

Phân tích tĩnh ổn định điện áp khi có máy phát điện gió DFIG

- Phan Thị Thanh Bình ¹
- Nguyễn Thụy Mai Khanh ¹
- Nguyễn Ngọc Âu ²

¹ Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

² Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP Hồ Chí Minh

(Bản nhận ngày 14 tháng 6 năm 2016, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 13 tháng 10 năm 2016)

TÓM TẮT

Các phân tích tĩnh ổn định điện áp thường tiến hành theo phân tích độ nhạy V-Q hay phân tích Q-V modal. Các phân tích này dựa trên ma trận Jacobian của bài toán trào lưu công suất và còn được gọi là phân tích ổn định nút phụ tải. Khi có máy phát điện gió kiểu DFIG vận hành theo mode PQ, các nút điện gió được coi như nút

PQ. Do có các ràng buộc về các bộ biến đổi công suất, các nút PQ này sẽ trở nên đặc biệt và điều này ảnh hưởng tới phân tích ổn định điện áp. Bài báo khảo sát mức độ xâm nhập và vị trí kết nối điện gió trên quan điểm ổn định điện áp. Ví dụ áp dụng cho mạng điện 14 nút.

Từ khóa: DFIG, phân tích V-Q modal, phân tích độ nhạy V-Q, ma trận Jacobian rút gọn

1. GIỚI THIỆU

Ổn định điện áp liên quan đến khả năng của hệ thống ở điều kiện vận hành bình thường và khi có nhiễu có thể duy trì điện áp tại mọi thanh cái trên hệ thống ở mức chấp nhận tại các nút. Một hệ thống rơi vào trạng thái không ổn định điện áp khi có tác động nhiễu, khi có yêu cầu tải tăng... sẽ có sự giảm áp liên tục không thể kiểm soát được. Nhân tố chính của nguyên nhân gây ra sự không ổn định là hệ không có khả năng đáp ứng yêu cầu về công suất phản kháng.

Nghiên cứu ổn định điện áp khi có máy phát điện gió được quan tâm nhiều vì sự phát triển của năng lượng tái tạo. Các công trình gần đây như [1] mô tả toàn bộ hệ thống phát điện gió qua các

hệ phương trình vi phân và đại số, dùng phần mềm PSAT để khảo sát trị riêng của ma trận trạng thái theo phương pháp dao động bé. Trong [2], coi DFIG như nút PV, mô tả bằng hệ phương trình vi phân đại số và phân tích theo Q-V modal khi có triển khai FACTS trên lưới. [4] xem xét DFIG là nút phát qua hệ phương trình vi phân và đại số, tiến hành phân tích ổn định tĩnh qua phương pháp dao động bé.

Trong các phân tích tĩnh về ổn định điện áp thì phân tích truyền thống dựa trên các tiêu chuẩn kinh điển hay các phân tích dựa trên độ nhạy V-Q, phân tích Q-V modal [5] khi có công cụ máy tính. Trong các phân tích này, các trị riêng của ma trận Jacobian rút gọn được xem xét. Các ma

trận này là có liên quan tới tính toán trào lưu công suất. Phân tích này còn được gọi là phân tích ổn định của các nút tải vì chỉ xem xét ổn định điện áp tại các nút tải. Trong các phân tích này, không xét các phương trình vi phân (liên quan tới nguồn phát) và chỉ có các phương trình đại số.

Khi hiện hữu máy phát gió ở mode PQ, việc tính toán ma trận Jacobian rút gọn này sẽ có sự thay đổi và do đó ảnh hưởng tới phân tích ổn định điện áp. Bài báo này trình bày cách phân tích ổn định điện áp khi có máy phát điện gió.

2. PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY V-Q VÀ Q-V MODAL

Phân tích độ nhạy V-Q được mô tả như sau: Như là kết quả của bài toán trào lưu công suất, ở chế độ xác lập, ma trận Jacobian được viết là:

$$J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ma trận Jacobian rút gọn của hệ thống (cho các nút tải) là :

$$J_R = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \quad (2)$$

Phần tử đường chéo thứ i của ma trận J_R^{-1} là độ nhạy V-Q ở nút thứ i.

