NGHIÊN CỨU CÁC YẾU TỐ BẤT ĐỊNH CỦA THÔNG SỐ VẬN HÀNH ĐỂ TÍNH TOÁN VÀ PHÂN TÍCH CHẾ ĐỘ LÀM VIỆC CỦA HỆ THỐNG ĐIỆN

STUDY ON UNCERTAINTY OF OPERATING PARAMETERS TO CALCULATE AND ANALYZE WORKING CONDITION OF POWER SYSTEMS

Lê Đình Dương[1], Ngô Văn Dưỡng[2], Nguyễn Thị Ái Nhi[3], Huỳnh Văn Kỳ[2]

[1]*Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ldduong@dut.udn.vn*
[2]*Đại học Đà Nẵng; nvduong@ac.udn.vn; hvky@ac.udn.vn*
[3]*Đại học Bách khoa Milan, Italia; thiai.nguyen@polimi.it*

Tóm tắt - Các nguồn năng lượng mới, như năng lượng gió và năng lượng mặt trời, được tích hợp ngày càng nhiều vào các hệ thống điện. Các nguồn bất định thêm vào từ các nguồn năng lượng mới này cùng với các nguồn bất định truyền thống do bản chất thay đổi ngẫu nhiên của tải và khả năng sẵn sàng làm việc của các nguồn phát và các hệ thống truyền tải chỉ rõ những hạn chế của các phương pháp truyền thống trong tính toán và phân tích hệ thống điện, trong đó các yếu tố bất định không được xem xét đến. Trong bài báo này, một phương pháp tính toán và phân tích hệ thống điện có xét đến các nguồn bất định được trình bày. Việc thử nghiệm trên hệ thống điện mẫu IEEE-14 nút chứng tỏ phương pháp đề xuất cho kết quả tốt và có khả năng áp dụng trong thực tế.

Từ khóa - nguồn năng lượng mới; yếu tố bất định; phương pháp xác suất; hàm phân bố; trào lưu công suất.

Abstract - Renewable energy resources, such as wind and photovoltaic solar, are increasingly integrated into power systems. Additional sources of uncertainty from these sources, further to the conventional sources of uncertainty due to stochastic nature of both the load and the availability of generation resources and transmission systems, make clear the limitations of the conventional approaches in calculation and analysis of power systems in which uncertainty sources are not considered. In this paper, an approach to calculate and analyze power systems taking into account sources of uncertainty is presented. Testing on the modified IEEE-14 bus test system indicates good performance and practical applicability of the proposed approach.

Key words - Renewable energy resource; uncertainty source; probabilistic approach; probability distribution; power flow.

1. Đặt vấn đề

Cùng với sự phát triển của xã hội, nhu cầu tiêu thụ điện ngày càng tăng. Để đảm bảo cho hệ thống điện (HTĐ) vận hành an toàn, trong quá trình vận hành cần phải tính toán kiểm tra thông số chế độ của hệ thống so với các giá trị cho phép, tương ứng với các trạng thái vận hành khác nhau. Qua đó đánh giá mức độ an toàn của hệ thống và tìm giải pháp nâng cao khả năng vận hành an toàn cho HTĐ. Phương pháp tính toán trào lưu công suất truyền thống được xem như là công cụ cơ bản cho việc tính toán và phân tích HTĐ. Để tính toán xác định các thông số chế độ (điện áp nút, dòng điện và công suất truyền tải trên đường dây, góc pha…) của HTĐ, thường sử dụng bài toán giải tích mạng điện dựa trên các thuật toán như Newton-Raphson hoặc Gauss-Seidel, trên cơ sở đó đã có nhiều phần mềm tính toán được xây dựng như: PSS/E, PSS/ADEPT, POWERWORLD, CONUS…và các phần mềm này đang được sử dụng rộng rãi trong tính toán thiết kế và quản lý vận hành HTĐ trên thế giới cũng như ở Việt Nam.

