

ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT ĐIỂM ỔN ĐỊNH HOPF TRONG VIỆC NGHIÊN CỨU DAO ĐỘNG HỆ THỐNG ĐIỆN

APPLICATION OF HOPF BIFURCATION TO ANALYZE POWER SYSTEM OSCILLATIONS

Dương Hoài Nam¹, Nguyễn Đăng Toàn²

¹Công ty tư vấn điện 2 - TP Hồ Chí Minh, ²Trường Đại học Điện lực

Tóm tắt: Bài báo trình bày ứng dụng của lý thuyết ổn định Hopf (HB) trong việc nghiên cứu dao động hệ thống điện. Mô hình nghiên cứu HB, cũng như phương pháp tiếp tuyến liên tục để tìm các điểm cân bằng cũng được trình bày ngắn gọn. Các chỉ số ổn định HB như EVI, HBI1 và HBI2 cũng được đề xuất để đánh giá, xếp hạng các sự cố ngẫu nhiên có thể xảy ra trong hệ thống điện. Ứng dụng với hệ thống chuẩn IEEE 14 nút cho các trường hợp cơ bản, và khi mất đường dây đã giúp cho quá trình phân tích dao động và tìm ra điểm mất ổn định Hopf trong hệ thống điện. Các kết quả nghiên cứu về việc tìm nhanh điểm mất ổn định Hopf có thể áp dụng cho việc ngăn chặn dao động trong các hệ thống điện lớn.

Từ khóa: Giá trị riêng, điểm mất ổn định Hopf (HB), ổn định hệ thống điện, chỉ số HB; hệ thống IEEE 14 nút.

Abstract: This paper presents the application of Hopf bifurcation theory in power system oscillation analysis. The paper also briefly introduces the power system model for Hopf bifurcation analysis and continuation power flow method to determine equilibrium points. The Hopf bifurcation indices such as EVI, HBI1 and HBI2 are also proposed for contingency ranking. Application of IEEE 14 bus system for line outage and base case could help analyze power system oscillations and find the Hopf bifurcation point. The computed results can be applied to large power systems in terms of oscillation prevention.

Keywords: Eigenvalue, Hopf bifurcation, Power system stability, Hopf bifurcation indices; IEEE 14 bus.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH HOPF

Dao động hệ thống điện (HTĐ) đã nhận được nhiều quan tâm của các nhà nghiên cứu HTĐ [1]. Dao động HTĐ liên quan đến HB đã được ghi nhận trong thực tế tại sự cố ở Mỹ-1996 và qua việc được mô phỏng trên các HTĐ chuẩn. Để nghiên cứu hiện tượng dao động HTĐ, người ta thường dùng phương pháp giá trị riêng và các ma trận liên quan, tuy nhiên để phân tích sâu hơn các tính chất của sự dao động có thể dùng lý thuyết ổn định HOPF (HB). Lý thuyết HOPF mô tả các vấn đề về dao động HTĐ do sự thay đổi tần số căn, mô men điện và việc điều chỉnh điện áp sau khi HTĐ trải qua các kích động.

Bằng việc xác định và điều khiển điểm mất ổn định HOPF mà ta có thể tránh được các tan rã HTĐ. Thông thường người ta hay dùng phương pháp số, phân tích giá trị riêng, hay đánh giá các chỉ số về HOPF khi có các sự cố giả định như mất đường dây, máy phát điện... vì các sự cố này làm giảm độ dự trữ ổn định của HTĐ [2].

Các hướng tiếp cận chủ yếu để xác định điểm mất ổn định HB là: giám sát các giá trị riêng để xác định cặp nghiệm phức liên hợp hoàn toàn ảo của ma trận trạng thái. Do đó phần thực của giá trị riêng tới hạn được coi là một chỉ số để xác định giới hạn HB. Cùng với yêu cầu về thuật toán tối ưu, phương pháp này sẽ dẫn đến việc tính toán rất lớn và vấn đề hội tụ của bài toán tối ưu. Tài liệu [2] [3], đã giới thiệu các chỉ số