Trong phương pháp phân tích modal Q-V, ma trận Jacobian rút gọn J_R được phân tích thành:

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (3)$$

Với: ξ là vector riêng phải của ma trận Jacobian rút gọn J_R ; η là ma trận vector riêng trái của J_R ; Λ là ma trận trị riêng đường chéo, với các trị riêng $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ của ma trận Jacobian J_R . Ma trận nghịch đảo của J_R có dạng sau:

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (4)$$

Suy ra độ nhạy V-Q ở nút thứ k được cho bởi:

$$\frac{\partial V_K}{\partial Q_K} = \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{ki} \eta_{ik}}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ki}}{\lambda_i} \quad (5)$$

Hệ thống ổn định điện áp nếu tất cả các giá trị riêng của ma trận Jacobian J_R đều dương

Trong (5) P_{ki} là hệ số tham gia của nút k vào mode (phương thức) i và được định nghĩa là:

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (6)$$

Giá trị P_{ki} càng lớn λ_i tham gia càng nhiều vào độ nhạy V-Q ở nút k.

Ứng với phương thức i có giá trị λ_i nhỏ nhất, nút có hệ số tham gia P_{ki} lớn nhất sẽ có độ nhạy V-Q lớn nhất, do đó có độ ổn định thấp nhất. Chính vì vậy trong phương pháp phân tích modal, để đánh giá ổn định điện áp, chỉ xét đến các phương thức có giá trị λ_i nhỏ nhất và ứng với các giá trị λ_i này các nút có hệ số P_{ki} lớn. Ưu điểm của phân tích Q-V modal là đơn giản và đồng thời cho biết sự tham gia của các phần tử mạng điện vào mỗi phương thức λ_i .

3. KHẢO SÁT ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP THEO PHÂN TÍCH Q-V MODAL KHI CÓ DFIG MODE PQ

Các máy phát DFIG khi kết lưới có thể cho theo hai mode là PV hoặc PQ. Kiểu thứ hai thường dùng cho các lưới điện khi điện lực không cho phép máy điện gió tham gia điều khiển điện áp. Như vậy, trong bài toán trào lưu công suất, do đặc thù không tham gia điều chỉnh điện áp, các nút máy phát gió này được coi là nút PQ. Để xét ổn định điện áp cần tính đến ma trận Jacobian của bài toán trào lưu công suất. Trong một số tình huống khi hệ thống căng thẳng về điện áp, nghĩa

là các trị điện áp tại các nút có thể nằm ngoài dải điện áp vận hành bình thường của các máy phát gió, các máy phát DFIG vẫn tiếp tục vận hành. Khi đó các bộ điều khiển sẽ thay đổi các trị dòng cài đặt rotor [3], tuy nhiên luôn đảm bảo các ràng buộc về bộ biến đổi công suất (liên quan tới giới hạn các dòng thành phần và dòng tổng của rotor). Các giá trị dòng cài đặt ảnh hưởng trực tiếp tới công suất đầu ra của máy phát điện gió. Điều này rõ ràng sẽ ảnh hưởng tới việc tính toán ma trận J. Bài báo đề xuất thể hiện sự ảnh hưởng này vào khảo sát ổn định tĩnh, cụ thể là: Trong mỗi bước tính toán ma trận Jacobian, nếu các giới hạn dòng này bị vi phạm, cần gán bằng các trị giới hạn, khi ấy công suất đầu ra P_e và Q_e sẽ thay đổi sau mỗi lần lặp. Như vậy đảm bảo được tính chính xác khi xác định J_R^{-1} và tới việc đánh giá ổn định.