Đối với các phương pháp truyền thống, trong quá trình tính toán thì các thông số vận hành (công suất phụ tải, công suất phát của máy phát …), thông số hệ thống (tổng trở đường dây, tổng trở máy biến áp…) đều cho bằng giá trị cố định (hằng số) và cấu trúc lưới (sự làm việc của các thiết bị và các đường dây liên kết…) xem như không thay đổi. Với thông số đầu vào là những giá trị cố định như vậy, nên kết quả tính toán của các phần mềm đều cho giá trị thông số chế độ của HTĐ là những giá trị cố định. Tuy nhiên, giả thiết trên chỉ đúng ở các thời điểm tức thời và không phản ảnh được thực tế vận hành của HTĐ, vì chúng ta biết công suất đầu ra của các nhà máy điện không phải là hằng số trong suốt quá trình vận hành, phụ tải luôn biến đổi theo thời gian và tuân theo những quy luật riêng của nó, các đường dây, máy biến áp, máy phát điện và các thiết bị khác trong quá trình làm việc có thể bị sự cố với một khả năng (xác suất) nào đó. Từ những phân tích trên chúng ta thấy rằng, việc tính toán các chế độ làm việc của HTĐ theo phương pháp truyền thống nêu trên thì không xác định đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình làm việc của HTĐ, tình trạng làm việc của HTĐ chỉ đúng với từng thời điểm nhất định (rất khó xác định trong thực tế). Hơn nữa, đối với các HTĐ hiện nay, khi kết nối thêm các nguồn năng lượng mới như gió, mặt trời,... công suất phát của các nguồn này rất phức tạp, luôn biến đổi rất nhanh và phụ thuộc rất nhiều vào các yếu tố ngẫu nhiên của điều kiện khí hậu, thời tiết. Để khắc phục các hạn chế nêu trên, đòi hỏi phải có một phương pháp tính toán HTĐ phù hợp, trong đó các yếu tố ngẫu nhiên, bản chất của các quá trình, các hiện tượng liên quan đến các thông số đầu vào của quá trình tính toán (như sự thay đổi của phụ tải, sự thay đổi của công suất phát, các khả năng sự cố của thiết bị,...) đều được tích hợp vào quá trình tính toán. Bằng cách sử dụng phương pháp này, kết quả tính toán được như điện áp, dòng điện, công suất truyền tải,... không còn là các giá trị cố định, mà là các hàm phân bố theo quy luật của nó, phản ánh đúng bản chất thông số chế độ của HTĐ thực tế và thông tin từ các quy luật này sẽ rất hữu ích, đầy đủ để đánh giá tình trạng HTĐ trong thực tế.

Lĩnh vực nghiên cứu tìm giải pháp tính toán trào lưu công suất bằng phương pháp xác suất được đề xuất và trở thành công cụ tính toán rất hiệu quả trong đó tất cả các yếu tố bất định trong HTĐ được mô tả bằng các quy luật xác suất [1] và được xem xét, tích hợp vào trong quá trình tính toán. Ý tưởng được đưa ra đầu tiên bởi Borkowska [2] và kể từ đó nhiều công trình nghiên cứu về lĩnh vực này được

công bố trên thế giới. Lĩnh vực này ngày càng thu hút nhiều nhà nghiên cứu để tìm giải pháp thích hợp cho các HTĐ, đặc biệt là các HTĐ có nhiều nguồn năng lượng tái tạo và các loại nguồn phân tán. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay chưa có công trình nghiên cứu liên quan đến lĩnh vực này nói chung cũng như trong việc áp dụng tính toán cho HTĐ Việt Nam nói riêng.

