm ra giá trị tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị của đường dây 1:

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\Delta U_2 \cos \phi_{z2} - \Delta U_1 \cos \phi_{z1}}{I_r} + r_{22} - r_{12}}{r_{11} + r_{22} - 2r_{12}} \quad (20)$$

Nếu khi có 3 đường dây đồng thời cấp điện cho khu vực mất điện không sự cố, quy tắc tính toán tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị tương tự như trên, tổng lượng tăng tổn hao mạng được miêu tả như sau:

$$\begin{aligned} \delta P &= 2I_r \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \cos \phi_{z1} & \Delta U_2 \cos \phi_{z2} & \Delta U_3 \cos \phi_{z3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \\ &+ I_r^2 \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & r_{22} & r_{23} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

Do tồn tại: $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ (22)

Do đó thay (22) vào (21), được:

$$\begin{aligned} \delta P &= 2I_r \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \cos \phi_{z1} & \Delta U_2 \cos \phi_{z2} & \Delta U_3 \cos \phi_{z3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix} \\ &+ I_r^2 \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & r_{22} & r_{23} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

Khi đồng thời $\frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_1} = 0, \frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_2} = 0$ thì kết quả của phép tính là:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} &= \text{inv} \left(\begin{bmatrix} r_{11} - 2r_{13} + r_{33} & r_{12} - r_{23} - r_{13} + r_{33} \\ r_{12} - r_{23} - r_{13} + r_{33} & r_{22} - r_{23} + r_{33} \end{bmatrix} \right) \\ &\cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_3 \cos \phi_{z3} - \Delta U_1 \cos \phi_{z1}}{I_r} + r_{33} - r_{13} \\ \frac{\Delta U_3 \cos \phi_{z3} - \Delta U_2 \cos \phi_{z2}}{I_r} + r_{33} - r_{23} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

Do công thức (22) tính được α_3 , hoàn thành tính giá trị tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị của 3 đường cấp điện. Nếu khi có nhiều đường dây để hồi phục cấp điện, tổng lượng tăng hao tổn mạng lưới là:

$$\delta P = 2I_r \cdot [\Delta U_1 \cos \varphi_{z1} \dots \Delta U_n \cos \varphi_{zn}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$+ I_r^2 \cdot [\alpha_1 \dots \alpha_n] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}$$

Trong đó:

$\Delta U_1 \sim \Delta U_n$ là độ giảm điện áp giữa điểm nguồn và điểm cầu dao liên lạc của đường cấp điện (1-n);

$\Delta I_1 \sim \Delta I_n$ là độ tăng dòng điện phụ tải của đường dây (1-n) cấp cho khu vực mất điện không sự cố;

$\cos \phi_{z1} \sim \cos \phi_{zn}$ lần lượt là cosin của góc trở kháng của đường dây (1, n);

r_{ii} là tổng điện trở của đường cấp điện i;

r_{ij} là điện trở của đoạn dây trùng giữa hai tuyến i và j (nếu không có, lấy giá trị là 0);

I_r là tổng cường độ dòng điện phụ tải chờ phục hồi;

α_i là giá trị tỉ lệ phân phối phụ tải của đường dây i.

Điều kiện thỏa mãn tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị là:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (26)$$

Thay công thức (26) vào công thức (25), được:

$$\delta P = 2I_r \cdot [\Delta U_1 \cos \varphi_{z1} \dots \Delta U_n \cos \varphi_{zn}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$+ I_r^2 \cdot [\alpha_1 \dots \alpha_{n-1} \ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \end{bmatrix}$$

Khi $\frac{\partial \delta P}{\partial \alpha_i} = 0, (i=1, \dots, n-1)$ và kết hợp công thức (26), ta

có tỉ lệ phân phối tải cực trị $\alpha_i (i=1, \dots, n)$.

2.3.3. Quy tắc điều chỉnh tỉ lệ phân phối phụ tải tối ưu

(1) Khi tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị nhỏ hơn tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn, thì tỉ lệ phân phối phụ tải tối ưu do tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị xác định.

(2) Khi tồn tại đường dây có tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị nhỏ hơn tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn, thì tỉ lệ phân phối phụ tải tối ưu của đường dây này do tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn xác định, lượng phụ tải cần dịch chuyển của đường dây này do đường cấp điện chưa vượt giới hạn còn lại chịu.