Bài báo xây dựng giải thuật xác định ổn định điện áp như sau:

Tại mỗi bước lặp của bài toán trào lưu công suất, nếu điện áp đầu cực của nút máy phát điện gió DFIG vượt quá mức bình thường sẽ thực hiện các tính toán sau:

Với điện áp V và Q_e là thông số cho trước thì $Q_e = Q_{e\text{cho trước}}$ và tính I_{2d} :

$$I_{2d} = \frac{|V|}{X_m} - \frac{2Q_e(X_s + X_m)}{3|V|X_m} \quad (7)$$

Nếu $I_{2d} > I_{2d\max}$ thì $I_{2d} = I_{2d\max}$, cần tính lại Q_e :

$$Q_e = \frac{3}{2}|V| \frac{X_m}{X_s + X_m} \left(\frac{|V|}{X_m} - I_{2d} \right) \quad (8)$$

Nếu $I_{2d} < I_{2d\min}$ thì $I_{2d} = I_{2d\min}$, tính lại Q_e :

$$Q_e = \frac{3}{2}|V| \frac{X_m}{X_s + X_m} \left(\frac{|V|}{X_m} - I_{2d} \right) \quad (9)$$

Trong các công thức trên I_2 thể hiện dòng rotor.

Nếu DFIG là Type-1 [6], khi các trị cài đặt P_e và Q_e không thể đáp ứng do vi phạm giới hạn dòng tổng, thì việc duy trì Q_e sẽ được ưu tiên hơn (nghĩa là giữ nguyên I_{2d}) và do đó P_e sẽ bị thay đổi như sau:

$$I_{2q} = \frac{2P_e(X_s + X_m)}{3|V|X_m} \quad (10)$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2d}^2 + I_{2q}^2} \quad (11)$$

Nếu $I_2 > I_{2\max}$ thì $I_2 = I_{2\max}$ và I_{2d} không đổi thì:

$$I_{2q} = \sqrt{I_2^2 - I_{2d}^2} \quad (12)$$

$$P_e = \frac{3}{2}|V| \frac{X_m}{X_s + X_m} I_{2q} \quad (13)$$

Do khuôn khổ và phạm vi bài báo chủ yếu tập trung vào phương pháp khảo sát ổn định điện áp, các giá trị $I_{2d\max}$, $I_{2d\min}$, $I_{2\max}$ sẽ không được trình bày. Các dòng này được trình bày trong [7][8] và được coi là các thông số của máy phát.

Ngoài ra cần lưu ý tới phương trình cân bằng công suất tại nút có DFIG sẽ có P_e và Q_e phụ thuộc vào điện áp mỗi bước lặp, cụ thể cho công suất tác dụng như sau:

$$P_{ei}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (14)$$

Khi điện áp DFIG nằm trong dải giá trị bình thường, nút DFIG được coi như cho trước công suất P , Q nghĩa là một nút tải bình thường.

Sau khi xây dựng được J_R , các trị riêng và các hệ số tham gia sẽ được xác định dựa trên (3), (6).

Khi có máy phát gió đặt tại vị trí cho trước, tiến hành so sánh các giá trị riêng khi có và không có máy phát gió để cho một nhận định về ảnh hưởng của máy phát gió. Sau đó, tiến hành chất

tải như nhau cho cả hai phương án là có và không có máy phát gió để xem xét về khả năng ổn định của hệ.

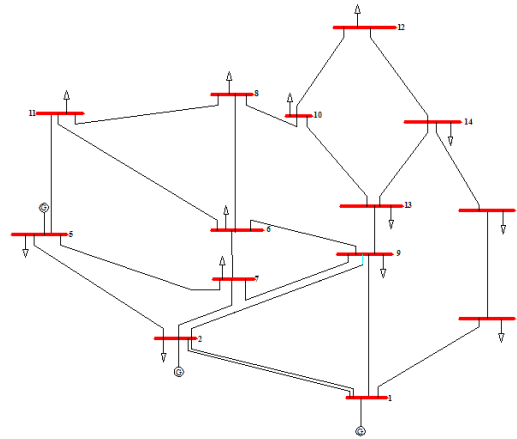
Để đánh giá khả năng thâm nhập của điện gió lên ổn định điện áp, tăng dần công suất phát của máy phát điện gió vào lưới điện. Giữ nguyên tải hiện hữu, quan sát trị riêng nhỏ nhất rút ra kết luận về mức độ phát cho phép của điện gió.