Tính toán trào lưu công suất và phân tích HTĐ bằng phương pháp xác suất bao gồm hai nhóm phương pháp chính: phương pháp số và phương pháp giải tích. Mỗi phương pháp có những ưu, nhược điểm riêng. Điển hình cho phương pháp số là mô phỏng Monte-Carlo [3-8]. Trong phương pháp Monte-Carlo, các biến ngẫu nhiên đầu vào (biểu diễn cho các quá trình, biến cố ngẫu nhiên) sẽ được lấy mẫu và sau đó quá trình tính toán sẽ được thực hiện cho tất cả các mẫu đó. Độ chính xác của phương pháp này phụ thuộc rất lớn vào kỹ thuật lấy mẫu và số lượng mẫu được lấy (số lượng mẫu này thường rất lớn). Phương pháp này cho kết quả chính xác và tin cậy. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất đó là thời gian tính toán lâu, nếu số lượng mẫu lớn được chọn. Ngược lại, phương pháp giải tích sử dụng các thuật toán, các kỹ thuật về giải tích như: nửa bất biến (cumulant) [9, 10], chập (convolution) [11], sự ước lượng điểm (point estimate) [12]. Áp dụng các kỹ thuật giải tích này, kết hợp với mối quan hệ vào-ra của bài toán cho phép xác định được hàm phân bố của biến ngẫu nhiên đầu ra theo sự phân bố đã biết từ các biến ngẫu nhiên đầu vào. Nhìn chung, thời gian tính toán của các phương pháp giải tích sẽ nhỏ hơn rất nhiều so với các phương pháp số; tuy nhiên, phương pháp này cho kết quả không chính xác bằng phương pháp số (với số lượng mẫu đủ lớn). Trong thực tế, tùy theo ứng dụng cụ thể mà ta chọn phương pháp phù hợp.

Bài báo trình bày phương pháp tính toán và phân tích HTĐ theo yếu tố bất định của thông số vận hành, đặc biệt đi sâu vào phương pháp mô phỏng Monte-Carlo. Lý do chủ yếu để chọn phương pháp Monte-Carlo trong bài báo này là nhằm đạt được độ chính xác cao, trong khi thời gian tính toán không quá khắt khe và không cần tính toán quá nhanh. Để minh họa cho phương pháp, HTĐ mẫu IEEE-14 nút sửa đổi được chọn để áp dụng.

2. Mô hình tính toán

2.1. Phụ tải

Phụ tải tại các nút trong hệ thống điện luôn biến đổi trong quá trình vận hành theo quy luật riêng của nó. Thông tin về quy luật biến đổi và phân bố của phụ tải có thể đạt được từ dữ liệu quá khứ hoặc được cung cấp bởi các phương pháp dự báo phụ tải.

Trong tính toán, phụ tải thường được mô tả bằng hàm phân phối chuẩn (*Gaussian distribution* hoặc *normal distribution*) ký hiệu $N(\mu, \sigma^2)$ và có hàm mật độ [1]:

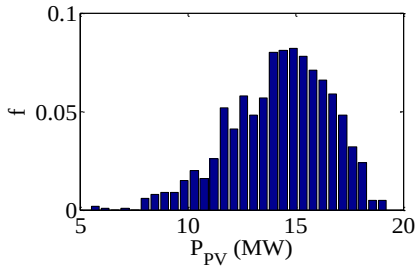
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad (1)$$

Trong đó: μ là kỳ vọng toán (giá trị trung bình) và σ là độ lệch quân phương (độ lệch chuẩn).

2.2. Các nguồn năng lượng tái tạo

Công suất đầu ra của các nhà máy điện dùng nguồn năng lượng tái tạo phổ biến như gió, mặt trời,… cũng được biểu diễn bằng các hàm phân bố xác suất.

Công suất đầu ra của nguồn năng lượng mặt trời phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện thời tiết khí hậu tại nơi lắp đặt. Hàm phân bố xác suất của công suất đầu ra có thể đạt được từ dữ liệu quá khứ hoặc thông qua dự báo công suất. Hình 1 mô tả một ví dụ hàm phân bố của công suất đầu ra của một nhà máy điện dùng năng lượng mặt trời.