2.4. Lưu trình phục hồi sự cố mạng phân phối điện

Các bước chính phục hồi sự cố như sau (Hình 3):

(1) Xác định vùng mất điện nhưng không bị sự cố.

(2) Tính tổng phụ tải khu vực mất điện không sự cố.

(3) Tìm tất cả cầu dao liên lạc.

(4) Theo công thức (9) tính dung lượng dự phòng, theo công thức (10) tìm được dung lượng quy định tỉ lệ phân phối phụ tải.

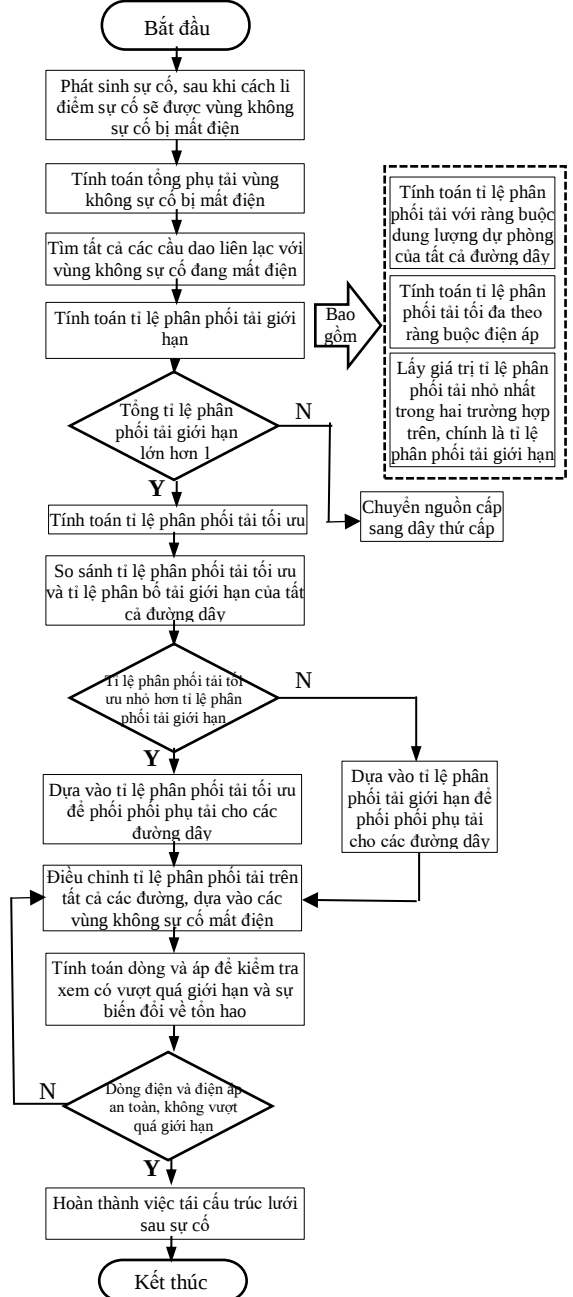
(5) Thiết lập giá trị giới hạn điện áp, theo công thức (16) tính điều kiện điện áp quy định tỉ lệ phân phối phụ tải.

(6) Theo công thức (16) tìm được tỉ lệ phân phối phụ

tải giới hạn, tổng tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn lớn hơn 1, nếu không phải chuyển sang các đường dây hỗ trợ thứ cấp.

(7) Công thức (27) tính tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị.

(8) So sánh tỉ lệ phân phối cực trị với tỉ lệ phân phối giới hạn, tìm tỉ lệ phân phối phụ tải tối ưu theo mục 2.3.3.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán tái lập cấp điện

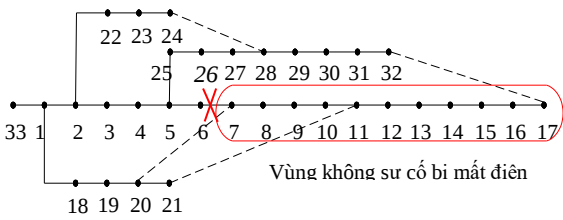
(9) Thông qua tính toán công suất, dòng điện, điện áp và tổn hao để so sánh với các giá trị giới hạn. Nếu vượt quá giới hạn thì phải quay lại bước (7) xác định lại đường dây cấp điện phục hồi, nếu không tức là hoàn thành tái cấu trúc lưới.

