ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT GIAO NHAU ĐIỂM YÊN NGỰA XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ ĐẶT SVC NHẰM NÂNG CAO ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP

Nguyễn Hữu Đức*

Tóm tắt: *Hiện tượng mất ổn định điện áp (OĐĐA) và sụp đổ điện áp (SĐĐA) trong hệ thống điện (HTĐ) là sự cố đặc biệt nghiêm trọng. Đã có rất nhiều nghiên cứu phân tích đánh giá các hiện tượng OĐĐA, SĐĐA cũng như các giải pháp nhằm nâng cao OĐĐA của HTĐ. Trong đó, giải pháp ứng dụng các thiết bị điện tử công suất SVC (Static Var Compensator) giúp nâng cao OĐĐA đã chứng tỏ được hiệu quả. Tuy nhiên, do giá thành thiết bị SVC còn lớn nên bài toán xác định vị trí đặt nhằm cải thiện OĐĐA tốt nhất là rất cần thiết, đặc biệt đối với HTĐ Việt Nam. Bài báo này trình bày phương pháp ứng dụng lý thuyết giao nhau điểm yên ngựa nhằm xác định thanh cái đặt SVC giúp nâng cao OĐĐA của hệ thống. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng được thực hiện trên phần mềm UPFLOW với hệ thống điện IEEE-300 nút.*

Từ khóa: Ổn định điện áp; Sụp đổ điện áp; Lý thuyết giao nhau điểm yên ngựa; SVC, UPFLOW.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, các hệ thống điện (HTĐ) truyền tải điện xoay chiều đều phức tạp về thiết bị, cấu trúc và rộng lớn về mặt địa lý. Tuy nhiên, do nhu cầu sử dụng điện năng ngày càng lớn, điều kiện kinh tế và các yêu cầu về môi trường phần nào hạn chế việc xây dựng các hệ thống truyền tải và phát điện mới nên nhiều công ty điện buộc phải vận hành hệ thống gần với giới hạn ổn định. Khi các thông số của hệ thống thay đổi, đặc biệt là phụ tải trong hệ thống, giá trị điện áp có thể sẽ giảm nhẹ. Kỹ sư vận hành thường điều khiển điện áp tại một số thanh cái bằng cách tăng CSPK phát, đóng cắt bộ tụ điện và thay đổi đầu phân áp. Khi những thiết bị này đạt giới hạn điều chỉnh thì người vận hành không thể điều khiển điện áp được nữa. Hơn nữa, khi công suất phụ tải tăng đến một giá trị nào đó, một dạng mất ổn định hệ thống (sụp đổ điện áp) có thể xảy ra. Hiện tượng này đặc trưng bởi việc giảm điện áp đột ngột và nhanh tại một số hoặc tất cả các thanh cái trong hệ thống [1-5].

Nguyên nhân chính gây ra sụp đổ điện áp (SĐĐA) là do hệ thống không đáp ứng đủ nhu cầu tiêu thụ công suất phản kháng (CSPK). SĐĐA có thể là toàn bộ hoặc là một phần. SĐĐA cũng có thể xảy ra với một khu vực trong hệ thống có phụ tải lớn nhưng không có khả năng bảo đảm điện áp trong phạm vi cho phép. Giới hạn đầu phân áp và các động cơ cảm ứng công suất lớn cũng là những nguyên nhân chính gây mất ổn định điện áp. Nhiều nghiên cứu về mất ổn định điện áp đã được thực hiện để đề xuất các biện pháp bảo vệ HTĐ chống lại SĐĐA sự cố này như sa thải phụ tải, sử dụng các máy phát dự phòng,... [1-16]. Trong các biện pháp ngăn ngừa đã đề xuất thì sử dụng Static Var Compensator (SVC) là một trong những biện pháp hiệu quả rõ rệt. Tuy nhiên, do giá thành cao của SVC nên việc xác định vị trí đặt tối ưu của bộ điều khiển này trong hệ thống là bài toán quan trọng đã và đang đặt ra cho các nhà nghiên cứu cũng như những người quy hoạch và thiết kế hệ thống.

Nghiên cứu này tập trung đưa ra phương pháp xác định vị trí đặt SVC dựa theo mô hình lý thuyết giao nhau điểm yên ngựa để nhằm nâng cao ổn định điện áp. Cấu trúc bài báo được trình bày như sau: Mục 2 trình bày tổng quan về mô hình ổn định điện áp và lý thuyết giao nhau điểm yên ngựa. Mô hình hệ thống điện và thiết bị SVC được trình bày trong mục 3. Phương pháp xác định vị trí đặt nhằm nâng cao ổn định điện áp được trình bày trong mục 4. Mô phỏng kiểm chứng và thảo luận được trình bày trong mục 5. Mục 6 trình bày các kết luận chính của nghiên cứu.

2. MÔ HÌNH LÝ THUYẾT ĐIỂM YÊN NGỰA ỨNG DỤNG PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP

2.1. Tổng quan về ổn định điện áp và hiện tượng sụp đổ điện áp

Ổn định điện áp (OĐĐA) là vấn đề nghiên cứu được quan tâm trong nhiều năm qua. Nhiều công trình nghiên cứu đã trình bày về sự quan trọng của OĐĐA và một vài sự cố mất OĐĐA trên thế giới đã cho thấy hậu quả nghiêm trọng của sự cố này như sụt giảm điện áp lớn. Do HTĐ có thể phải vận hành ở những chế độ nặng nề, nên khả năng giữ OĐĐA và các biện pháp tốt cải thiện công suất phản kháng và điều chỉnh điện áp là rất cần thiết. Nếu các tác động điều khiển không hợp lý thì khi phụ tải tăng liên tục, hệ thống có thể mất ổn định. OĐĐA (Voltage Stability) là khả năng của một HTĐ giữ được điện áp. Do đó, khi có sự thay đổi phụ tải (tăng) thì cả công suất và điện áp đều có thể điều khiển được.