Nếu cùng một lượng công suất bơm vào lưới của máy phát điện gió nhưng nếu đặt tại các vị trí khác nhau sẽ có sự phân bố công suất (nhất là công suất Q) trên lưới khác nhau, kéo theo sự đáp ứng khác nhau về thay đổi công suất phản kháng tại các nút tải. Nghĩa là sẽ có ảnh hưởng khác nhau lên tính ổn định điện áp. Để khảo sát ảnh hưởng của vị trí đặt máy DFIG, tại các nút có thể đặt máy phát điện gió và giả sử các vị trí này có cùng lượng phát như nhau, giữ cùng các điều kiện tải như nhau và tiến hành quan sát các trị riêng nhỏ nhất. Nếu vị trí nào có trị riêng nhỏ nhất mà đạt giá trị lớn nhất thì sẽ là vị trí tốt nhất trên quan điểm về ổn định tĩnh điện áp. Cũng có thể giữ nguyên cùng kiểu chất tải tăng như nhau cho đến khi nào trị riêng nhỏ nhất đạt trị âm, vị trí nào có mức chất tải cao nhất sẽ là tốt nhất, hay nói một cách khác là có độ dự trữ ổn định cao nhất.

4. ÁP DỤNG

Với mục đích minh họa rõ tính đúng đắn của giải thuật, bài báo sử dụng DFIG với công suất phát Q âm (tiêu thụ Q), vì khi thêm tiêu thụ Q thì tính ổn định điện áp sẽ xấu đi. Ngoài ra, chất tải tương đối cao trên mạng điện để có được những nút có điện áp nằm ngoài dải điện áp vận hành bình thường của DFIG để minh họa cho giải thuật.

Khảo sát mạng điện 14 nút cải biên IEEE 110kV:



Hình 1. Sơ đồ lưới điện 110kV

Các máy phát đồng bộ được đặt tại nút 1, 2 và 5 trong đó nút 1 là nút cân bằng.

1-Trường hợp 1: Khi chưa có nguồn điện gió

Tổng công suất tải là: $P_{\text{tải}}=335\text{MW}$, $Q_{\text{tải}}=168\text{Mvar}$. Sau khi chạy chương trình đánh giá ổn định điện áp theo phương pháp phân tích Q-V modal cho kết quả trị riêng là: [1.948; 7.380; 10.568; 16.862; 21.048; 22.718; 30.499; 33.401; 44.401; 46.211; 57.289]. Với trị nhỏ nhất $\lambda_{\min}=1.948 > 0$, hệ thống có ổn định điện áp. Ứng với giá trị $\lambda_{\min}=1.948$, nút 12 có hệ số tham gia nút lớn nhất ($P_{k12}=0.2483$) (Bảng 1) và có điện áp xấu nhất bằng 0.872. Để xác định được giới hạn ổn định điện áp, một cách đơn giản là tăng tải đều tại các nút (hệ số $\cos \varphi_{\text{tải}}$ tại các nút phụ tải không đổi) cho đến khi nào hệ thống mất ổn định (bỏ qua một số ràng buộc về điều kiện đốt nóng dây dẫn). Khi tải đến 108.1% công suất toàn hệ thống ($P_{\text{tải}}=697.135\text{MW}$, $Q_{\text{tải}}=349.608\text{MVar}$) thì mất ổn định với $\lambda_{\min}=-0.013086 < 0$.

