

ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP THỜI GIAN THỰC VỚI VIỆC SỬ DỤNG HỆ THỐNG GIÁM SÁT ĐIỆN RỘNG

EVALUATE REAL TIME VOLTAGE STABILITY USING WIDE AREA MONITORING SYSTEM

Nguyễn Nhất Tùng^{1,*}, Phạm Thành Nam¹

TÓM TẮT

Sự phát triển nhanh chóng của hệ thống điện cả về quy mô và chất lượng, với các trang thiết bị công nghệ cao, đòi hỏi phải có các công cụ đủ mạnh để đối phó với các rối loạn trong quá trình vận hành của hệ thống. Các rối loạn này có thể do sự quá tải trên các đường dây tải điện, kéo theo sự sụp đổ điện áp và tan rã hệ thống. Khi có sự xáo trộn lớn xảy ra, các giải pháp nhằm bảo vệ và kiểm soát hệ thống đóng vai trò quan trọng, để ngăn chặn sự sụp đổ và khôi phục hệ thống trở lại trạng thái bình thường, giảm thiểu ảnh hưởng của các sự cố. Với các tiến bộ của khoa học công nghệ gần đây, kết hợp với các giải pháp thông tin và truyền thông hiện đại, các loại cảm biến mới, cùng với sự đa dạng các loại hình sự cố trên hệ thống điện đã thúc đẩy sự xuất hiện của hệ thống giám sát bảo vệ điện rộng, sử dụng thiết bị đo lường đồng bộ pha. Bài báo hướng tới việc mô phỏng hệ thống này và phương pháp đánh giá ổn định điện áp trong thời gian thực. Từ các nghiên cứu với sơ đồ tương đương Thevenin, bài báo phân tích để xuất chỉ số mới NewVSI trong việc giám sát đánh giá ổn định điện áp trong thời gian thực. Các kết quả được chứng minh bằng mô phỏng trên lưới điện chuẩn 39 nút IEEE, sử dụng phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Hệ thống giám sát điện rộng, ổn định điện áp thời gian thực, thiết bị đo lường đồng bộ pha.

ABSTRACT

The rapid development of power system, both in terms of scale as well as technological advances, requires tools to deal with systemic disruptions that cause overload on transmission lines, dragging down the voltage collapse and power system disruption for many years. When major disturbances occur, protection and control solutions play the most important role in preventing system collapse, restoring the system to normal and minimizing the impact of incident. New improvements in science, technology, information and communications, sensor technology and the emergence of large-scale have spurred appearance of wide area monitoring system using phasor measurement unit. This article describes the simulation of this device and method of evaluating real-time voltage stability. Simulation results are analyzed, evaluated on IEEE 39 bus system using Matlab/Simulink.

Keywords: Wide area monitoring system, real-time voltage stability, phasor measurement unit.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: tungnn@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/10/2017

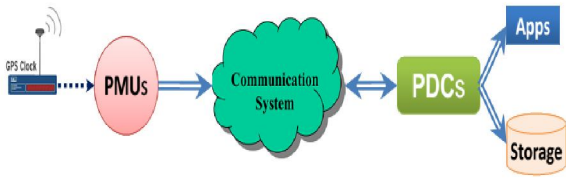
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/11/2017