SĐĐA (Voltage Collapse) là quá trình mà việc mất OĐĐA dẫn đến sự sụt giảm điện áp trong hệ thống. SĐĐA là một hiện tượng phức tạp và hậu quả của nó là điện áp tại một phần quan trọng trong HTĐ bị giảm rất thấp. Trên thế giới đã xảy ra nhiều hiện tượng SĐĐA như tại Đan Mạch vào tháng 3 năm 1979, Séc vào tháng 7 năm 1985, Anh vào tháng 5 năm 1986 [17]. Như vậy, SĐĐA là một vấn đề thực tế và hậu quả của nó là rất lớn. [17] chỉ ra rằng các sự cố trên xảy ra vì các lý do khác nhau. Do đó, rất nhiều nghiên cứu về SĐĐA đã được thực hiện, ví dụ như [18-19] chỉ ra mối liên quan giữa sụp đổ điện áp và điểm phân nhánh (bifurcation point).

Một hệ thống có thể mất ổn định khi có kích động dẫn đến điện áp giảm mạnh mà người vận hành và các hệ thống điều khiển tự động không cải thiện được điện áp. Nguyên nhân chính gây mất OĐĐA thường là do HTĐ không đáp ứng đủ nhu cầu CSPK. Tuy hệ thống không OĐĐA là hiện tượng mang tính cục bộ nhưng hậu quả của nó lại có thể nghiêm trọng như sự cố SĐĐA. Sự sụt giảm điện áp có thể diễn ra trong vài giây cho tới vài phút. SĐĐA thường xảy ra với các HTĐ nặng tải, hoặc HTĐ có sự cố, hoặc HTĐ thiếu hụt CSPK. Hiện tượng này liên quan tới nhiều phần tử trong hệ thống và thông số của các phần tử đó. Dễ nhận thấy rằng, tuy hiện tượng này thường liên quan đến một khu vực nào đó trong hệ thống nhưng hậu quả của nó lại ảnh hưởng đến cả hệ thống.

Như đã nói ở trên, SĐĐA được phân loại theo giai đoạn quá độ hoặc trong giai đoạn dài hạn. Tuy nhiên, SĐĐA trong giai đoạn dài hạn có thể bao gồm các hậu quả từ giai đoạn quá độ; ví dụ SĐĐA diễn ra chậm trong vài phút có thể kết thúc nếu có sự SĐĐA nhanh xảy ra trong giai đoạn gian quá độ. Bản chất vật lý của hiện tượng SĐĐA chính là yêu cầu CSPK của phụ tải không được đáp ứng đủ do giới hạn về phát và truyền tải CSPK. Các giới hạn về phát CSPK bao gồm giới hạn của các máy phát, giới hạn công suất của SVC và sự sụt giảm CSPK của các tụ ở điện áp thấp. Các giới hạn về truyền tải CSPK là tổn thất CSPK lớn trên các đường dây nặng tải, hoặc có sự cố đường dây dẫn đến giảm công suất truyền tải.

Một số thay đổi trong hệ thống có thể dẫn tới SĐĐA là:

- Phụ tải tăng;
- CSPK giới hạn của máy phát, máy bù đồng bộ hoặc SVC;
- Thao tác với MBA điều áp dưới tải;
- Quá trình khôi phục phụ tải;
- Sự cố đường dây hoặc máy phát.

Hầu hết các thay đổi này có ảnh hưởng rất lớn tới việc phát, truyền tải và tiêu thụ CSPK. Do đó, SĐĐA là vấn đề thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu và công ty điện trong suốt hơn ba mươi năm qua nhằm đề xuất các phương pháp để bảo vệ HTĐ không bị SĐĐA.

2.2. Mô hình lý thuyết điểm yên ngựa

Lý thuyết giao nhau nghiên cứu các diễn biến về chất, ví dụ như mất ổn định, của một hệ thống nào đó khi các thông số của hệ thống này thay đổi từ từ. Vì vậy, lý thuyết giao nhau được áp dụng để mô tả và tính toán các sự thay đổi dẫn đến sự mất ổn định của các HTĐ có độ phức tạp và rộng lớn bất kỳ. Các hiện tượng giao nhau của lý thuyết này được chia thành hai loại chính như sau:

- Giao nhau tại điểm yên ngựa (saddle node bifurcation): hệ thống bị mất ổn định khi các thông số hệ thống thay đổi chậm. Hệ quả của nó là các trạng thái hệ thống sụp đổ động. Sự sụp đổ động của điện áp trong hiện tượng SĐĐA đã được giải thích dựa trên hiện tượng giao nhau này;
- Giao nhau Hopf (Hopf bifurcation): hệ thống bắt đầu dao động khi các thông số hệ thống thay đổi. Hệ quả của nó hoặc là dao động ổn định hoặc là dao động có biên độ lớn dần.

Sự giao nhau tại điểm yên ngựa xảy ra khi có thông số thay đổi gây mất ổn định của hệ thống. Trong các hệ thống liên tục, sự giao nhau ứng với việc phần thực một véc tơ trị riêng của phương trình mô tả hệ thống đi qua điểm 0. Trong các hệ thống rời rạc, sự giao nhau ứng với một điểm có modun bội số Flouent bằng 1. Trong cả hai trường hợp này thì phương trình mô tả hệ thống là không hypebol tại điểm giao nhau. Cụ thể hơn, xét một hệ thống động liên tục được mô tả bằng phương trình vi phân như sau:

$$\dot{x} = f(x,\lambda) \quad f:\mathrm{R}^n \times \mathrm{R} \longrightarrow \mathrm{R}^n \tag{1}$$

Sự giao nhau xảy ra tại (x_0, λ_0) nếu ma trận Jacobi $df_{x_D,\lambda_D} = f(x,\lambda)$ có phần thực một trị riêng bằng 0. Nếu phần ảo trị riêng này bằng 0 thì sự giao nhau này là giao nhau ổn định. Nếu phần ảo trị riêng này khác 0, thì đây là giao nhau Hopf. Do đó, sự giao nhau xảy ra tại (x_0,λ_0) nếu ma trận df_{x_D,λ_D} có mođun một trị riêng bằng một. Nếu trị riêng này bằng 1, thì sự giao nhau này là giao nhau điểm yên ngựa. Nếu trị riêng này bằng -1, thì đây là giao nhau Hopf. Trong khuôn khổ bài báo này, vấn đề giao nhau Hopf không được đề cập nữa.