dùng để dự đoán điểm HB bằng cách cho phụ tải thay đổi từ từ cho đến khi xác định được điểm mất ổn định gần với điểm mất ổn định HB. Phương pháp này có thể ứng dụng cho bất cứ hệ thống phi tuyến nào, và cả điểm mất ổn định thông thường (Saddle bifurcation). Các mô hình toán học nghiên cứu ổn định của HTĐ bao gồm một tập các phương trình vi phân và đại số để biểu diễn các thiết bị như MPĐ, MBA, thanh góp, đường dây, tải, FACTS [4]. Một kỹ thuật để loại trừ mất ổn định Hopf là tìm điểm mất ổn định ngược thông qua sự thay đổi tối ưu các thông số [9]. Bài báo [10] gợi ý một hướng tiếp cận dùng để thiết kế chu kỳ giới hạn với sự dao động của một HTĐ bằng cách chống lại sự điều khiển HB. Ngoài ra, các tài liệu tham khảo khác về lý thuyết ổn định của HTĐ cũng phải giải các ma trận Jacobian, bao gồm cả phương pháp trực tiếp và tiếp tuyến liên tục [5] để xác định điểm và các loại mất ổn định. Với sự phát triển công nghệ thông tin, các phần mềm tính toán đã được phát triển để phân tích HB như ETMSP và MASS (trong phần mềm PSAPAC), PST, UWPFLOW [2] [6] [7] [8], [11]. Trong bài báo này, các chỉ số HB dựa trên việc phân tích giá trị riêng được thảo luận với ứng dụng các chức năng của gói công cụ Power System Toolbox - MATLAB và các chương trình MATLAB và PST version 2.

2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU HTĐ VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍNH HB

HB có tính chất quỹ đạo chu kỳ tăng dần xung quanh điểm cân bằng. Điểm

mất ổn định xuất phát từ khái niệm khi các nhánh khác nhau của các điểm cân bằng cắt lẫn nhau và do đó tạo ra điểm giới hạn mất ổn định. Tại điểm giới hạn này có thể xảy ra bất cứ sự thay đổi về tính chất ổn định. Thường có hai loại là: mất ổn định nội bộ, và mất ổn định toàn bộ dựa trên tính chất động của HTĐ và điểm cân bằng hiện tại [2], [12].

Một HTĐ có thể được phân tích bằng hệ vi phân

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, y, \lambda, p) \\ g(x, y, \lambda, p) \end{bmatrix} = F(z, \lambda, p) \quad (1)$$

$$\text{Hay } \begin{bmatrix} \Delta x \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_4 & J_3 \end{bmatrix}}_J \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Với: J là ma trận Jacobian. Khi mà J_4 không suy biến thì

$$\Delta \dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x = A \Delta x \quad (3)$$

với: A là ma trận biến trạng thái rút gọn.

Điều kiện để xảy ra mất ổn định Hopf là khi: cặp nghiệm phức liên hợp tiến đến cặp nghiệm hoàn toàn ảo liên hợp với sự thay đổi của thông số (λ, p) , gọi $(x_0, y_0, \lambda_0, p_0)$, là điểm mất ổn định Hopf, tại đó thỏa mãn điều kiện: $[f(x_0, y_0, \lambda_0, p_0) g(x_0, y_0, \lambda_0, p_0)]^T = 0$ với cặp nghiệm $\mu = \pm j\beta$. Mức độ thay đổi của phần thực của giá trị riêng nguy kịch với thông số $\lambda_i \neq 0$.

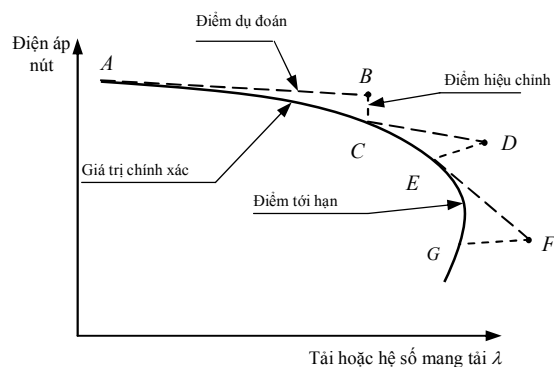
2.1. Phương pháp tiếp tuyến liên tục

Mục tiêu của phương pháp tiếp tuyến

liên tục (CPF) là để tìm các nghiệm liên tục của bài toán trào lưu công suất cho một kịch bản thay đổi của tải. Nó thường dùng để tìm giới hạn tải trên đường cong PV, đồng thời xác định khả năng mang tải của một HTĐ. Phương pháp này cũng cung cấp các thông tin độ nhạy khi các thông số thay đổi. Phương pháp CPF là một quá trình lặp gồm bước dự đoán và bước hiệu chỉnh.

Từ điểm ban đầu A, một tiếp tuyến dự đoán để dự đoán nghiệm tại B khi phụ tải tăng đặc trưng bởi thông số λ . Bước hiệu chỉnh sẽ xác định chính xác nghiệm (C) bằng cách dùng một chương trình tính toán trào lưu công suất thông thường cộng với một phương trình để xác định chính xác giá trị λ . Quá trình cứ tiếp tục cho đến khi nhận được đường cong P-V [1],[13].