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2018

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống điện (HTĐ) càng ngày càng trở nên phức tạp với sự đa dạng của các loại nguồn điện, bao gồm cả các nguồn năng lượng tái tạo, sự tăng lên quá nhanh của phụ tải, dẫn đến sự vận hành gần giới hạn ổn định của nó. Thêm vào đó, khi tầm vóc của các HTĐ quốc gia không còn nữa bởi sự xuất hiện của HTĐ liên kết đa quốc gia thì điều này càng trở nên phức tạp. Đối với ổn định điện áp, đứng trước các kích động lớn, kéo theo sự giảm mạnh của điện áp tại các nút, dẫn đến các bảo vệ sẽ tác động cắt lan truyền một số đường dây truyền tải và một số phần tử khác, sự sụp đổ hệ thống sẽ xảy ra nếu không có các biện pháp bảo vệ hợp lý [1, 2]. Điều này đòi hỏi phải có một cơ cấu bảo vệ mới, đảm bảo giám sát liên tục các thông số, bảo vệ và điều khiển đáp ứng nhu cầu nhanh chóng của HTĐ. Hệ thống đo lường giám sát điện rộng WAMS (Wide Area Monitoring System) [9], kết hợp dữ liệu được cung cấp bởi thiết bị đo đồng bộ pha PMU (Phasor Measurement Unit) là một trong số các giải pháp hữu hiệu nhằm giải quyết vấn đề này, hình 1. PMU là thiết bị đo kỹ thuật số có thể được tích hợp trong role bảo vệ, thiết bị ghi sự cố tại các trạm và nhà máy điện, có khả năng đo được dữ liệu đồng bộ pha (Phasor) trong thời gian thực, tần số, mô đun và góc pha của dòng điện và điện áp,... theo các tiêu chuẩn (như IEEE 1344, IEEE C37.118 [3]) và được đồng bộ thời gian các tín hiệu qua đồng hồ vệ tinh GPS, việc lấy mẫu đồng bộ trong 1μs [4]. Tín hiệu được kết hợp với các hệ thống thông tin liên lạc mới, cho phép giám sát, vận hành, kiểm soát và bảo vệ HTĐ trong khu vực địa lý [10-11].

Với khả năng đo với chu kỳ lấy mẫu lên tới 30 - 120 mẫu/giây, các PMU sẽ cung cấp một số lượng lớn dữ liệu được đồng bộ thời gian thông qua thiết bị đồng bộ thời gian GPS. Chúng được lưu trữ trong các bộ tập trung dữ liệu pha PDCs (Phasor Data Concentrator), phân tích và xử lý nhằm đánh giá được trạng thái của hệ thống, hình 1. Đồng bộ chính xác thời gian cho phép so sánh chính xác các phép đo theo thời gian thực và trên các địa điểm cách xa nhau. Các xung điện áp và dòng điện đầu vào được lấy từ các biến dòng và biến áp, được qua các bộ lọc nhằm loại bỏ các thành phần hài bậc cao. Quá trình lấy mẫu cho ra các giá trị rời rạc sử dụng phương pháp biến đổi rời rạc Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) nhằm đạt được ước lượng pha của thành phần cơ bản của điện áp và dòng điện [11].



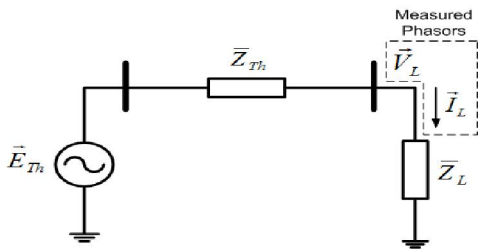
Hình 1. Các thành phần của hệ thống WAMS [10]

Các kết quả nghiên cứu trước đây về ổn định điện áp với WAMS sử dụng mô hình hệ thống điện tĩnh để đánh giá khả năng, giới hạn ổn định như phương pháp đường cong P-V và Q-V, phân tích độ nhạy [5], sử dụng ma trận Jacobian [6], chỉ số đường dây [7], đánh giá ổn định điện áp bằng các chỉ số: FVSI, LQP, NSI, VCPI [8]. Các phương pháp trên được xác định nhờ phân tích chế độ xác lập, (mô hình phân bố công suất, mô hình động tuyến tính hóa,...), do vậy có một số hạn chế như: (i) các thuật toán với các thông số không đổi của HTĐ, điều này có thể dẫn đến những đánh giá không chính xác trong thời gian thực; (ii) khó đánh giá được ảnh hưởng của các thiết bị tự động điều chỉnh điện áp như tự động điều chỉnh điện áp máy phát (AVR) hay điều áp dưới tải (ULTC) tại máy biến áp; (iii) việc phân tích ổn định điện áp, giám sát HTĐ sẽ trở nên khó khăn khi có chuỗi sự kiện động xảy ra như sự cố đường dây, mất máy phát điện hoặc tăng hoặc giảm đột ngột một lượng tải lớn; (iv) khó xét ảnh hưởng của nhiễu lên các số liệu đo lường.