3. MÔ HÌNH HỆ THỐNG ĐIỆN VÀ THIẾT BỊ SVC

3.1. Mô hình hệ thống điện

Mô hình HTĐ xoay chiều là các mô hình quá độ ổn định [20-22]. Máy phát được mô hình hóa như nguồn áp. Hệ thống truyền tải được mô hình hóa bằng mô hình tống dẫn. Phụ tải là mô hình phụ thuộc điện áp thanh cái cung cấp và tần số hệ thống. Tất cả các phương trình và chi tiết về các mô hình có thể tham khảo trong [13]. Tập hợp các biến trạng thái được xác định từ các phương trình vi phân thành vectơ z, và tất cả các biến trạng thái được xác định từ các phương trình đại số thành vectơ u, thì hệ thống được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} M\dot{z} &= f(z,u,\lambda) \\ 0 &= g(z,u,\lambda) \end{aligned} \tag{2}$$

Trong đó:

- f(.) là hàm vectơ bên phải các phương trình vi phân bên phải;
- g(.) là các ràng buộc đại số;
- M là ma trận xác định dương không đổi.

Nếu g(.) có ma trận khả nghịch $D_u g(.)$, thì các biến đại số có thể loại bỏ theo lý thuyết hàm ẩn [39]. Do đó, mô hình hệ thống được rút gọn như sau:

$$M\dot{z} = \mathrm{f}(z,\mathrm{h}(z,\lambda),\lambda) = \mathrm{s}(z,\lambda) \tag{3}$$

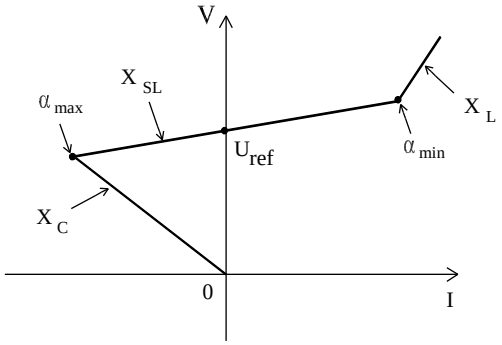
Hiện tượng giao nhau yên ngựa của hệ thống (3) xảy ra khi ma trận Jacobi Dzs(.) suy biến tại điểm cân bằng (z0, λ0). Tại điểm này, hai điểm cân bằng (ổn định và không ổn định) của hệ thống giao nhau và không tồn tại nữa khi biến số λ (ví dụ phụ tải của hệ thống) thay đổi. Lý thuyết giao nhau dựa vào trị riêng của ma trận Jacobi phân bố công suất JPF để phân tích HTĐ. Điểm suy biến của ma trận này giống với điểm của ma trận Jacobi hệ thống động JTS = M-1Dzs(z0, λ0) [19].

3.2. Mô hình SVC

Trong nghiên cứu này, mô hình SVC được xem xét vận hành ở chế độ xác lập. Khi đó, phương trình biểu diễn bằng đặc tính Vôn – Ampe có dạng như sau:

$$U = U_{ref} + X_{SL}.I \tag{4}$$

Trong đó: U là điện áp tại nút đặt SVC; I là dòng điện qua SVC; U_{ref} là điện áp đặt; X_{SL} là điện kháng dốc của SVC. Điện kháng XSL được sử dụng để tránh vi phạm vào các giới hạn khi có các biến động điện áp nhỏ tại nút đặt SVC. XSL thường có giá trị từ 2 đến 5%. Độ lệch của điện áp được điều khiển thường nằm trong khoảng $\pm 5\%$ của điện áp đặt tại U_{ref}. Tại các giới hạn của góc mở thyristor, điện kháng của SVC sẽ được giữ ở một giá trị cố định. Khi thay đổi góc mở α của thyristor, điện dẫn Be = -1/ Xtđ thể hiện được sự thay đổi một cách rõ ràng hơn điện kháng tương đương Xtđ của SVC. Nói cách khác, đường biểu diễn Be(α) không dốc như đường Xtđ(α). Do đó, khi mô hình hoá các thiết bị bù có điều khiển, người ta thường dùng các công thức liên hệ thường sử dụng điện dẫn tương đương Be hơn là các công thức liên hệ sử dụng điện kháng Xtđ, nhờ vậy cũng tránh được các vấn đề về sai số khi xử lý các điểm làm việc ở gần điểm cộng hưởng.



Hình 1. *Đặc tính Vôn – Ampe của SVC.*

Phương pháp được đề cập đến ở mục này là mô hình hoá SVC như một điện kháng có trị số thay đổi. Xét các phương trình mô tả hoạt động ở chế độ quá độ của SVC:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, U, U_{ref}) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} 0 &= \begin{bmatrix} I - U_i.B_e \\ Q - U_i^2.B_e \\ \pi.\mathrm{X_C}.\mathrm{X_L}.B_e + \sin 2\alpha - 2\alpha + \pi\left(2 - \dfrac{X_L}{X_C}\right) \end{bmatrix} \\ &= g(\alpha, U, U_i, I, Q, B_e) \end{aligned} \tag{6}$$

Trong đó, X_C biểu diễn các biến và f biểu diễn các phương trình của hệ thống điều khiển.