Mỗi điểm khác “điểm sụp đổ” và nằm phía trên của đường cong PV sẽ là một điểm cân bằng. Để xác định HTĐ nghiên cứu có điểm HB hay không, thì cần phải tính toán giá trị riêng tại mỗi điểm cân bằng của HTĐ.



Hình 1. Các bước tính toán của phương pháp CPF

2.2. Phân tích giá trị riêng và các chỉ số HB

Giá trị riêng của ma trận xác định bởi phương trình (4)

$$Av = \mu v \text{ hay } (A - \mu I)v = 0 \quad (4)$$

Với: A : $n \times n$ là ma trận biến trạng thái, v : $n \times 1$ véc tơ riêng phải, Với một nghiệm không tầm thường thì: $\det(A - \mu I) = 0$ có n nghiệm $\mu = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ là các giá trị riêng của ma trận A . Khi tất cả các giá trị riêng có phần thực âm, ngoại trừ một cặp nghiệm liên hợp với phần thực bằng 0, và phần ảo liên hợp thì hệ thống dao động.

3. XẾP HẠNG THEO CÁC CHỈ SỐ HB

Người ta thường dùng một chỉ số để xác định sự liên hệ giữa HTĐ và điểm mất ổn định HB khi một thông số nào đó thay đổi. Chỉ số sẽ hữu ích trong việc điều khiển và vận hành HTĐ.

3.1. Chỉ số giá trị riêng

Theo định nghĩa về HB, phần thực của cặp nghiệm liên hợp sẽ cắt trục ảo (giá trị tới hạn) sẽ được dùng là một chỉ số để dự đoán điểm HB. do đó ta có chỉ số EVI (Eigenvalue Index -EVI)

$$EVI = |\alpha| \quad (5)$$

với: α là phần thực của giá trị nghiệm tới hạn μ .

3.2. Chỉ số thứ nhất (First Index-HBI₁)

Tại điểm mất ổn định Hopf thì ma trận Jacobian có một cặp nghiệm hoàn toàn

ảo nên ta có phương trình:

$$A[v_R \pm jv_I] = [\alpha \pm j\beta][v_R \pm jv_I] \quad (6)$$

Với: A là ma trận Jacobian rút gọn.

α, β là phần thực và phần ảo của giá trị tới hạn μ , tương ứng với véc tơ riêng $v_R + jv_I$.

Nếu phần thực và phần ảo được tách ra khỏi (3.2)

$$(A - \alpha I_n)v_R + \beta v_I = 0$$

$$(A - \alpha I_n)v_I + \beta v_R = 0$$

$$\left(\underbrace{\begin{bmatrix} A & +\beta I_n \\ -\beta I_n & A \end{bmatrix}}_{A_m} - \alpha I_{2n} \right) \begin{bmatrix} v_R \\ v_I \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Hơn nữa $[v_R \ v_I]^T \neq 0$ và $\alpha = 0$ tại điểm HB, do đó ma trận rút gọn A_m trở nên suy biến. Giá trị suy biến của ma trận trạng thái rút gọn được dùng như một chỉ số để tìm điểm mất ổn định HB. Vậy chỉ số thứ nhất được xác định như sau

$$HBI_1(A, \beta) = \sigma_{\min}(A_m) \quad (8)$$

Với: σ_{\min} là giá trị suy biến nhỏ nhất của ma trận trạng thái rút gọn A_m , sẽ có giá trị 0 tại điểm HB.

3.3. Chỉ số thứ 2: (HBI₂)

Chỉ số HBI₂ có được dựa trên mối quan hệ giữa cặp nghiệm liên hợp ảo và các véc tơ riêng [13], [14]. Với hệ thống đầy đủ thì cặp giá trị riêng phức được tính như sau:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}}_J \times \begin{bmatrix} v_{1R} \pm jv_{1I} \\ v_{2R} \pm jv_{2I} \end{bmatrix} = \quad (9)$$

$$= [\alpha \pm j\beta] \times \begin{bmatrix} v_{1R} \pm jv_{1I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Với J_1, J_2, J_3, J_4 được tính trong (2.3), và $(v_{1R} + jv_{1I}), (v_{2R} + jv_{2I})$ là các vectơ riêng.