Để cải thiện một số hạn chế trên, phương pháp sơ đồ tương đương Thevenin sử dụng số liệu thu được từ các thiết bị đo lường đồng bộ pha và chỉ số đánh giá ổn định điện áp dựa trên mô hình HTĐ điện rộng được đưa ra trong nghiên cứu này. Nội dung chính của phương pháp là: (i) ước lượng thông số nguồn điện áp E_{th} và tổng trở Z_{th} trong sơ đồ tương đương Thevenin từ các thông số thu được thông qua các thiết bị đo lường PMU; (ii) tính toán chỉ số ổn định điện áp *NEWVSI* cho một số nút tải trong HTĐ. Điều này cho phép đánh giá điện áp nút gần như online.

2. CƠ SỞ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP

Bằng các thông số đo lường giá trị điện áp (V_L) và dòng điện (I_L) tại nút, việc đánh giá sự mất ổn định điện áp được thông qua một sơ đồ tương đương Thevenin, bao gồm một nguồn điện áp (E_{Th}) mắc nối tiếp với một tổng trở (Z_{th}) như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ tương đương Thevenin

Các thông số E_{th} và Z_{th} được ước lượng thông qua phương pháp bình phương cực tiểu, sử dụng giá trị đo lường đồng bộ pha về điện áp, dòng điện và góc pha (θ)

của chúng. Các giá trị được biến đổi thành phần thực (r) và ảo (i):

$$\begin{aligned} \bar{V}_L &= V_r + jV_i; \quad \bar{I}_L = I_r + jI_i; \\ \bar{E}_{th} &= E_r + jE_i; \quad \bar{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} \end{aligned} \tag{1}$$

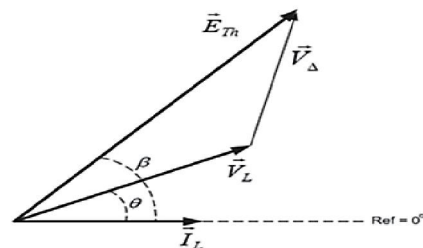
Và đưa ra được một phương trình tuyến tính [12]:

$$A_k x = B_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r & I_i \\ 0 & 1 & -I_i & -I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \\ V_i \end{bmatrix} \tag{2}$$

Để ước lượng các giá trị E_r, E_i, R_{th} và X_{th} cần ít nhất giá trị dòng điện và điện áp tại hai thời điểm đo khác nhau. Nhưng để kết quả chính xác hơn thì có thể sử dụng nhiều kết quả đo để lọc ảnh hưởng của sự quá độ và nhiễu theo phương trình [12]:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} (A^T b) \tag{3}$$

Hình 3 thể hiện sơ đồ vectơ mạch tương đương Thevenin.



Hình 3. Sơ đồ vectơ mạch tương đương Thevenin [13]

Từ định luật Kirchoff: $\bar{E}_{th} = \bar{V}_L + \bar{Z}_{th} \bar{I}_L$ (4)

Phân chia phương trình (4) thành hai thành phần thực và ảo:

$$\begin{cases} E_{th} \cos \beta = R_{th} I_L + V_L \cos \theta \\ E_{th} \sin \beta = X_{th} I_L + V_L \sin \theta \end{cases} \tag{5}$$

Với $\bar{E}_{th} = E_{th} \angle \beta$ và $\bar{V}_L = V_L \angle \theta$

Bình phương và cộng tương ứng các vế các phương trình và biến đổi ta có:

$$\Leftrightarrow E_{th}^2 = V_L^2 \frac{Z_{th}^2}{Z_L^2} + 2V_L^2 \frac{Z_{th}}{Z_L} \cos(\theta_{th} - \theta) + V_L^2 \tag{6}$$

- Cơ sở đánh giá ổn định điện áp bằng chỉ số VSI (Voltage Stability Index):

Theo một số kết quả nghiên cứu trước đây [14], khả năng mang tải tối đa liên quan tới chỉ số ổn định điện áp VSI (Voltage Stability Index):

$$VSI = \frac{Z_{th}}{Z_L}$$

Theo các kết quả nghiên cứu công bố, [14], hệ thống chỉ ổn định khi $0 < VSI < 1$ và khi $VSI = 1$ ứng với trạng thái truyền tải đang ở giá trị giới hạn.