Mô hình hoạt động của SVC ở chế độ xác lập được suy ra từ các phương trình mô hình hóa chế độ quá độ bằng cách thay thế phương trình vi phân bằng phương trình đặc tính Vôn – Ampe ở chế độ xác lập của SVC. Các phương trình mô tả hoạt động của SVC ở chế độ xác lập:

$$0 = \begin{bmatrix} U - U_{ref} + X_{SL}.I \\ g(\alpha, U, U_i, I, Q, B_e) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Chương trình tính toán lúc này sử dụng phép lặp với thông số được rời rạc hoá, với giả thiết ban đầu về mức điện kháng đẳng trị. Giá trị ban đầu này được chọn dựa trên suy đoán mặc định ban đầu của người sử dụng hoặc dựa trên giá trị ban đầu của các biến xoay chiều và đặc tính của điện dẫn Be(α). Lúc này quá trình tính toán cho phép xác định được điện áp tại nút đặt SVC. Nếu điện áp cao hơn trị số đặt, phép lặp sẽ giảm trị số điện kháng tức tăng công suất tiêu thụ (hay giảm công suất phát) của SVC. Ngược lại, nếu điện áp thấp hơn trị số đặt thì phép lặp sẽ tăng trị số điện kháng tức giảm công suất tiêu thụ (hay tăng công suất phát) của SVC.

4. PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ ĐẶT SVC

4.1. Thuật toán

Để giải quyết vấn đề suy biến của các phương trình mô tả hệ thống, thuật toán này xác định điểm giao nhau của hệ thống bằng cách liên tục tính nghiệm của các phương trình phân bố công suất s(z, λ) = 0 với λ là hệ số tải thay đổi. Thuật toán được trình bày chi tiết trong [9] bao gồm 3 bước (hình 4.1) sau:

Bước 1: Bước dự đoán

Từ điểm vận hành ban đầu, điểm vận hành mới trong hệ thống được xác định bằng vectơ tiếp tuyến với quỹ đạo hệ thống và giá trị bước thay đổi. Về mặt toán học, đường tiếp tuyến này được xác định bởi hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} D_z s(z_0, p_0)\frac{dz}{dp} &= -\left.\frac{\delta s}{\delta p}\right|_0 \\ \Delta p &= \frac{k}{\|dz/dp\|} \\ \Delta z &= \Delta p \frac{dz}{dp} \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó:

- $D_z s(z_0, p_0)$ là ma trận Jacobi tại điểm vận hành ban đầu;
- $\left.\frac{\delta s}{\delta p}\right|_0$ là đạo hàm của phương trình hệ thống theo tham số p (giá trị đầu của p là λ). Giá trị của p phụ thuộc vào bước tham số hóa;
- k là hằng số (thường chọn bằng 1).

Phụ tải của hệ thống được xác định như sau:

$$\begin{aligned} P_L &= P_{Lo}(1 + \lambda) \\ Q_L &= Q_{Lo}(1 + \lambda) \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó:

- P_{Lo} là giá trị công suất tác dụng tại thanh cái L tại điểm vận hành đầu;
- Q_{Lo} là giá trị công suất phản kháng tại thanh cái L tại điểm vận hành đầu;

- λ là hệ số tăng tải.

Bước 2: Bước sửa chữa

Sử dụng kết quả tính toán điểm vận hành ở bước dự đoán, giao điểm giữa quỹ đạo hệ thống và đường vuông góc với vectơ tiếp tuyến được xác định theo phương trình sau:

$$\begin{aligned} & s(z, p) = 0 \\ & \Delta p(p - p_0 - \Delta p) + \Delta z^T (z - z_0 - \Delta z) = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

Trong đó: Δp và Δz xác định từ bước dự đoán.

Giá trị ước đoán đầu của z và p tương ứng là z0 + Δz và p0 + Δp. Nếu phương trình (10) không có nghiệm thì giá trị Δp và Δz được giảm đi một nửa cho đến khi có nghiệm.

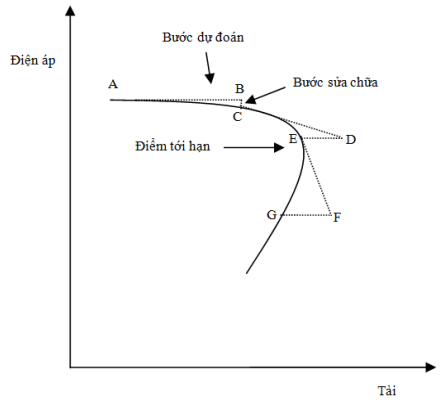
Bước 3: Tham số hóa

Sự thay đổi trong hệ thống sẽ được kiểm tra ở bước tham số hóa. p được hoán đổi bằng biến có sự thay đổi lớn nhất như sau:

$$p \leftrightarrow \max\left\{\left\|\frac{\Delta z_i}{z_i}\right\|, \left\|\frac{\Delta p_i}{p_i}\right\|\right\} = 0 \tag{11}$$

Trong đó: i = 1, ..., n.

Ma trận Jacobi của phương trình 4.4 suy biến tại điểm SĐĐA ngay cả khi p = λ [12]. Nghĩa là, thuật toán này xoay quanh điểm giao nhau, nên phần không ổn định của quỹ đạo nghiệm xác định được.



Hình 2. *Các bước tính toán của phương pháp phân bố công suất liên tục.*

Giải thích thuật toán: Giả sử A là điểm cân bằng ban đầu đã biết. Từ A vẽ một đường tiếp tuyến dự đoán hướng của điểm B ứng với giá trị phụ tải tăng (bước dự đoán). Với giả thiết phụ tải hệ thống không đổi, nghiệm chính xác C được xác định bằng các thuật toán phân bố công suất truyền thống (bước sửa chữa). Quá trình này được lặp lại liên tục. Nếu điểm dự đoán mới D lớn hơn điểm giới hạn công suất, thì khi đó bước sửa chữa bị phân kỳ. Do đó, bước sửa chữa coi điện áp là cố định để tìm chính xác nghiệm E (bước tham số hóa). Từ đây, độ lớn giá trị phụ tải thay đổi được giảm dần trong các bước lặp tiếp theo để xác định chính xác điểm công suất giới hạn.

4.2. Xác định thanh cái (khu vực) dễ bị mất ổn định điện áp

Khi phân tích OĐĐA, cùng với chỉ số giới hạn công suất truyền tải, người ta còn quan tâm đến khu vực hoặc thanh cái nào trong hệ thống dễ bị mất ổn định. Khu vực hoặc các thanh cái này có thể được xác định bằng trị riêng của ma trận Jacobi phương trình phân bố công suất tại điểm giới hạn công suất truyền tải.