Hình 1. *Ví dụ hàm phân bố công suất đầu ra của nhà máy điện mặt trời*

Công suất đầu ra của các nguồn năng lượng gió là các hàm theo vận tốc gió thổi vào tuabin. Có hai cách xây dựng hàm phân bố của công suất đầu ra: trực tiếp đạt được từ thông tin có được từ công suất đầu ra hoặc một cách gián tiếp thông qua thông tin về vận tốc gió. Một ví dụ về hàm mật độ của hàm phân bố công suất đầu ra của một nhà máy điện gió như Hình 5.

2.3. Các nhà máy điện truyền thống

Các tổ máy phát của các nhà máy điện truyền thống như thủy điện, nhiệt điện,… trong quá trình vận hành có thể bị sự cố với một xác suất nào đó. Đối với phương pháp xác suất, khi một tổ máy phát đang làm việc thì công suất đầu ra của nó không phải là giá trị cố định, mà là một hàm phân bố xác suất: làm việc với xác suất *p* và có khả năng hỏng hóc với xác xuất (1-*p*). Hàm phân bố cho một tổ máy phát như thế gọi là hàm phân bố 0-1 ("0": hỏng hóc; "1": làm việc). Một nhà máy điện bao gồm *n* tổ máy phát như vậy thì hàm phân bố công suất đầu ra của cả nhà máy là tập hợp của các hàm 0-1 của các tổ máy phát. Trong trường hợp đặc biệt, nếu các tổ máy phát giống nhau (đồng nhất) thì hàm phân bố đầu ra của nhà máy là hàm phân phối nhị thức (*Binomial distribution*). Hàm mật độ của hàm phân phối nhị thức như sau [1]:

$$f(x; n, p) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \qquad (2)$$

Trong đó: $\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$; $x = 0, 1, 2, ..., n.$

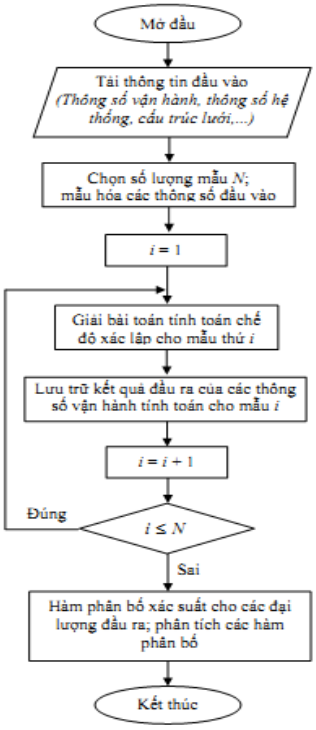
2.4. Hệ thống truyền tải điện

Một cách tương tự như các tổ máy phát điện ở trên, trong quá trình vận hành thì đường dây truyền tải và các thành phần khác trong hệ thống truyền tải có thể bị hỏng hóc với một xác suất nào đó. Trạng thái làm việc của các thành phần này được mô tả bằng các hàm phân bố 0-1 (làm việc với xác suất *p* và có khả năng hỏng hóc với xác suất 1-*p*).

3. Thuật toán tính toán và phân tích hệ thống điện theo yếu tố bất định của thông số vận hành

Thuật toán tính toán và phân tích HTĐ theo yếu tố bất định của thông số vận hành được minh họa trong sơ đồ khối

Hình 2. Như đã phân tích ở trên, phương pháp Monte-Carlo được áp dụng trong bài báo này.



Hình 2. *Sơ đồ khối tính toán và phân tích HTĐ*

Dựa vào các dữ liệu quá khứ thu thập được hoặc được cung cấp bởi các phương pháp dự báo cho các đại lượng đầu vào như công suất phụ tải, công suất đầu ra của các nhà máy năng lượng gió, năng lượng mặt trời,… cũng như thông tin về tần suất sự cố của các đường dây và các tổ máy phát,… các quy luật phân bố của các đại lượng này được rút ra và biểu diễn bằng các hàm phân bố xác suất. Đây là thông tin đầu vào của bài toán.