- Tham số đề xuất đánh giá độ ổn định điện áp NewVSI:
Thay vào phương trình (6) ta có:

$$\frac{E_{th}^2}{V_L^2} = VSI^2 + 2.VSI.\cos(\theta_{th} - \theta) + 1 \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow f(VSI) = VSI^2 + 2.VSI.\cos(\theta_{th} - \theta) + 1 - \frac{E_{th}^2}{V_L^2} = 0$$

Theo tính chất nghiệm của phương trình bậc hai (7) với ẩn số VSI ta có:

$$f(VSI=0) * f(VSI=1) \leq 0$$

$$\Leftrightarrow \left(1 - \frac{E_{th}^2}{V_L^2}\right) \left(2 + 2\cos(\theta_{th} - \theta) - \frac{E_{th}^2}{V_L^2}\right) \leq 0$$

$$\Leftrightarrow 1 \leq \frac{E_{th}^2}{V_L^2} \leq 2 + 2\cos(\theta_{th} - \theta)$$

$$\frac{E_{th}^2}{V_L^2 (2 + 2\cos(\theta_{th} - \theta))} \leq 1 \quad (8)$$

Vậy:

$$\Leftrightarrow \frac{E_{th}}{V_L \sqrt{2(1 + \cos(\theta_{th} - \theta))}} \leq 1$$

Phương trình (8) đưa ra một chỉ số khác, giúp đánh giá khả năng mang tải của hệ thống và tình trạng ổn định điện áp của hệ thống:

$$NewVSI = \frac{E_{th}}{V_L \sqrt{2(1 + \cos(\theta_{th} - \theta))}} \quad (9)$$

$$\text{Với } \vec{Z}_{th} = Z_{th} \angle \theta_{th}; \theta = V_{Phase} - I_{Phase}$$

Theo đó, cùng quan điểm với chỉ số VSI, hệ thống được đánh giá ổn định điện áp thông qua đánh giá chỉ số đề xuất NewVSI, cụ thể như sau:

- NewVSI < 1: hệ thống ổn định;
- NewVSI = 1: hệ thống ở giới hạn ổn định;
- NewVSI > 1: hệ thống mất ổn định.

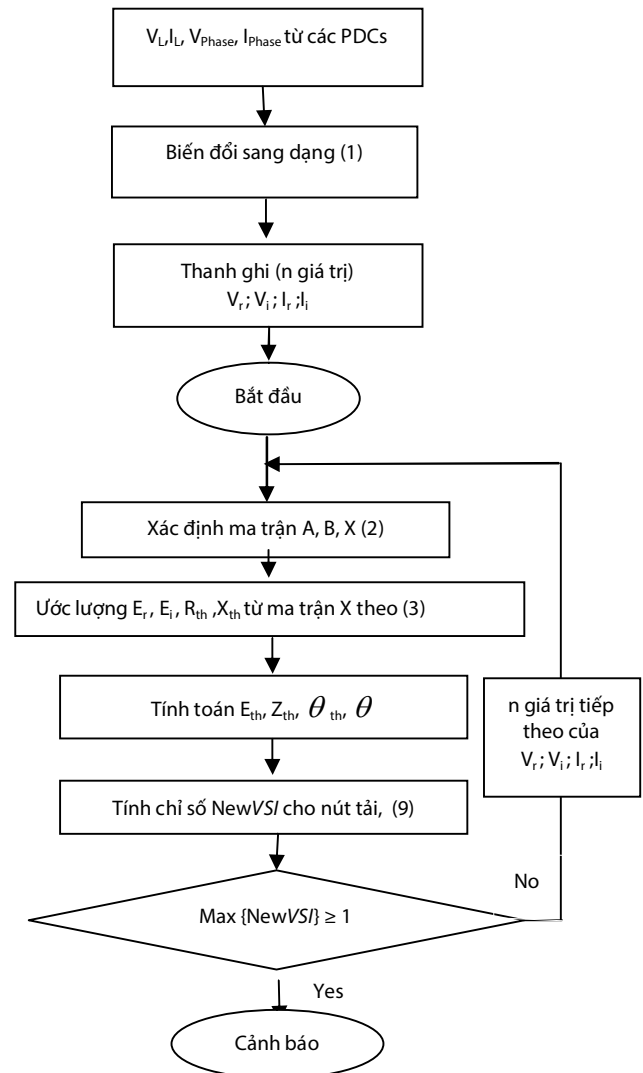
Lưu đồ thuật toán đánh giá ổn định điện áp ngắn hạn thời gian thực dựa trên phương pháp sơ đồ tương đương Thevenin được nêu ra ở hình 4, theo trình tự tính toán và với các chỉ số tương ứng với các phương trình đã phân tích ở phần trên. Từ việc ước lượng thông số sơ đồ này sử dụng phương pháp bình phương cực tiểu, chỉ số NewVSI được tính toán.