3. Phân tích ví dụ

Bài viết lấy hệ thống điện IEEE 33 nút làm ví dụ, khi đoạn 6-7 phát sinh sự cố và loại bỏ, như Hình 4.

(1) Xác định điểm mất điện không sự cố, tổng phụ tải mất điện, cầu dao liên lạc, như Bảng 1 ($U_{dm} = 10$ kV).

(3) Cài đặt giá trị giới hạn của điện áp là 9 kV (giảm 10% U_{dm}), từ các bước (4), (5), (6) tính được giá trị tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn của mỗi cầu dao liên lạc, kết quả như Bảng 2.



Hình 4. Sơ đồ IEEE 33 nút và ví dụ điểm sự cố

(4) Do cầu dao liên lạc 7-20 và 11-21 trên cùng một tuyến dây, nên chỉ chọn một trong hai phương án: phương án 1 (7-20 và 17-32), phương án 2 (11-21 và 17-32).

(5) Theo bước (7) lần lượt tính tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị, cả hai phương án đều tồn tại vấn đề cầu dao liên lạc 17-32 vượt giới hạn, căn cứ theo quy tắc 2.2.3 để tiến hành điều chỉnh tỉ lệ phân phối phụ tải, kết quả như Bảng 3, 4.

(6) Căn cứ theo lượng phân phối phụ tải để phân chia khu vực mất điện, khi mạch nhánh 16-17 ngắt, lượng phụ tải của khu vực mất điện sẽ gần với lượng phân phối phụ tải tối ưu, tính toán lượng phụ tải phân phối thực tế của các cầu dao liên lạc, so sánh các giá trị điện áp giới hạn và tình hình dòng điện quá tải, kết quả như Bảng 5, 6.

(7) Cường độ dòng điện mạch nhánh lớn nhất cả hai phương án đều không vượt quá 1%, nên đạt yêu cầu. Phương án hai có tổn hao nhỏ hơn nên là phương án tối ưu, (phương án một là phương án chọn sau). Do vậy căn cứ theo phương án hai để thực hiện tái cấu trúc: Cắt mạch nhánh 16-17, đóng cầu dao liên lạc 11-21 và 17-32, hoàn thành tái cấu trúc, kết quả như Hình 5.

Bảng 1. Danh sách dữ liệu vùng không sự cố bị mất điện

Điểm phụ tải bị mất điện	Tổng phụ tải vùng mất điện (kVA)	Dòng của tổng phụ tải bị mất điện (A)	Cầu dao liên lạc với vùng mất điện
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	967	96,7	7-20, 11-21, 17-32

Bảng 2. Số liệu tính toán tỉ lệ phân phối tải giới hạn

Cầu dao liên lạc	Dung lượng dự phòng (A)	Tỉ lệ phân phối tải theo ràng buộc về dung lượng	Tỉ lệ phân phối tải theo ràng buộc về điện áp	Tỉ lệ phân phối tải theo giới hạn
7-20	87,14	0,9018	3,4076	0,9018
11-21	87,14	0,9018	2,4897	0,9018
17-32	50,83	0,5260	0,1467	0,1467

Bảng 3. Tính toán và hiệu chỉnh tỉ lệ phân phối tải tối ưu theo phương án 1

Cầu dao liên lạc	Tỉ lệ phân phối tải cực trị	Tỉ lệ phân phối tải tối ưu	Dung lượng phân phối tải thực tế (kVA)
7-20	0,7483	0,8533	825,03
17-32	0,2517 (quá giới hạn)	0,1467	141,97

Bảng 4. Tính toán và hiệu chỉnh tỉ lệ phân phối tải tối ưu theo phương án 2

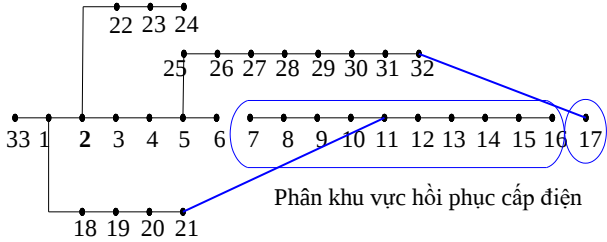
Cầu dao liên lạc	Tỉ lệ phân phối tải cực trị	Tỉ lệ phân phối tải tối ưu	Dung lượng phân phối tải thực tế (kVA)
11-21	0,6938	0,8533	825,03
17-32	0,3062 (quá giới hạn)	0,1467	141,97