Tiếp theo, quá trình mẫu hóa được tiến hành cho các đại lượng đầu vào dựa trên các hàm phân bố xác suất đạt được ở trên [6-8]. Trong mô phỏng Monte-Carlo, độ chính xác của phương pháp phụ thuộc vào số lượng mẫu (N) được chọn (số lượng mẫu lớn thì cho kết quả với độ chính xác cao). Sau khi mẫu hóa, quá trình giải bài toán tính toán trào lưu công suất (Newton-Raphson, Gauss-Seidel) được thực hiện đối với từng mẫu.

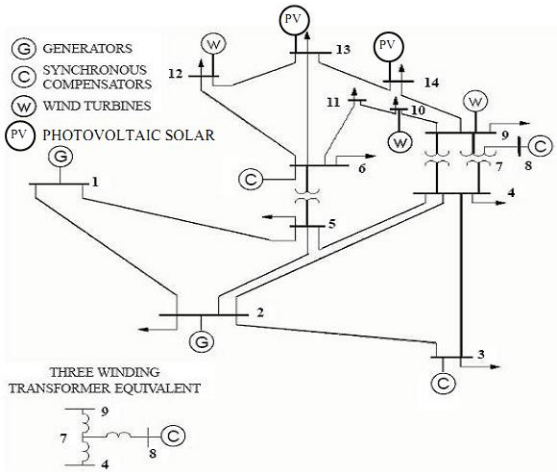
Kết quả tính toán là giá trị của các thông số vận hành như điện áp tại các nút, công suất và dòng điện truyền tải trên các nhánh, góc pha,… tương ứng với từng mẫu. Quá trình này được lặp lại cho từng mẫu cho đến khi tất cả N mẫu được tính toán.

Cuối cùng, kết quả đầu ra của quá trình tính toán là tập hợp N giá trị cho từng thông số vận hành của HTĐ, từ đó xây dựng được hàm phân bố của từng đại lượng. Các hàm này phản ánh một cách đầy đủ quy luật biến đổi của các đại lượng trong suốt quá trình vận hành, để từ đó có thể đánh giá một cách đầy đủ sự làm việc cũng như mức độ an toàn của HTĐ.

4. Áp dụng

Phương pháp trình bày ở mục 3 được áp dụng cho HTĐ mẫu IEEE-14 nút sửa đổi có sơ đồ như Hình 3.

HTĐ được xem xét bao gồm: 2 nhà máy điện truyền thống nối vào nút 1 (thủy điện) và 2 (nhiệt điện); các nhà máy điện gió được nối vào các nút 9, 10 và 12 với công suất lắp đặt lần lượt là 27, 15 và 12 MW; các nhà máy điện mặt trời được nối vào nút 13 và 14 với công suất lắp đặt lần lượt là 15 và 21 MW. Công suất phụ tải tại các nút như trong Bảng 1. Thông tin chi tiết về các thông số lưới như trong [14].