4.2.1. Phân tích giá trị suy biến

Xét ma trận vuông n x n Jacobi J = $D_zF(z_0, \lambda_0)$ tại điểm cân bằng (z_0, λ_0), ta có:

$$J = R\sum S^T = \sum_{i=1}^{n} r_i \sigma_i s_i^T \tag{12}$$

Trong đó:

- r_i là cột thứ i của ma trân đơn vị R;

- s_i là vectơ cột thứ i của ma trận đơn vị S;

- Σ là ma trận đường chéo phần thực các suy biến dương σ_i sao cho $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \ldots \geq \sigma_n$.

Phương trình (12) thường được dùng để xác định hạng của ma trận (số lượng các giá trị suy biến của J khác 0).

Do ma trận Jacobian có đạo hàm bậc một của các phương trình cân bằng công suất phản kháng Q(z, λ) theo điện áp V∈ z, nên tuyến tính hóa phương trình F(z, λ) = 0 tại điểm cân bằng (z0, λ0), ta có:

$$\Delta F(z,\lambda) = J\Delta z$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta\hat{F}(\hat{z},V,\lambda) \\ \Delta Q(\hat{z},V,\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\hat{F}}{\partial\hat{z}}(z_0,\lambda_0) & \frac{\partial\hat{F}}{\partial V}(z_0,\lambda_0) \\ \frac{\partial Q}{\partial\hat{z}}(z_0,\lambda_0) & \frac{\partial Q}{\partial V}(z_0,\lambda_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{z} \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{z} \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Trong đó:

- $\hat{F}(z,\lambda)$ là độ lệch công suất tác dụng P(z, λ);

- z là góc δ.

Phương trình (13) được biến đổi thành phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{z} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n} \delta_i^{-1} s_i r_i^T \begin{bmatrix} \Delta\hat{F}(\hat{z},V,\lambda) \\ \Delta Q(\hat{z},V,\lambda) \end{bmatrix} \tag{14}$$

Cần chú ý rằng, giá trị suy biến nhỏ nhất là đại lượng cho biết hệ thống gần điểm SĐĐA (hay điểm suy biến) thế nào. Hơn nữa, vì σn ≈ 0 khi hệ thống lân cận điểm SĐĐA, nên phương trình (14) được viết lại như sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{z} \\ \Delta V \end{bmatrix} \approx \delta_i^{-1} s_i r_i^T \begin{bmatrix} \Delta\hat{F}(\hat{z},V,\lambda) \\ \Delta Q(\hat{z},V,\lambda) \end{bmatrix} \tag{15}$$

Có thể thấy rằng, vectơ suy biến phải sn phản ánh thông tin hữu ích về OĐĐA. Các giá trị lớn nhất của sn chỉ ra các thanh cái nhạy cảm nhất về điện áp trong hệ thống (các thanh cái nguy hiểm). Các giá trị lớn nhất của rn ứng với các thanh cái trong hệ thống nhạy cảm nhất về công suất tác dụng.

Giả thiết rằng $\Delta\hat{F}(\hat{z},V,\lambda) = 0$, thì phương trình (15) có dạng:

$$\Delta Q(\hat{z},V,\lambda) = (J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2)\Delta V \tag{16}$$

$$= J_{QV}\Delta V$$

Nói chung, tại điểm SĐĐA ma trận J suy biến nhưng J_1 không suy biến. Do đó, ma trận J_{QV} trở nên suy biến tại điểm SĐĐAP vì:

$$\det J_{QV} = \frac{\det J}{\det J_1} \tag{17}$$

Các giá trị suy biến của ma trận rút gọn này được dùng để xác định lân cận điểm SĐĐA.

4.2.2. Phân tích vectơ trị riêng

Xét ma trận vuông n x n Jacobi J = $D_zF(z_0, \lambda_0)$ tại điểm cân bằng (z_0, λ_0), ta có:

$$J = WAU^T = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \mu_i v_i^T \tag{18}$$

Trong đó:

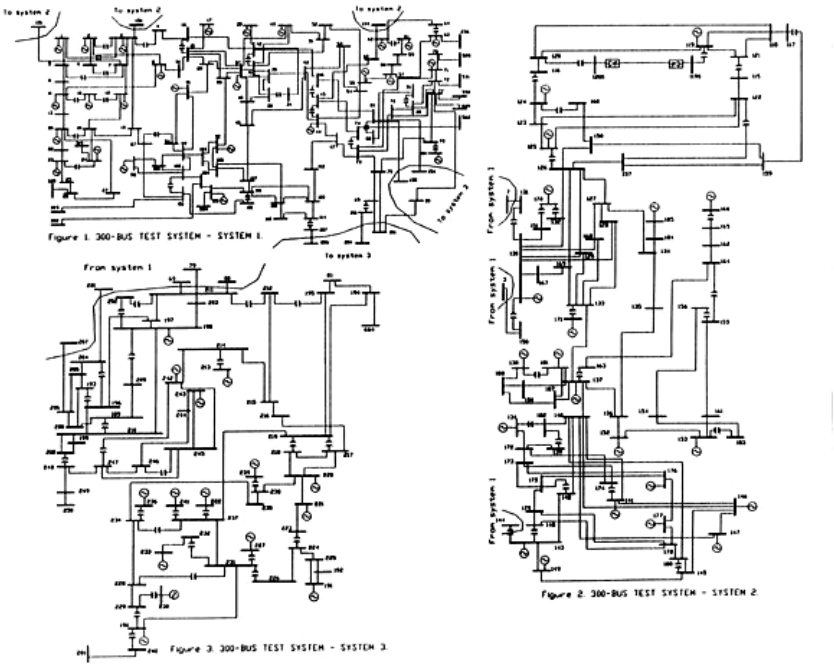
- W là ma trận phức các vector trị riêng phải ω_i;
- U là ma trận phức các vectơ trị riêng trái v_i;
- A là ma trận đường chéo của các trị riêng μ_i.