Bảng 1. Hệ số tham gia của các nút vào mode trị riêng $\lambda_{\min}=1.948$

Nút	Pki	Nút	Pki
3	0.0354	10	0.184
4	0.120	11	0.0165
6	0.02	12	0.2483
7	0.0064	13	0.1257
8	0.05	14	0.1771
9	0.0157		

2- Trường hợp 2: Khi có nguồn điện gió 30MW

Nguồn điện gió có công suất 30MW (sử dụng loại máy điện DFIG công suất 1.5MW/1máy được nối vào lưới qua máy biến thế 2.5MVA 0.69kV/22kV) sau đó được nâng điện áp lên 110kV bằng biến thế 63MVA 22kV/110kV qua cáp ngầm. Điều này tương đương với việc bổ sung thêm các nút mới là 15, 16 và 17. Nguồn điện gió này được bơm vào nút 12. Như vậy nút 15 sẽ được nối vào nút 12.

Bảng 2. Thông số của DFIG

S rate(MVA)	1.67
V rate (kV)	0.69
Rs (pu)	0.0256
Rr (pu)	0.0167
X11 (pu)	0.0791
X12 (pu)	0.1025
Xm (pu)	2.7368
Xc (pu)	0
H (s)	3.255

Với tải ban đầu $P_{\text{tải}} = 335\text{MW}$, $Q_{\text{tải}} = 168\text{MVar}$, điện áp tại nút 12 được cải thiện (0.877) và có $\lambda_{\min} = 0.5358 > 0$ (Bảng 3). Với thông số của nguồn phát điện gió đã cho, hệ có ổn định điện áp, tuy nhiên tính ổn định xấu hơn

so với trường hợp 1 vì trị riêng nhỏ nhất bé hơn trường hợp đầu. Các giá trị của hệ số tham gia nút được cho trong Bảng 4.

Bảng 3. Trị riêng khi có điện gió ở nút 2

Mode	λ	Mode	λ
1	0.5358	8	28.086
2	1.8772	9	31.24
3	6.0522	10	33.72
4	7.4858	11	44.463
5	13.433	12	46.149
6	17.356	13	57.235
7	22.778	14	61.732

Bảng 4. Hệ số tham gia của các nút vào mode trị riêng $\lambda_{\min}=0.5358$.

Nút	Pki	Nút	Pki
3	0.0029	11	0.0012
4	0.0116	12	0.0532
6	0.0015	13	0.0136
7	0.0005	14	0.0218
8	0.0043	15	0.0863
9	0.0014	16	0.1119
10	0.024	17	0.6657

3- Trường hợp 3: Thay đổi vị trí đặt máy phát điện gió

Vẫn nguồn điện gió này nhưng thay đổi vị trí đặt khác nhau và xem xét các giá trị nhỏ nhất của λ . Kết quả được cho trong Bảng 5. Tương tự kết quả khi thay đổi công suất tải được cho trong Bảng 6.

Từ Bảng 5 và Bảng 6, nhận thấy với cùng lượng công suất bơm vào lưới của máy điện gió, nếu đặt tại nút số 3 sẽ cho ra kết quả tốt hơn về mặt ổn định điện áp.

Bảng 5. Giá trị $\lambda_{\min}$ tại các vị trí có kết nối gió và không kết nối gió

	Chưa kết nối gió	Vị trí gió kết nối		
		Nút 12	Nút 10	Nút 3
$\lambda_{\min}$	1.948	0.5358	0.601	0.88881

Bảng 6. So sánh mức độ tăng tải tối đa (%) cho các vị trí đặt DFIG

Chưa kết nối gió %	Vị trí gió kết nối		
	Nút 12	Nút 10	Nút 3
108	83.5	95	107.7

4- Mức độ xâm nhập của gió vào hệ thống lưới truyền tải

Tăng dung lượng của điện gió tới $P = 43.5\text{MW}$, $Q = -5.8\text{MVar}$ (giữ nguyên hệ số công suất) thì $\lambda_{\min}$ vẫn còn có giá trị dương, vượt quá trị này $\lambda_{\min}$ sẽ có giá trị âm.