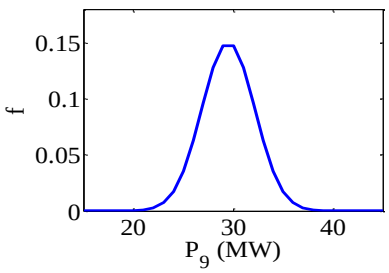
Hình 3. *HTĐ mẫu IEEE-14 nút sửa đổi*

Bảng 1. *Công suất phụ tải tại các nút*

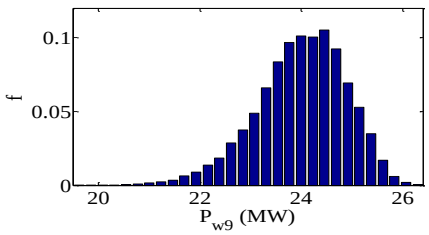
Nút	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**9**
P (MW)	*21,7*	*94,2*	*47,8*	*7,6*	*11,2*	*53,5*
Q (MVAr)	*12,7*	*19,0*	*-3,9*	*1,6*	*7,5*	*16,6*
Nút	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**-**
P (MW)	*21,0*	*3,5*	*15,1*	*25,5*	*32,9*	-
Q (MVAr)	*5,8*	*1,8*	*1,6*	*5,8*	*5,0*	-

Đối với một HTĐ thực tế, dựa vào các thông tin có được từ phụ tải, nguồn, lưới,… các quy luật phân bố của các đại lượng này được xây dựng. Tuy nhiên, trong ví dụ tính toán này do không có số liệu thực tế về các quy luật phân bố của các đại lượng đầu vào, cho nên ở đây các hàm phân bố được giả sử.

Phụ tải giả sử biến đổi theo quy luật phân bố chuẩn với giá trị kỳ vọng là giá trị xác lập và độ lệch chuẩn bằng 9% kỳ vọng. Hình 4 mô tả hàm phân bố công suất tác dụng của phụ tải tại nút 9.



Hình 4. *Hàm mật độ của công suất tác dụng của phụ tải tại nút 9*



Hình 5. *Hàm mật độ của hàm phân bố của công suất đầu ra của nhà máy điện gió nối vào nút 9*

Công suất đầu ra của các nhà máy điện gió và mặt trời giả sử tuân theo quy luật phân bố *Beta* [15] với hàm mật độ:

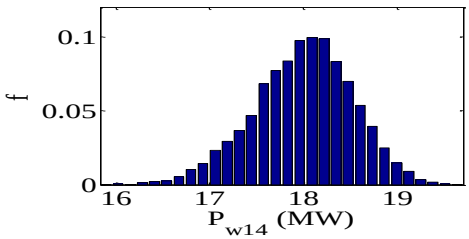
$$f(x) = x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} m \qquad (3)$$

Trong đó:

• α và β là hai tham số đặc trưng của hàm *Beta*, được tính toán dựa vào kỳ vọng μ và độ lệch chuẩn σ (ở đây giả sử bằng 12% giá trị công suất lắp đặt) như sau: $\alpha = \frac{(1-\mu)\mu^2}{\sigma^2} - \mu$; $\beta = \frac{1-\mu}{\mu}\sigma$

• m là hệ số được tính như sau: $m = \left[\int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx\right]^{-1}$

• $x = \frac{p_{out}}{p_{inst}}$ (p_{inst} là công suất lắp đặt của nhà máy; p_{out} là công suất đầu ra; giả sử giá trị kỳ vọng của công suất đầu ra của các nhà máy điện gió nối vào các nút 9, 10 và 12 lần lượt là 24, 12 và 9 MW; các nhà máy điện mặt trời nối vào nút 13 và 14 lần lượt là 12 và 18 MW).

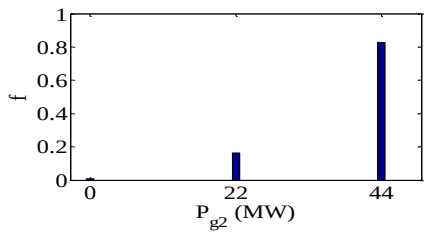


Hình 6. *Hàm mật độ của hàm phân bố của công suất đầu ra của nhà máy điện mặt trời nối vào nút 14*

Hình 5 mô tả hàm phân bố của công suất đầu ra của nhà máy điện gió nối vào nút 9. Hình 6 mô tả hàm phân bố của công suất đầu ra của nhà máy điện mặt trời nối vào nút 14.

Tương tự, xây dựng các hàm phân bố công suất đầu ra của tất cả các nhà máy điện gió và mặt trời còn lại.