Phân tích phần thực và phần ảo (3.5) ta có:

$$\left(\underbrace{\begin{bmatrix} J_1 & J_2 & +\beta I_n & 0 \\ J_3 & J_4 & 0 & 0 \\ -\beta I_n & 0 & J_1 & J_2 \\ 0 & 0 & J_3 & J_4 \end{bmatrix}}_{J_m} - \alpha \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} v_{1R} \\ v_{2R} \\ v_{1I} \\ v_{2I} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

Vì $\alpha = 0$ tại điểm HB nên ma trận J_m sẽ suy biến. Do đó giá trị suy biến nhỏ nhất của J_m có thể được dùng như chỉ số gần với điểm HB

$$HBI_2(A, \beta) = \sigma_{\min}(J_m) \quad (11)$$

Tại giá trị riêng tới hạn sẽ gần nhất với trục ảo, và do đó với $\beta = 0$:

$$A_m = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$HBI_1 = \sigma_{\min}(A_m) = \sigma_{\min}(A) \quad (12)$$

$$\text{và } J_m = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & 0 & 0 \\ J_3 & J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 & J_2 \\ 0 & 0 & J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$HBI_2 = \sigma_{\min}(J_m) = \sigma_{\min}(J) \quad (13)$$

3.4. Tuyến tính hóa các chỉ số

Các chỉ số trên có thể được tuyến tính hóa để tạo ra các chỉ số mới mà có thể ứng dụng cho hệ thống động phi tuyến để xác định điểm mất ổn định HB [2] [14]. Các chỉ số “bậc 1” dựa trên giá trị riêng tới hạn hay giá trị suy biến nhỏ nhất có thể không là điều kiện đủ để dự đoán tính trạng mất ổn định trong HTĐ vì không tính đến các thiết bị điều khiển như bộ điều tốc tua bin, giới hạn MPĐ... Tuy nhiên điều này có thể dựa vào các chỉ số “bậc 2” như gradient của chỉ số đó với thông số thay đổi. Do đó giá trị riêng tới hạn hay giá trị suy biến nhỏ nhất của ma trận Jacobian có thể xấp xỉ như sau:

$$\gamma = (a - b\lambda)^{\frac{1}{c}} \quad (14)$$

Với γ là giá trị riêng tới hạn μ hay giá trị suy biến min, bộ thông số vô hướng a, b và c, λ là thông số thay đổi theo các thông số.

Có thể tuyến tính hóa bằng cách chia cho gradient tại các điểm

$$\frac{\gamma}{d\gamma/d\lambda} = c\lambda - \frac{ac}{b} \quad (15)$$

Do đó, chỉ số tuyến tính hóa của EVI, HBI_1 và HBI_2 được tính như sau:

$$LEVI = \frac{EVI}{\left| \frac{dEVI}{d\lambda} \right|},$$

$$LHBI_1 = \frac{HBI_1}{\left| \frac{dHBI_1}{d\lambda} \right|},$$

$$LHBI_2 = \frac{HBI_2}{\left| \frac{dHBI_2}{d\lambda} \right|} \quad (16)$$

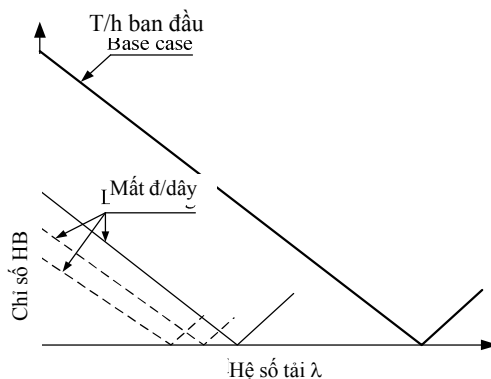
4. XẾP HẠNG CÁC SỰ CỐ NGẪU NHIÊN THEO CHỈ SỐ VỀ ĐIỂM ỔN ĐỊNH HB

Theo yêu cầu về an ninh cung cấp điện thì cần đảm bảo sự bền vững của HTĐ khi có các sự cố dự đoán được (credible contingencies). Việc xếp hạng các sự cố có mục đích là đánh giá xem sự cố nào dẫn đến sự vi phạm và mất ổn định HTĐ như là ổn định quá độ, ổn định với nhiễu loạn nhỏ, và ổn định điện áp. Từ đó cần có các biện pháp phòng ngừa và ngăn chặn các sự cố ảnh hưởng đến HTĐ.

Việc xếp hạng các sự cố theo chỉ số HB dựa trên độ dự trữ tải động. Độ dự trữ tải động được đo bởi sự tăng lên của hệ số mang tải λ từ trường hợp cơ bản ($\lambda = 0$) đến một giá trị nào đó, tại đó HTĐ mất ổn định và bắt đầu dao động. Các chỉ số HB gần như tuyến tính với sự thay đổi của tải, do đó, chúng có thể được dùng để xếp hạng các sự cố đối với mất ổn định. Ý tưởng chính là tính các giá trị HBI tại giá trị $\lambda = 0$ cho mỗi trường hợp mất đường dây thay vì tính độ dự trữ tải động. Điều này giảm thời gian tính toán và đơn giản hơn. Hình 2 vẽ chỉ số HB của mỗi trường hợp tương ứng với trường hợp cơ bản, và các trường hợp mất đường dây khác nhau. Tất nhiên là giá trị HBI tại giá trị mang tải cơ bản có thể thay thế cho độ dự trữ tải động.