Phân tích tương tự như với trường hợp giá trị suy biến, ta cũng có chung kết luận. Các giá trị lớn nhất của ϖi phản ánh các thanh cái nhạy cảm nhất về điện áp trong hệ thống. Các giá trị lớn nhất của v_i cho biết các thanh cái trong hệ thống nhạy cảm nhất về công suất tác dụng.

Như đã trình bày trong phần 2, trên quỹ đạo nghiệm của hệ phương trình phân bố công suất, các nghiệm ổn định và không ổn định tiến lại gần nhau và gặp nhau tại điểm giao nhau yên ngựa khi phụ tải tăng. Điểm giao nhau gây mất ODĐA này còn là giới hạn công suất truyền tải. Trên cơ sở phân tích trị riêng của ma trận Jacobi tại điểm giao nhau, vectơ trị riêng phải cho biết thanh cái nào trong hệ thống đóng góp nhiều nhất dẫn đến SĐĐA. Do đó, thanh cái có giá trị riêng phải lớn nhất sẽ được lựa chọn để đặt SVC.

5. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

5.1. Hệ thống điện mô phỏng



Hình 3. *Sơ đồ hệ thống 300 nút của IEEE [23].*

Hệ thống IEEE – 300 [23] được sử dụng là sơ đồ tính toán để kiểm chứng hiệu quả của phương pháp đặt SVC đề xuất trong mục trước. Hệ thống này có 68 máy phát, 231 phụ tải và 411 đường dây và các máy biến áp. Mô hình của SVC được dùng là mô hình trạng thái ổn định (được trình bày tại phần 3).

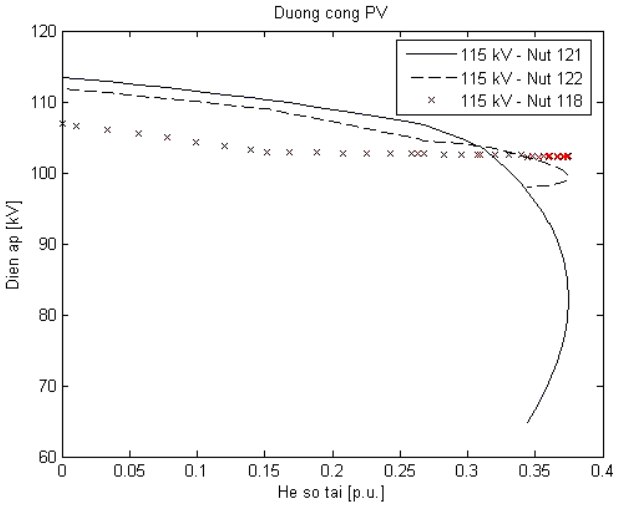
5.2. Phần mềm tính toán

Phần mềm tính toán trong nghiên cứu này là phần mềm UWPFLOW [16] được phát triển bằng ngôn ngữ C và C++ bởi nhóm các nhà nghiên cứu thuộc Đại học Waterloo, Canada. Ưu điểm của phần mềm là kích cỡ của hệ thống nghiên cứu không bị hạn chế. Phần mềm sử dụng thuật toán phân bố công suất liên lục để tính toán các điểm giao nhau yên ngựa, các suy biến của ma trận Jacobi, vector tiếp tuyến, vector trái, vector phải tại điểm giao nhau yên ngựa, ma trận Jacobi, phân bố công suất tại các mức phụ tải khác nhau,... Phần mềm có các tính năng chính sau:

- Có các mô hình ở trạng thái ổn định của máy phát và giới hạn điều khiển của chúng;
- Có các mô hình phụ tải phụ thuộc điện áp để phục vụ cho nghiên cứu OĐĐA;
- Mô hình hóa các thiết bị FACTS (SVC, TCSC, STATCOM) và các tác động điều khiển của chúng trong giới hạn cho phép;
- Kết quả tính toán có thể xuất thành các file định dạng m của Matlab và IEEE để tiện lợi cho việc phân tích và vẽ đồ thị;
- Có tính năng vẽ đường cong PV.

5.3. Kết quả tính toán

Để áp dụng lý thuyết giao nhau, phụ tải hệ thống có hệ số công suất không thay đổi được tăng dần theo công thức (4.13) với hệ số tải. Tổng công suất tác dụng của phụ tải trong trường hợp cơ bản là 23080 MW. Với giá trị λ này, công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải hệ thống được tăng rời rạc từ từ. Đồ thị PV của 3 nút có điện áp thay đổi nhiều nhất theo sự thay đổi của công suất phụ tải trong hệ thống được thể hiện trên hình 4.3. Dễ thấy rằng, các đường PV khá bằng phẳng, nên nghĩa là khả năng điều chỉnh điện áp trong hệ thống là đáng kể. Thuật toán dòng công suất liên tục được áp dụng để tìm miền ổn định của hệ thống quanh điểm SĐĐA. Kết quả tính toán cho thấy, điểm giao nhau (điểm SĐĐA) có λ = 0.374347 (p.u) ứng với công suất truyền tải giới hạn khoảng 31720 MW.



Hình 4. *Đường cong PV.*

Kết quả phân tích vectơ trị riêng phải tại điểm giao nhau chỉ ra rằng nút thiếu hỗ trợ về CSPK nhất là nút 121. Giá trị trị riêng của 3 nút trên được thể hiện trong bảng 1. Do đó, vị trí đặt tối ưu của SVC được chọn là nút 121.

Bảng 1. *Giá trị riêng phải.*

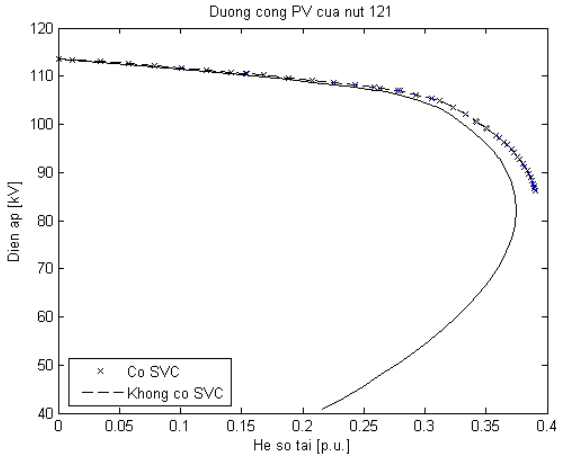
Nút	121	122	118
Trị riêng phải	0.084387	0.0022629	0.0018854

SVC được nối với nút 121 qua một máy biến áp hạ áp. Điện áp phía hạ của MBA là 26 kV. Trong luận văn này, bài toán xác định dung lượng của SVC không được xét đến. Các thông số của SVC được lựa chọn trong bảng 2 [8].