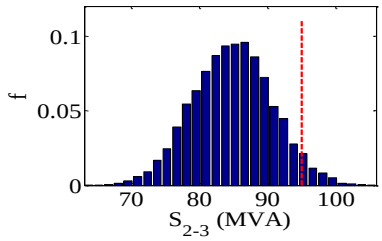
Nhà máy điện nối vào nút 1 (thủy điện) bao gồm 10 máy phát giống nhau, mỗi máy công suất 25 MW, xác suất sự cố 8%; nhà máy điện nối vào nút 2 (nhiệt điện) bao gồm 2 tổ máy phát giống nhau, mỗi tổ công suất 22 MW, xác suất sự cố 9%. Hàm phân bố của công suất đầu ra của các nhà máy này tuân theo quy luật *Binomial*. Hình 7 mô tả hàm mật độ của công suất đầu ra nhà máy 2.



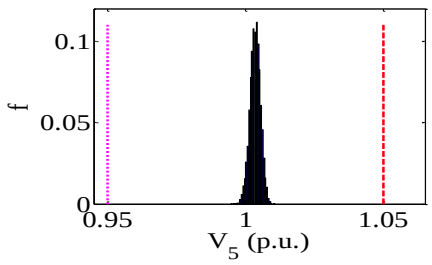
Hình 7. *Hàm mật độ của công suất đầu ra nhà máy 2*

Thuật toán Hình 2 được áp dụng, trong đó 10.000 mẫu được chọn để mô phỏng và tính toán. Dựa trên các hàm phân bố của các đại lượng đầu vào, quá trình mẫu hóa được thực hiện và quá trình tính toán được thực hiện cho từng mẫu.

Trên Hình 8, hàm phân bố của công suất biểu kiến truyền tải trên đường dây từ nút 2 đến nút 3 được biểu diễn. Hình 9 mô tả hàm phân bố của điện áp tại nút 5. Dựa vào các quy luật phân bố này, ta có thể đánh giá được một cách đầy đủ sự biến đổi của các đại lượng trong quá trình vận hành, từ đó xác định được điều kiện vận hành và mức độ làm việc an toàn của HTĐ.



Hình 8. *Hàm phân bố của công suất truyền tải trên đường dây từ nút 2 đến nút 3*



Hình 9. *Hàm phân bố của điện áp tại nút 5*

Giả sử giới hạn công suất truyền tải trên đường dây từ nút 2 đến nút 3 là $S_{2-3}^{\max} = 95\,MVA$ (đường thẳng đứng trên Hình 8), từ hàm phân bố trên Hình 8 ta có thể xác định được xác suất (ký hiệu *Pro*) để công suất truyền tải vượt quá giới hạn cho phép (mức độ nguy hiểm do quá tải của đường dây) như sau:

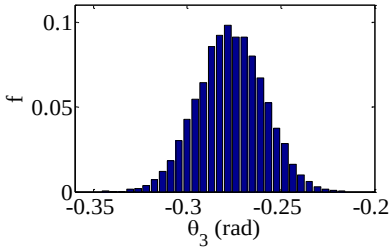
$$\Pr o\left\{S_{2-3} > S_{2-3}^{\max}\right\} = 4,03\%$$

Đối với điện áp, từ hàm phân bố ta có thể đánh giá được điện áp tại một nút nào đó như thế nào so với giới hạn làm việc. Giả sử vùng làm việc của điện áp tại nút 5 là $[0,95;1,05](p.u.)$ (hai đường thẳng đứng trên Hình 9), từ quy luật phân bố của điện áp ta có thể xác định được xác suất để điện áp tại nút 5 nằm trong vùng làm việc cho phép trong quá trình vận hành:

$$\Pr o\left\{0,95 \le V_5 \le 1,05\right\} = 100\%$$

Như vậy, qua tính toán ta có thể kết luận rằng, trong suốt quá trình làm việc với nguồn và tải luôn biến đổi, điện áp tại nút 5 luôn nằm trong vùng làm việc cho phép.