Việc tính các chỉ số HB cần có ma trận A , hoặc ma trận J , và phần ảo của các giá trị riêng tới hạn. Để đáp ứng các yêu cầu trên đòi hỏi một chương trình

tính toán nhanh trào lưu công suất, thông tin HTĐ, và mô hình cũng như thông số của MPĐ và các thiết bị điều khiển khác. Thông thường, các thông số này và các chương trình tính toán nhanh trào lưu công suất thường sẵn có ở các trung tâm điều khiển HTĐ. Do đó các chỉ số HBI thỏa mãn yêu cầu về xếp hạng các sự cố ngẫu nhiên.



Hình 2. Chỉ số HB cho các điều kiện vận hành khác nhau

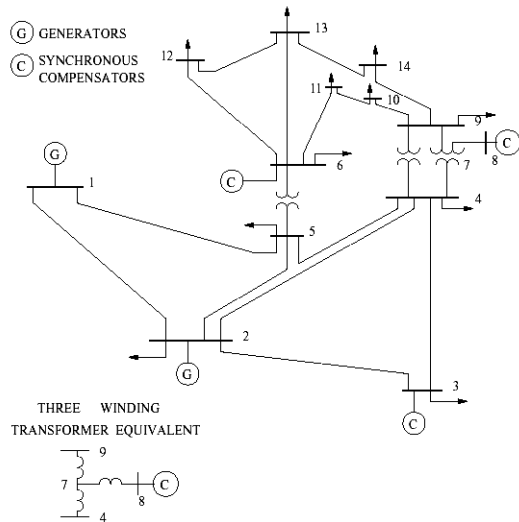
Bảng 1. Các trường hợp sự cố và độ dự trữ tải tĩnh và động

Trường hợp	Độ dự trữ khi tải tĩnh (SLM)	Độ dự trữ khi tải động (DLM)
Ban đầu	0.71	0.47
Cắt đ/d 2-4	0.53	0.34
Cắt đ/d 2-3	0.26	-

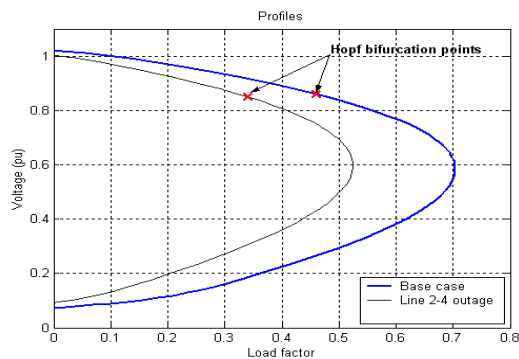
5. ỨNG DỤNG CHO LƯỚI ĐIỆN IEEE -14 NÚT

Lưới điện chuẩn IEEE 14-nút (hình vẽ 3) được dùng để nghiên cứu minh họa cho phương pháp đề xuất ở trên. HTĐ IEEE -14 có 5 máy phát điện đồng bộ, với loại kích từ là IEEE loại-1, ba máy vận hành ở chế độ máy bù đồng bộ, chỉ

cung cấp công suất phản kháng, 11 tải với tổng công suất là 259MW và 81,3Mvar [3].



Hình 3. Hệ thống điện IEEE -14 nút



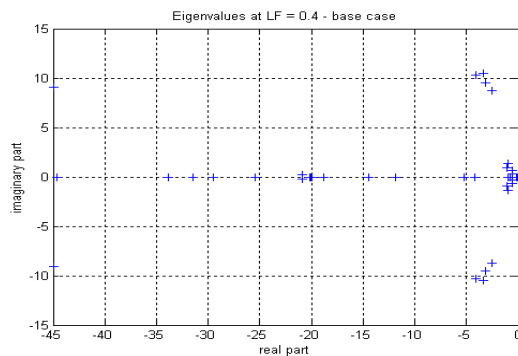
Hình 4. Đường cong PV tại nút 14 cho các sự cố ngẫu nhiên khác nhau