Bảng 5. Phân phối tải thực tế và kiểm chứng phương án 1

Cầu dao liên lạc	Phân phối tải thực tế (kVA)	Điện áp điểm thấp nhất (kV)	Nhánh có dòng vượt giới hạn	Tổn hao của mạng sau hồi phục (kW)
7-20	743,14	9,353	0,6%	230,43
17-32	225,02			

Bảng 6. Phân phối tải thực tế và kiểm chứng phương án 2

Cầu dao liên lạc	Phân phối tải thực tế (kVA)	Điện áp điểm thấp nhất (kV)	Nhánh có dòng vượt giới hạn	Tổn hao của mạng sau hồi phục (kW)
11-21	743,14	9,352	0,79%	229,93
17-32	225,02			



Hình 5. Hoàn thành tái cấu trúc lưới sau sự cố

4. Kết luận

Bài báo đề xuất phương pháp tái cấu trúc lưới sau sự cố trong lưới điện phân phối trung áp, trước tiên giới thiệu nguyên lý cơ bản, hàm mục tiêu và các điều kiện biên, sau đó giới thiệu phương án nhanh chóng khôi phục cấp điện cho vùng không sự cố bị mất điện đối với lưới nhiều đường dây như cấu trúc lưới điện thực tế hiện nay. Dựa trên mục tiêu tổn hao nhỏ nhất để tính tỉ lệ phân phối phụ tải cực trị, đồng thời tỉ lệ phân phối phụ tải giới hạn cho điều kiện dòng điện, điện áp an toàn. Kết hợp hai điều kiện trên để có tỉ lệ phân phối phụ tải là tối ưu. Thông qua lưới điện IEEE 33 nút làm ví dụ, để minh chứng phương án đề xuất đạt yêu cầu vận hành an toàn và kinh tế, từ đó đưa ra phương án phân phối phụ tải hợp lí, hoàn thành việc tái lập lưới sau sự cố. Các bước tính toán đơn giản nhanh chóng, hiệu quả, cho thấy phương pháp có tính khả thi cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Kleinberg M R, Miu K, Chiang H D, “Improving Service Restoration of Power Distribution Systems Through Load Curtailment of In-service Customers”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 2011, pp. 1110-1117.

[2] Irving M R, Luan W P, Danial J S, “Supply Restoration in Distribution Networks Using A Genetic Algorithm”, *Electrical Power and Energy Systems*, 10, 2002, pp. 447-457.

[3] Kumar Y, Das B, Sharma J, “Multi-objective, Multi-constraint Service Restoration of Electric Power Distribution System with Priority Customers”, *IEEE Trans on Power Delivery*, 23(1), 2008, pp. 261-270.

- [4] Zidan A, El-Saadancy EF, “A Cooperative Multiagent Framework for Self-healing Mechanisms in Distribution Systems”, *IEEE Transaction on Smart Grid*, 3(3), 2012, pp.1525-1539.
- [5] Narimani M R, Vahed A A, Azizipanah-Abarghooee R, et al., “Enhanced Gravitational Search Algorithm for Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration Considering Reliability, Loss and Operational Cost”, *Generation, Transmission & Distribution*, 8(1), 2014, pp. 55-69.
- [6] Vitorino R M, Jorge H M, Neves L P, “Loss and Reliability Optimization for Power Distribution System Operation”, *Electric Power Systems Research*, 96, 2013, pp.177-184.
- [7] Ciric R M, Popovic D S, “Multi-objective Distribution Network Restoration Using Heuristic Approach and Mix Integer Programming Method”, *Electrical Power and Energy Systems*, 22, 2000, pp. 497-505.
- [8] Zhang Limin, Ma Qiang, Li Zhenkun, Liu Haoming, *Service Restoration Reconfiguration in Distribution Network Based on Tabu Clonal Genetic Algorithm*, Proceedings of the CSU-EPSCA, 11(1), 2010.

(BBT nhận bài: 23/5/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 07/7/2018)