Hàm phân bố của góc pha tại các nút cũng có thể được xác định, để từ đó thấy được khả năng biến đổi của góc pha trong quá trình vận hành. Hình 10 mô tả hàm phân bố của góc pha tại nút 3 (ký hiệu θ_3), trong đó θ_3 có khả năng dao động trong vùng $[-0,346;-0,215](rad)$.



Hình 10. *Hàm phân bố của góc pha tại nút 3*

Sau khi có được hàm phân bố của tất cả các thông số chế độ (*công suất truyền tải, điện áp nút, góc pha,…*), tình trạng làm việc của HTĐ lúc đó được đánh giá một cách đầy đủ nhất.

5. Kết luận

Bài báo trình bày phương pháp tính toán và phân tích hệ thống điện theo yếu tố bất định của thông số vận hành. Kết quả đạt được từ bài toán cho phép phân tích và đánh giá sự làm việc của HTĐ một cách đầy đủ nhất, khắc phục được những hạn chế của các phương pháp tính toán truyền thống trong đó các yếu tố bất định trong HTĐ không được xét đến. Phương pháp được trình bày có thể áp dụng để tính toán và phân tích cho HTĐ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] G. J. Anders, *Probability Concepts in Electric Power Systems*, Wiley, New York, 1990.

[2] B. Borkowska, "Probabilistic load flow", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, PAS-93(4), 1974, 752–759.

[3] P. Jorgensen, J. S. Christensen, and J. O. Tande, "Probabilistic load flow calculation using Monte Carlo techniques for distribution network with wind turbines", *Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Athens, Greece, 14-16 October 1998, 1146-1151.

[4] T. Cui and F. Franchetti, "A quasi-Monte Carlo approach for radial distribution system probabilistic load flow", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), *2013 IEEE PES*, 24-27 Feb. 2013, 1–6.

[5] R. Billinton and W. Li, *Reliability Assessment of Electrical Power Systems Using Monte Carlo Methods*, Plenum Press, New York, 1994.

[6] Liu, J.S., *Monte Carlo Strategies in Scientific Computing*, Springer-Verlag, New York, USA, 2001.

[7] Rubinstein, R. Y. and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, 2nd Ed. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2008.

[8] J. M. Hammenley and D. C. Handscomb, *Monte Carlo Methods*, Norwich: Fletcher and Son Ltd, 1964.

[9] P. Zhang and S. T. Lee, "Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier", *IEEE Trans. Power Syst.*, 19(1), Feb. 2004, 676–682.

[10] M. Fan, V. Vittal, G. T. Heydt, and R. Ayyanar, "Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants", *IEEE Trans. Power Syst.*, 27(4), Nov. 2012, 2251–2261.

[11] R. N. Allan and M. R. G. Al-Shakarchi, "Probabilistic techniques in A.C. load-flow analysis", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 124(2), 1977, 154–160.

[12] C. L. Su, "Probabilistic load-flow computation using point estimate method", *IEEE Trans. Power Syst.*, 20(4), 2005, 1843–1851.

[13] Zhaohong Bie, Gan Li, Hui Liu, Xifan Wang, "Studies on Voltage Fluctuation in the Integration of Wind Power Plants Using Probabilistic Load Flow", *IEEE PES General Meeting*, Pittsburgh, USA, 2008.

[14] R. Christie, Power system test case archive, Aug. 1993. available online at http://www.ee.washington.edu/research/pstca.

[15] H. Bludszuweit, J. A. Domínguez-Navarro, and A. Llombart, "Statistical Analysis of Wind Power Forecast Error", *IEEE Trans. Power Syst.*, 23(3), 2008, 983–991.

(BBT nhận bài: 29/03/2015, phản biện xong: 15/04/2015)