Phần này của bài báo giới thiệu sự làm việc của HTĐ và sự sắp xếp mức độ nguy hiểm với các trường hợp cơ bản và các sự cố ngẫu nhiên. Ví dụ khi mất đường dây 2-4, từ đường cong PV tại nút 14 cho trường hợp cơ bản khi mất đường dây 2-4 và 2-3 được vẽ trên hình. Trong trường hợp này, ta xác định được điểm mất ổn định HB, đồng

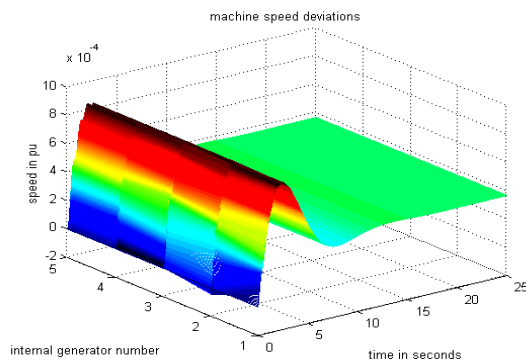
thời xác định được khả năng mang tải tĩnh và động như trên bảng (SLM và DLM).

5.1. Trường hợp ban đầu

Khi hệ số tải $\lambda = 0.4$ điểm cân bằng vẫn nằm trong giới hạn độ dự trữ tải động, và tất cả các giá trị riêng có phần thực âm như trên hình vẽ 5 và hệ thống ổn định như trên hình vẽ 6.



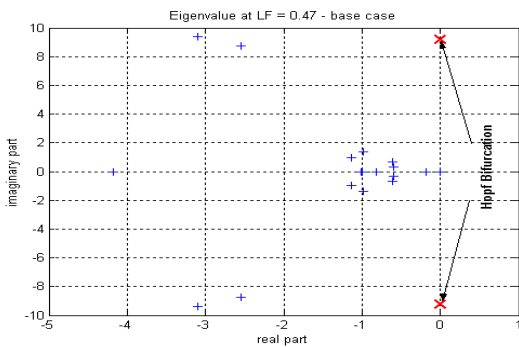
Hình 5. Giá trị riêng cho T/H ban đầu tại $\lambda = 0,4$



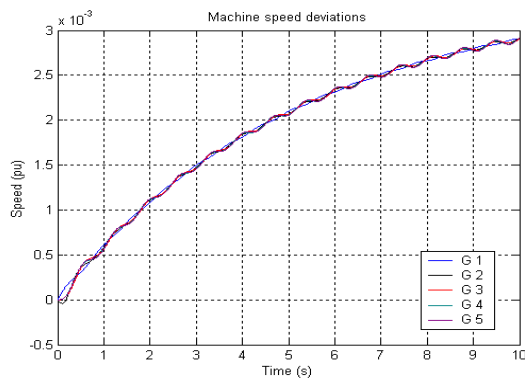
Hình 6. Độ lệch tốc độ MPĐ tại $\lambda = 0$: HT ổn định

Tại hệ số tải $\lambda = 0.47$ giá trị riêng tới hạn tiến gần đến trục ảo, do đó HT sẽ dẫn đến dao động. Điểm này là điểm tới hạn HOPF cho trường hợp ban đầu và dùng để xác định độ dự trữ đối với

tải động như bảng 1. Các giá trị riêng vẽ ở hình vẽ 7 tương ứng với giá trị tới hạn là $\pm j9.1913$.



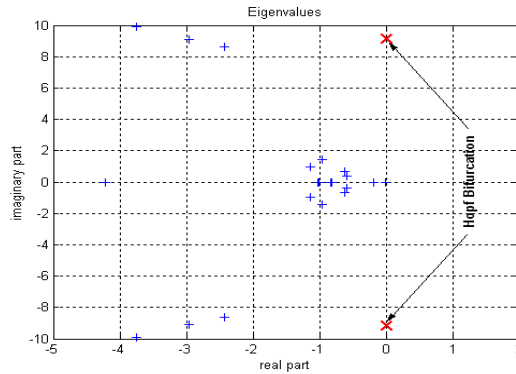
Hình 7. Giá trị riêng cho T/H ban đầu khi $\lambda = 0,47 \Rightarrow$ HTĐ mất ổn định



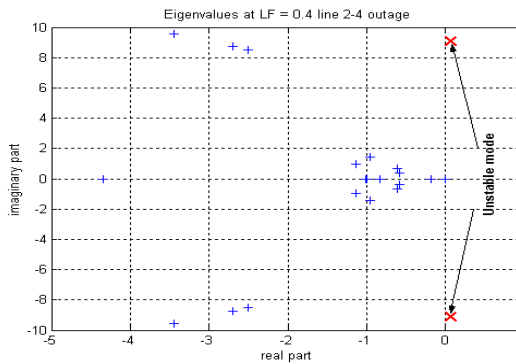
Hình 8. Độ lệch vận tốc tại $\lambda = 0.47 \Rightarrow$ HTĐ dao động. Khi cắt đường dây: 2-4

Hệ thống dao động và điểm mất ổn định Hopf xảy ra tại $\lambda = 0.34$. Giá trị riêng được chỉ ra trên hình vẽ 9. Giá trị riêng tới hạn là $\pm j9.1380$. Các giá trị riêng khác đều có phần thực âm.