Như vậy, giải pháp mới có thể xem xét đánh giá sự ổn định điện áp trong thời gian thực là sử dụng chỉ số NewVSI. Các kết quả trong phần tiếp theo, áp dụng với lưới điện mẫu IEEE sẽ cho thấy tính khả thi của chỉ số đánh giá ổn định điện áp NewVSI này.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN

Việc ứng dụng phương pháp đánh giá ổn định điện áp theo chỉ số NewVSI được thực hiện trên lưới điện chuẩn IEEE 39 nút "New England" (hình 5). Lưới điện với 32 đường dây truyền tải, 24 máy biến áp và 10 máy phát, cấp điện cho 19 tải với tổng công suất 6097,1 MW và 1408,9 MVAR. Các phần tử như đường dây, máy biến áp, máy phát điện được mô phỏng với hệ thống kích từ lựa chọn theo chuẩn

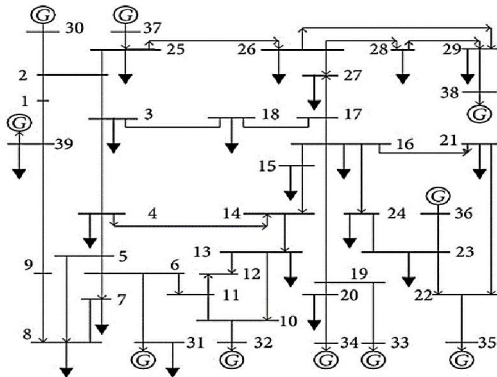
"IEEE-Type 1", với bộ điều tốc được mô phỏng đơn giản với các khối có sẵn trong thư viện của Simulink/SimPowerSystems. Riêng máy phát ở nút 39 là tập hợp của một số lượng lớn máy phát điện thì được thực hiện theo nguyên tắc thay thế tương đương.



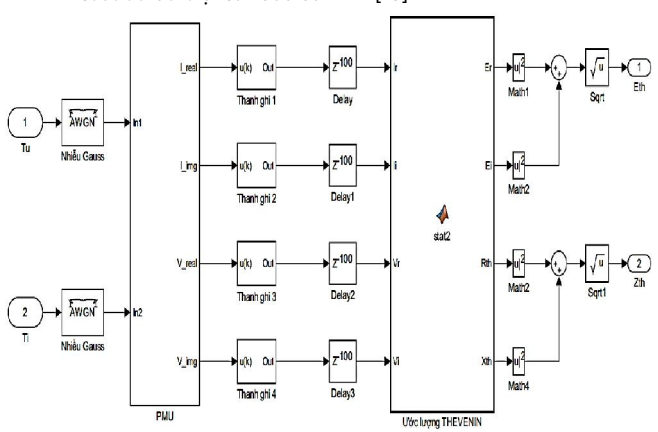
Hình 4. Lưu đồ thuật toán đánh giá ổn định điện áp thời gian thực sử dụng phương pháp sơ đồ tương đương Thevenin