Tương tự, tiến hành cho các vị trí đặt khác nhau, tìm mức độ xâm nhập lớn nhất có thể của máy phát mà hệ vẫn duy trì ổn định điện áp. Kết quả được cho trong Bảng 7 với nút 3 cho phép thâm nhập cao nhất.

Bảng 7. Mức độ xâm nhập tối đa của điện gió tại các vị trí đặt khác nhau

Nút kết nối gió	Nút 3	Nút 10	Nút 12
$P_{\text{gió}}(\text{MW})$,	54	42.1	41.39
$Q_{\text{gió}}(\text{MVar})$	-7.2	-6	-5.8

5. KẾT LUẬN

Khi các nguồn phát điện gió DFIG được xem như những nút PQ thì trong một số tình huống, các nút này sẽ có công suất P,Q thay đổi trong quá trình giải bài toán trào lưu công suất kéo theo sự thay đổi tính toán ma trận Jacobian rút gọn và do đó ảnh hưởng tới phân tích ổn định điện áp. Giải thuật của bài báo đề xuất vẫn cho phép sử dụng phương pháp phân tích Q-V modal để tận dụng các ưu điểm của phương pháp này là đơn giản cũng như tìm được những phần tử nào trong lưới ảnh hưởng nhiều nhất tới các mode (thể hiện qua các hệ số tham gia), tuy nhiên có tính đến đặc thù của máy phát DFIG. Sử dụng giải thuật này cũng cho phép xác định được vị trí kết nối gió tốt nhất cũng như mức độ xâm nhập tối đa của điện gió trên quan điểm ổn định điện áp.

Static analysis of voltage stability with DFIG

- Phan Thi Thanh Binh ¹
- Huynh Thi Thu Thao ¹
- Nguyen Ngoc Au ²

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh city University of Technology-VNU-HCM

² Ho Chi Minh City University of Technology and Education

ABSTRACT

The static voltage stability analysis is carried out by V-Q sensitivity or Q-V modal analysis. These analyses are based on the Jacobian matrix of power flow calculation. This is regarded as load bus stability analysis. With DFIG of PQ mode, the wind generation bus is considered as the PQ bus. Due to the limits of

converters, these PQ buses became very special and this influences on the voltage stability examining. This paper also examines the penetration level and the location of wind generation injection based on voltage stability. The reliability of the algorithm is illustrated in a study of 14 buses power network.

Keywords: DFIG, Q-V modal analysis, V-Q sensitivity analysis, reduced Jacobian matrix

REFERENCES

- [1]. J. C. Muñoz, and C. A. Cañizares, Comparative Stability Analysis of DFIG-based Wind Farms and Conventional Synchronous Generators, Power Systems Conference and Exposition, March 2011.
- [2]. Kevin Zibran Heetun, Shady H. E. Abdel Aleem & Ahmed F. Zobaa, Voltage stability analysis of grid-connected wind farms with FACTS: Static and dynamic analysis, Energy and Policy Research 2016, 3:1, 1-12.
- [3]. K.C. Divya, P.S. Nagendra Rao, Models for wind turbine generating systems and their application in load flow studies, Electric Power Systems Research 76 (2006) 844–856.
- [4]. Francoise Mei, and Bikash Pal, Modal Analysis of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generators, IEEE Trans. on energy conversion, Vol.22, N.3, September 2007.
- [5]. Kundur, *Power system stability and Control*, Mc Graw Hill, 1994 .
- [6]. N.W. Miller, J.J. Sanchez-Gasca, W.W. Price, R.W. Delmerico, Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine generators for stability simulations, IEEE WTG Modeling Panel Session, July 2003.
- [7]. J. C. Muñoz, and C. A. Cañizares, Comparative Stability Analysis of DFIG-based Wind Farms and Conventional

- Synchronous Generators, Power system conference and exposition , 2011.
- [8]. G. Tsourakis , B.M. Nomikos, C.D. Vournas, Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability, Electric Power Systems Research 79 (2009) 190–200.