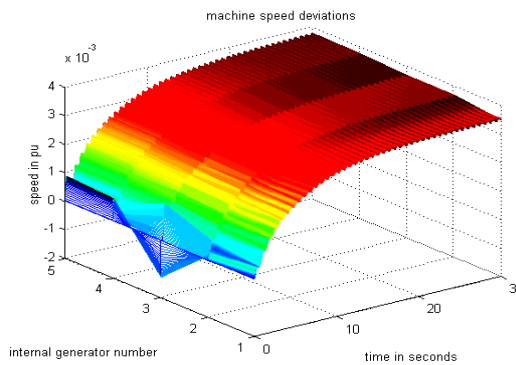
Tại giá trị tải $\lambda = 0.4$ giá trị riêng tới hạn có phần thực như trên hình vẽ 10, HTĐ dao động công suất. So sánh hai trường hợp cơ bản và khi mất đường dây, rõ ràng là khi mất đường dây 2-4 sẽ gây ra mất ổn định do HB như hình vẽ 11.



Hình 9. Giá trị riêng cho T/H mất đường dây 2-4 với hệ số mang tải là $\lambda = 0,34$ (tại HB)



Hình 10. Giá trị riêng cho trường hợp mất đường dây 2-4 tại giá trị tải $\lambda = 0,4 \Rightarrow$ hệ thống mất ổn định



Hình 11. Sự dao động và mất ổn định góc MPĐ khi mất đường dây 2-4 khi hệ số tải $\lambda = 0.4$

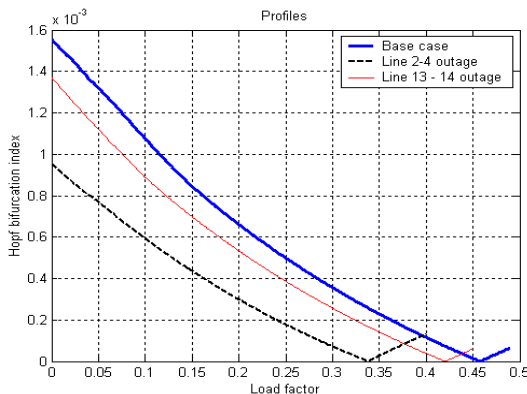
5.2. Kết quả sự sắp xếp các sự cố ngẫu nhiên

Rõ ràng là, sự cố mất các đường dây đã dẫn đến mất ổn định do HB, và các sự cố khác nhau sẽ dẫn đến các điểm HB khác nhau. Nói cách khác, việc mất mỗi đường dây tạo ra các mức độ an ninh khác nhau. Do đó, cần phải xếp hạng các sự cố theo chỉ số mất ổn định HB đã đề cập ở trên. Hình vẽ 12 mô tả và chỉ rõ sự xếp hạng các chỉ số HB tương ứng với các sự cố khác nhau.

Như trong bảng 2, thì khi mất đường dây 1-5 là nguy hiểm nhất, trường hợp ít nguy hiểm nhất là khi mất đường dây 13-14. Trong trường hợp này, đường HBI không cắt nhau, do đó sự sắp xếp có thể xác định trực tiếp. Trong trường hợp có sự giao nhau, thì gradient của HBI tại giá trị tải cơ bản ($\lambda = 0$)

$$GHBI = \left. \frac{dHBI}{d\lambda} \right|_{\lambda=0}$$

là một chỉ số để xếp hạng các sự cố khi mất các đường dây.