Đối với hệ thống WAMS, các thiết bị đo lường đồng bộ pha PMU được mô phỏng trên Simulink [16]. Các tín hiệu dòng điện, điện áp, góc pha dòng điện, góc pha điện áp được lưu trữ vào thanh ghi. Sau đó, việc tính toán các giá trị ước lượng Thevenin bằng phương pháp bình phương cực tiểu, được thực hiện với n mẫu mỗi thông số (hình 6). Trong nghiên cứu này, các thông số đo ảnh hưởng bởi nhiễu Gauss được lấy với SNR = 50dB (tỉ số tín hiệu cực đại trên nhiễu lớn) [14]. Mỗi thông số được lấy 30 giá trị lưu vào thanh ghi để ước lượng các tham số của sơ đồ tương đương Thevenin, từ đó tính toán chỉ số đánh giá ổn định điện áp NEWVSI. Phương pháp được áp dụng với sơ đồ "New England" 39 nút, với các trường hợp khác nhau dưới đây kéo theo sự cố mất đi của một số đường dây và máy phát điện:

- Trường hợp 1: Tăng dần tải ở một số nút yếu trong hệ thống (nút 4, 8, 20, 25).
- Trường hợp 2: Tăng dần tải như trường hợp 1, nhưng máy phát tại nút 31 bị tác động tách ra khỏi lưới do quá kích từ (Sự cố N-1).
- Trường hợp 3: Tăng dần tải như trường hợp 1, sau đó đường dây 5-6 và đường dây 14-15 bị cắt ra do quá tải (Sự cố N-2).



Hình 5. Sơ đồ lưới điện 39 nút chuẩn IEEE [15]



Hình 6. Sơ đồ khối mô phỏng ước lượng thông số của sơ đồ tương đương Thevenin

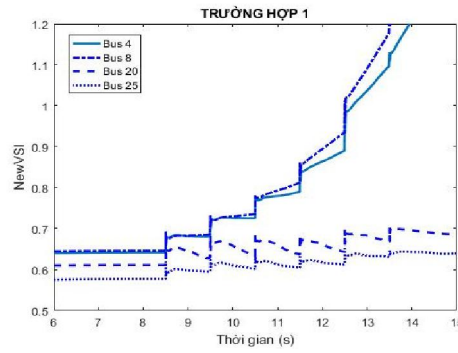
Hình 7 thể hiện kết quả mô phỏng áp dụng phương pháp trên đối với lưới IEEE New England. Trong tất cả các trường hợp, phụ tải tăng dần đều tại các nút kể từ thời điểm 8,5s và sự sụp đổ điện áp được xem xét tại bốn nút 4,8,20 và 25, là những nút nặng tải trong hệ thống.

Trong tất cả các trường hợp, chỉ số *NEWVSI* dao động khi có các biến động xảy ra trong hệ thống do tác động điều khiển kích từ tại các máy phát được mô phỏng động. Ngược lại, chỉ số này tại các nút sẽ tăng đột ngột nếu vượt ngưỡng 1 như hình 7a, 7c, 7e.

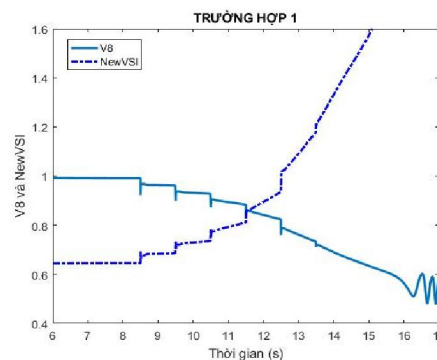
Kết quả chỉ ra sự so sánh chỉ số *NewVSI* giữa các nút này và sự sụp đổ điện áp tại nút yếu nhất (chỉ số *NewVSI* vượt giá trị 1 đầu tiên) như hình 7b, 7d, 7f.

- Trường hợp 1: chỉ số *NewVSI* vượt mức 1 tại nút 8 vào thời điểm 12,51s và sụp đổ điện áp diễn ra sau đó khi phụ tải tiếp tục tăng.