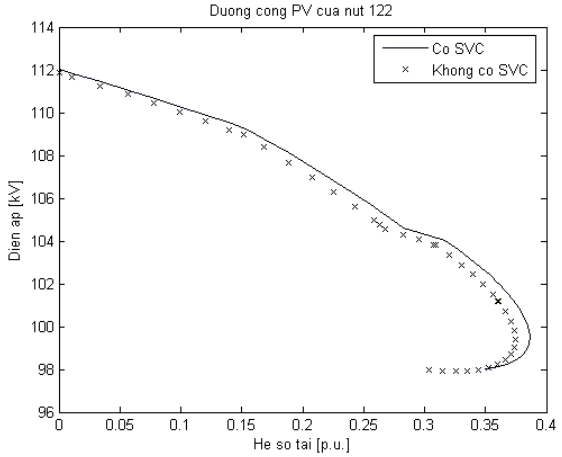
Bảng 2. *Các thông số của SVC.*

Xc(p.u)	X_L(p.u.)	α_{min}(độ)	α_{max}(độ)	Độ nghiêng (%)	Công suất (MVar)	Điện áp (kV)
1,1708	0,4925	90	175	2	±200	26

Đồ thị PV của nút 121 khi có đặt SVC được thể hiện trên hình 4.5. Điểm giao nhau xảy ra tại λ = 0.39041. Dễ thấy rằng, điện áp của nút 121 được cải thiện đáng kể do hiệu quả tác động của SVC.



Hình 5. *Đường cong PV của nút 121.*



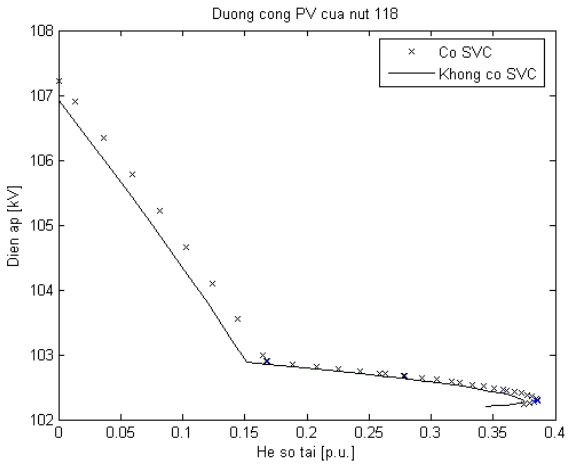
Hình 6. *Đường cong PV của nút 122.*

Kết quả tính toán của trường hợp nút 121 có SVC chỉ ra rằng, tổng công suất tác dụng của hệ thống tại điểm SĐĐA là 32091 MW (λ = 0.39041), tăng thêm 1,6% tổng công suất tác dụng của trường hợp cơ bản. So với trường hợp không đặt SVC, hệ thống có khả năng truyền tải thêm một lượng công suất là 370 MW khi đặt SVC tại nút 121.

Để chỉ ra hiệu quả của vị trí đặt SVC được lựa chọn, giới hạn công suất truyền tải của hệ thống được tính với các trường hợp SVC đặt tại nút 118 và 122. Giá trị λ (p.u.) của các trường hợp này được trình bày trong bảng 3. Bảng 4 thể hiện các giá trị công suất truyền tải lớn nhất của hệ thống trong các trường hợp đặt SVC tại các nút khác nhau.

Bảng 3. *So sánh ảnh hưởng của các vị trí đặt SVC tới λ.*

	Không có SVC	Có SVC		
		121	122	118
λ (p.u)	0.374347	0.39041	0.386279	0.386023



Hình 7. *Đường cong PV của nút 118.*

Bảng 4. *So sánh công suất truyền tải giới hạn.*

	Không có SVC	Có SVC		
		121	122	118
P (MW)	31720	32090	31995	31975

Bảng 5. *Lượng công suất truyền tải tăng thêm khi có SVC.*

	Có SVC		
	121	122	118
P (MW)	370	275	232

Từ bảng 4 – bảng 5, ta thấy rằng đặt SVC vào nút 121 thì giới hạn công suất truyền tải được cải thiện nhất. Dễ thấy rằng, thì giới hạn công suất truyền tải giảm đi 0,41% nếu cũng dùng SVC đó tại nút 122. Tương tự, nếu đặt SVC ở nút 118, thì giới hạn công suất truyền tải bị giảm lên đến 0.59%. Tóm lại, nút 121 là nút tối ưu để đặt SVC vì giới hạn công suất truyền tải được nâng cao nhất và điện áp của nút cũng bằng phẳng hơn.

4. KẾT LUẬN

SĐĐA là một sự cố nghiêm trọng trong HTĐ. Với lý thuyết giao nhau tại điểm yên ngựa, hiện tượng này hoàn toàn được giải thích rõ ràng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã ứng dụng lý thuyết giao nhau tại điểm yên ngựa vào xác định thanh cái dễ mất ODĐA nhất để

tiến hành đặt thiết bị SVC nhằm nâng cao mức OĐĐA tĩnh. Phương pháp trình bày trong nghiên cứu hiệu quả trong bài toán xác định vị trí tối ưu của SVC để nâng cao ổn định của hệ thống. Tiếp tục mở rộng hướng nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ đưa bài toán tìm vị trí đặt SVC kết hợp xác định dung lượng và số lượng tối ưu đặt SVC trong hệ thống điện. Ngoài ra, một hướng nghiên cứu nữa là phân tích, so sánh hiệu quả nâng cao OĐĐA cả về kinh tế và kỹ thuật của một số thiết bị FACTS như SVC, TCSC và STATCOM trong bài toán nâng cao OĐĐA của hệ thống điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. A. Monticelli, M.V.F Pereia and S. Granville, "*Security constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling",* IEEE Trans. On Power Systems, Vol. PWRS-2, No.2,pp, 175-182, February 1987.