Hình 12. Chỉ số HB cho các T/H sự cố khác nhau

Bảng 2. Bảng xếp hạng các giá trị các chỉ số HB

Mất đ/d	Giá trị HBI	Xếp Hạng
1 – 5	0.47677529	1
2 – 4	0.61336553	2
4 – 5	0.66367590	3
2 – 5	0.71093358	4
3 – 4	0.82167556	5
6 – 13	0.86130959	6
9 – 14	0.87024361	7
6 – 11	0.87173780	8
6 – 12	0.87363429	9
9 – 10	0.87373353	10
12 – 13	0.87829315	11
10 – 11	0.87973589	12
13 – 14	0.88147429	13

6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã thảo luận ngắn gọn về lý thuyết ổn định Hopf được áp dụng để nghiên cứu dao động trong HTĐ. Phương pháp tiếp tuyến liên tục, dùng để tính toán và vẽ đường cong PV tương ứng với các sự cố ngẫu nhiên. Các chỉ số ổn định dựa trên lý thuyết ổn định Hopf được đề xuất. Các kết quả được áp dụng cho HTĐ chuẩn IEEE – 14 nút đã cho các kết quả khả quan trong việc đánh giá, xếp hạng các sự cố ngẫu nhiên, và khi tải thay đổi. Dựa vào các chỉ số này, ta có thể xác định được khả năng mang tải, cũng như các sự cố nguy hiểm đến sự ổn định của HTĐ. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ ứng dụng phương pháp này cho HTĐ lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] N. Mithulanathan, C. A. Canizares, and J. Reeve, "Indices to Detect Hopf Bifurcation in Power Systems." In Proc. of NAPS-2000, no. of pages 7, University of Waterloo, Waterloo, Canada, October 2000.
- [3] C. A. Canizares, N. Mithulanathan, Federico Milano and J. Reeve, "Linear Performance Indices to predict Oscillation Stability Problem in Power Systems." IEEE transaction on Power System, Vol 19, no 2, pp 1104-1114 , May 2004.
- [4] C. A. Canizares, "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 512-522, February 1995.
- [5] William D. Rosehart, and C. A. Canizares, "Bifurcation Analysis of Various Power System Models". Available: <http://www.power.uwaterloo.ca>
- [6] N. Mithulanathan, C. A. Canizares, and J. Reeve, "Hopf Bifurcation Control in Power System Using Power System Stabilizers and Static Var Compensators." In Proc. of NAPS'99, pp. 155-163. San Luis Obispo, California, October 1999. Available: <http://www.power.uwaterloo.ca>
- [7] N. Mithulanathan, C. A. Canizares, J. Reeve, and Graham J. Rogers, "Comparison of PSS, SVC and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations." IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 786-792, May 2003.
- [8] N. Mithulanathan, C. A. Canizares, and John Reeve, "Tuning, Performance and Interactions of PSS and FACTS Controllers". Available: <http://www.power.uwaterloo.ca>
- [9] Ian Dobson, Fernando Alvarado, and Christopher L. DeMarco, "Sensitivity of Hopf Bifurcations to Power System Parameters." IEEE Trans. on Decision and Control, vol. 3, pp. 2928-2933, 1992.
- [10] Dong S. Chen, and Hua O. Wang, "Anti-Control of Hopf Bifurcations," IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, vol. 48, no. 6, pp. 661-672, June 2001.
- [11] K. N. Srivastava, and S. C. Srivastava, "Elimination of Dynamic Bifurcation and Chaos in Power Systems Using Facts Devices." IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, vol. 45, no. 1, pp. 72-77, January 1998.

- [12] A. A. P. Lerm, C. A. Canizares, and A. S. e Silva, "Multi-parameter Bifurcation Analysis of the South-Brazilian Power System" IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 578-587, May 2003.
- [13] V. Ajjarpu, and C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 1, February 1993.
- [14] N. Mithulanathan, C. A. Canizares, A. Berizzi, and J. Reeve, "On the Linear Profile of Indices for Prediction of Saddle-node and Limit-induced Bifurcation Points in Power Systems." Submitted for publication in IEEE Trans. on Circuit and Systems, October 2001. Available: <http://www.power.uwaterloo.ca>

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Đăng Toàn sinh năm 1978 tại Bắc Ninh, tốt nghiệp Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2001, nhận bằng thạc sỹ năm 2004 tại AIT - Thái Lan, tiến sĩ năm 2008 tại Grenoble-INP - Pháp chuyên ngành hệ thống điện. Tác giả Nguyễn Đăng Toàn hiện đang công tác tại Khoa Hệ thống điện - Trường Đại học Điện lực. Lĩnh vực nghiên cứu: ổn định hệ thống điện, HVDC/FACTS, ứng dụng tin học trong HTĐ, năng lượng mới.



Tác giả Dương Hoài Nam sinh năm 1975, tốt nghiệp đại học chuyên ngành điện - điện tử tại Trường Đại học Bách Khoa TP Hồ Chí Minh năm 1997, tốt nghiệp thạc sỹ chuyên ngành quản lý hệ thống điện tại AIT - Thái Lan năm 2004, hiện đang công tác tại Công ty tư vấn điện 2 - TP Hồ Chí Minh.