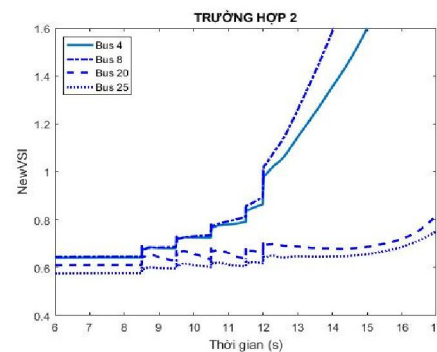
- Trường hợp 2: phụ tải tăng dần tới máy phát tại nút 31 bị cắt ra cho bảo vệ quá kích từ tại thời điểm 12s và chỉ số *NewVSI* đã vượt giá trị 1 tại nút 8 kéo theo sự sụp đổ điện áp.
- Trường hợp 3: xảy ra sụp đổ điện áp do việc phụ tải tăng nhanh khiến hai đường dây 14-15 và 5-6 bị cắt ra do quá tải tại thời điểm 12s khi chỉ số *NewVSI* vượt mức 1 tại nút 8.



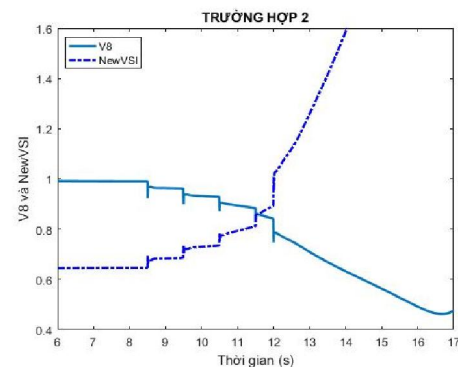
a)



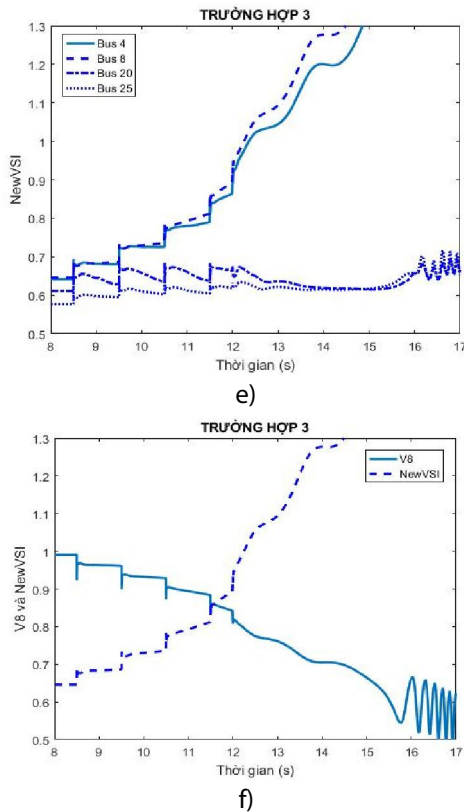
b)



c)



d)



Hình 7. Kết quả mô phỏng phương pháp trên lưới điện 39 nút chuẩn IEEE

- Chỉ số *NewVSI* của nút tải 4, 8, 20, 25 trong trường hợp 1
- Điện áp và chỉ số *VSI* tại nút tải 8 trong trường hợp 1
- Chỉ số *NewVSI* của nút tải 4, 8, 20, 25 trong trường hợp 2
- Điện áp và chỉ số *VSI* tại nút tải 8 trong trường hợp 2
- Chỉ số *NewVSI* của nút tải 4, 8, 20, 25 trong trường hợp 3
- Điện áp và chỉ số *VSI* tại nút tải 8 trong trường hợp 3

Chỉ số *NewVSI* đã chỉ ra được thời điểm mang tải cực đại tại các nút tải, đánh giá được sự thay đổi khi có biến động thông qua mô hình động của hệ thống theo các kịch bản khác nhau. Khi so sánh kết quả này với kết quả đánh giá với chỉ số *VSI*, ta thấy đều đưa lại kết quả hợp lý như nhau. Điểm khác biệt cơ bản ở đây là phương pháp *NewVSI* đánh giá hệ thống trong quá trình động, bằng giải pháp tính toán liên tục các tham số về thời gian. Còn mô hình với *VSI* chỉ đánh giá với các tham số trạng thái ở chế độ xác lập.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp đánh giá ổn định điện áp thời gian thực, sử dụng sơ đồ tương đương Thevenin chỉ ra giới hạn công suất truyền tải lớn nhất ứng khi hệ thống có những biến động bằng chỉ số ổn định điện áp *NewVSI*.