[2]. A. Nanda and M.L. Crow, "*An energy based approach to undervoltage load shedding"*, Electric Power Systems Research, Vol. 32, pp. 11-18,1995.

[3]. R.C. Burchett and H.H.Happ, "*Large scale security dispatching: An exact model"*, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. PAS -102, No.9, pp. 2995 -2999, 9/1983.

[4]. S. Granville, "*Optimal reactive power dispatch through interior point methods"*, IEEE Trans. On Power System, Vol. 9, No. 1, pp 136-146, 2/1994.

[5]. N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "*Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System",* IEEE Press, 2000.

[6]. B. Vardani, *"Optimimum Location of SVC in an IEEE 33 Bus Radial Distribution System Using Power Sensitivity Index"*, 2019 Internation Conf. on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), India, Nov. 2019.

[7]. M. P. Babu; B. R. Lakshmikantha; and K. S. Sundar, *"A Novel Method for Assessment of Voltage Stabitlity Improvement of Radian Distribution System Using SVC at Optimal Location",* 2018 International Conf. on Electrical, Electronics, Comunication, Computer, and Optimization Techniques, 2018.

[8]. Sebastian Wildenhues, Jose L. Rueda and Istvan Erlich, *"Optimal Allocation and Sizing of Dynamic Var Sources Using Heuristic Optimization"*, IEEE Transaction on power system, vol. 30, no. 5, September 2015.

[9]. Pooja P. Kulkarni and N.D. Ghawghawe, *"Optimal Placement and parameter setting of TCSC in Power Transmission System to increase the Power Transfer Capability"*, International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA-2015).

[10]. Kabir Chakraborty, Gagari Deb and Sumita Deb, *"Voltage Stability Assessment in Radial Distribution System by Line Stability Indicator (LSI) and its Improvement using SVC"*, 1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems, 2016.

[11]. Nikhlesh Kumar Sharma, Arindam Ghosh, Rajiv Kumar Varma, *"A novel placement strategy for FACTS controllers",* IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 18,No.3, pp. 982-987, July 2003.

[12]. M. J.Laufenberg, M.A. Pai and K.R. Padiyar, *"Hopf bifurcation control in power systems with static Var compensators"*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 5, pp. 339-347, 1997.

[13]. Naoto Yorino, E. E. El- Araby, Hiroshi Sasaki, Shigemi Harada, *"A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse"*, IEEE Trans. On power systems, Vol. 18, No. 1, pp 3-10,2/2003.

[14]. Hal Feng Wang, H. Li, H. chen, *"Coordinated secondary voltage control to eliminate violations in power system contingencies",* IEEE Trans. On Power Systems, Vol.18, No. 2, pp. 588-595, May 2003.

[15]. V. Ajjarapu and C. Christy, "*The continuation Power Flow: A tool for steady state voltage stability analysis"*, IEEE Trans. On Power systems, Vol. 7, No.1,pp. 416-423, 2/1992.
[16]. "UWPFLOW software: "*Continuation and Direct Methods to locate Fold Bifurcations in AC/DC/ FACTS Power Sytems"* by Claudio A. Canizares and Fernando L. Alvarado.
[17]. CIGRE WG 38.02 Task Force No 10, *"Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena"* technical report of task force 38-02-10, draft 3, CIGRE, June 1992.
[18]. R.B. Prada, B.j. Cory and R. Navarro Perez, "*Assessment of steady state voltage collapse"* Proc. of the Tenth Power Systems Computation Conference, Graz, Austria, August 1990, pp. 1599 - 1195.
[19]. V, Ajjarapu, "*Identification of steady state voltage stability in power system"* Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry, March 1988, pp. 244 – 247.
[20]. C. A. Canizares and F. L. Alvarado, "*Point of Collapse and continuation Methods for Large AC/DC Systems*," IEEE Trans. Power Systems, Vol. *, No.1, February 1993, ph-¬ng ph¸p.1-8.
[21]. C. A. Canizares, F. l. Alvarado, C. L. DeMarco, I. Dobson and W. F. Long, "*Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems*,", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 7, No.2, May 1992, p.p. 673-683.
[22]. J. Arrillaga and C.P. Arnold, *Computer Analysis of Power Systems*, John Wiley, 1990.
[23]. Mike Adibi, *"The IEEE 300 bus test case,"* developed by IEEE Test Systems Task Force in 1993.

ABSTRACT

A METHOD BASED ON THE SADDLE NODE BIFURCATION TO DETERMINE AN OPTIMAL LOCATION OF SVC FOR IMPROVEMENT OF VOLTAGE STABILITY OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM

The phenomenon of voltage instability and voltage collapse in the power system are particularly severe problems. Many publications analyze and evaluate the phenomena of voltage disturbance, voltage stability, and solutions to improve the power system's voltage stability. In particular, the solution for applying the SVC equipment (Static Var Compensator) to help improve voltage stability has proven effective. However, due to the high cost of the SVC equipment, determining the SVC location to improve the best voltage is essential, especially for the Vietnamese power system. In this paper, the method of applying the saddle point intersection theory to determine SVC's optimal location to help improve the system voltage was presented. The simulation results were performed on UPFLOW software with a test case of the IEEE-300 bus test system.

Keywords: Voltage stability; Voltage collapse; SVC; UPFLOW.

Nhận bài ngày 27 tháng 8 năm 2020
Hoàn thiện ngày 08 tháng 10 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 15 tháng 10 năm 2020

Địa chỉ: Khoa Công nghệ Năng lượng/Trường Đại học Điện lực.
*Email: ducnh@epu.edu.vn.