Phương pháp này chỉ cần giá trị đo lường tại nút mà không cần sử dụng thông số của hệ thống nên cho phép đánh giá được hệ thống đối với mô hình động, đánh giá được ổn định điện áp thời gian thực với chuỗi sự kiện động xảy ra liên tục.

Tuy vậy phương pháp vẫn còn một số hạn chế: (i) chưa xem xét được ảnh hưởng của nhiễu mạnh qua các kết quả

đo lường khi tỉ số tín hiệu cực đại trên nhiễu nhỏ, (ii) chưa đánh giá được với nhiều loại mô hình tải khác nhau.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc xem xét đến ảnh hưởng của nhiễu đo lường và các biện pháp nhằm ngăn chặn việc sụp đổ điện áp sẽ được thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Joseph Euzebe Tate, Thomas J. Overbye, 2008. *Line Outage Detection Using Phasor Angle Measurements*. IEEE Transactions on Power Systems, no.4/vol.23, pp.1644-1652.
- [2]. Vladimir Terzija, Gustavo Valverde, Deyu Cai, Pawel Regulski, Vahid Madani, John Fitch, Srdjan Skok, Miroslav M. Begovic, Arun Phadke, 2011. *Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks*. Proceedings of the IEEE, no.1/vol.99, pp.80-93.
- [3]. C37.118.1-2011, *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*.
- [4]. A.G.Phadke et al., Jan 1994, "Synchronised sampling and phasor measurements for relaying and control", IEEE Trans. Power Del., no.1/vol.9, pp. 442-452.
- [5]. Naoto Yorino, E. E. El-Araby, H. Sasaki; et al., 2003. *A New Formulation for FACTS Allocation for Security Enhancement Against Voltage Collapse*. IEEE Transactions on power system, no.1/vol.18, pp. 3-10.
- [6]. A. Kazemi, H. A. Shayanfar, A. Rabiee, J. Aghaie, 2006. *Power System Security Improvement Using Unified Power Flow Controller (UPFC)*. IEEE Power India Conference, no.2/vol.0, pp. 937-941.
- [7]. T Gowri Manohar, 2012. *Literature Review on Voltage stability phenomenon and Importance of FACTS Controllers In power system Environment*. Global Journal of Research In Engineering. Electrical and Electronic Engineering, no.3/vol.12, pp. 1-6.
- [8]. N.A.M.Ismail, A.A.M.Zin, A.Khairuddin, S.Khokhar, 2014. *A Comparison of Voltage Stability Indices*. IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014), Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia.
- [9]. J. Y. Cai, Zhenyu Huang, J. Hauer, K. Martin, 2005. *Current status and experience of WAMS implementation in North America*. Proceeding IEEE/Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conference Exhibition, pp. 1-7.
- [10]. Pei Zhan, Fangxing Li, N. Bhatt, 2010. *Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center*. IEEE Transaction on Smart Grid, no.1/vol.1, pp.186-192.
- [11]. M. M. Amin, H. B.Moussa, O.A.Mohammed, 2011. *Development of a Wide Area Measurement System for Smart Grid Applications*. 18th IFAC World Congress Milano (Italy), pp 1672-1677.
- [12]. Jan Lavenius, Luigi Vanfretti, Glauco N. Taranto, 2015. *Performance Assessment of PMU-Based Estimation Methods of Thevenin Equivalents for Real-Time Voltage Stability Monitoring*. IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering.
- [13]. L. Paniagua, R.B. Prada, 2015. *Voltage Stability Assessment Using Thevenin Equivalent*. Proceeding of the 2015 IEEE thirty fifth central American and Panama convention.
- [14]. Heng-Yi Su, Chih-Wen Liu, 2016. *Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements*. IEEE Transaction on Power Systems, no.4/vol.31, pp. 3221-3229.
- [15]. Ian Hiskens, 2013. *IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls*. Report: 39-bus system (New England Reduced Model).
- [16]. Debomita Ghosh, Chandan Kumar, T. Ghose, D.K. Mohanta, 2014. *Performance Simulation of Phasor Measurement Unit for Wide Area Measurement System*. International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication.