

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH SỰ KIỆN LỖM ĐIỆN ÁP TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

ANALYZING THE CHARACTERISTICS OF VOLTAGE SAG IN POWER DISTRIBUTION NETWORK

Ngô Minh Khoa¹, Đinh Thành Việt², Nguyễn Hữu Hiếu²

¹Trường Đại học Quy Nhơn; Email: nmkhoaqu@gmail.com

²Đại học Đà Nẵng; Email: dtviet@ac.udn.vn; huuhieu019@yahoo.com

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu, phân tích và đánh giá đặc điểm sự kiện lỗi điện áp trên lưới điện phân phối (LĐPP) với sự hỗ trợ của công cụ Matlab/Simulink. Việc nghiên cứu các sự cố gây ra lỗi điện áp thường gặp trong hệ thống điện (HTĐ) như ngắn mạch (NM), khởi động động cơ không đồng bộ (ĐCKĐB) cỡ lớn, ... để phân tích, đánh giá và xác định các tham số đặc trưng của lỗi điện áp dựa trên công cụ mô phỏng SimPowerSystems của Matlab/Simulink. Đồng thời bài báo cũng trình bày việc nghiên cứu ảnh hưởng của hệ thống bảo vệ rơle (BVRL) đến thời gian tồn tại của sự kiện lỗi điện áp. Ngoài ra, các đặc tính khác của lỗi điện áp như dịch góc pha và hình dáng của lỗi điện áp cũng được nghiên cứu và phân tích. Các kết quả nghiên cứu về sự kiện lỗi điện áp góp phần tăng cường nhận thức và khả năng ngăn chặn sự xuất hiện của nó trên LĐPP, giúp đảm bảo và nâng cao chất lượng điện năng, mang lại sự hài lòng cho người sử dụng điện.

Từ khóa - lỗi điện áp; lưới điện phân phối; chất lượng điện áp; dao động điện áp; ngắn mạch; bảo vệ rơle.

1. Đặt vấn đề

Lỗi điện áp là một trong những sự kiện chất lượng điện năng nguy hại nhất bởi vì chúng ảnh hưởng đến sự vận hành của nhiều thiết bị điện ở nơi tiêu thụ. Đây là hiện tượng giảm trị hiệu dụng điện áp trong một khoảng thời gian ngắn được gây ra bởi các sự cố NM, tăng tải và khởi động ĐCKĐB cỡ lớn [1, 2]. Nguyên nhân thông thường nhất gây ra lỗi điện áp là do NM. Các sự cố NM trên đường dây (ĐD) truyền tải hoặc phân phối có thể ảnh hưởng đến số lượng lớn hoặc nhỏ các khách hàng. NM trên ĐD truyền tải có thể ảnh hưởng đến các thiết bị điện nhạy cảm lên tới hàng trăm km tính từ vị trí sự cố [3]. Đối với ĐD truyền tải và phân phối, lỗi điện áp do NM trên các xuất tuyến song song sẽ gây ra sự tác động nhằm của các thiết bị tại khách hàng công nghiệp [4]. Do đó, trong bài báo này sự cố NM được khảo sát để phân tích đặc điểm lỗi điện áp. Các ĐCKĐB cỡ lớn được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp và khi khởi động các động cơ này cũng có thể gây ra lỗi điện áp [5]. Trong trường hợp này, lỗi điện áp có hình dáng không phải hình chữ nhật được gây ra do giá trị dòng điện khởi động động cơ tăng cao. Do đó, khởi động ĐCKĐB cũng được khảo sát để nghiên cứu hình dáng của lỗi điện áp.

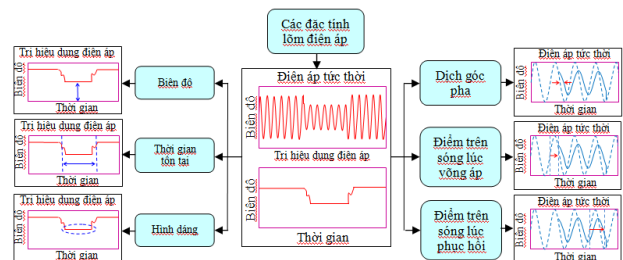
Lỗi điện áp được đặc trưng bởi biên độ, thời gian tồn tại, dịch góc pha và hình dáng của nó. Để thiết lập các đặc tính này, chúng ta cần nghiên cứu và khảo sát các thông số của HTĐ trong quá trình xảy ra các sự cố như NM, khởi động ĐCKĐB cỡ lớn, tăng tải, ... Trong bài báo này, lỗi điện áp được mô phỏng bằng cách sử dụng công cụ SimPowerSystems của Matlab Simulink với các kịch bản được nghiên cứu ở đây là: NM có xét và không có xét đến BVRL, dịch góc pha và khởi động ĐCKĐB cỡ lớn.

Abstract - This paper presents an approach to researching, analyzing and evaluating the characteristics of voltage sag in power distribution network by using the Matlab/Simulink tool. A study of common events that caused voltage sag in the power system such as fault, starting of large induction motor, etc. conducted to analyze, evaluate and determine the characteristic parameters of voltage sag has been carried out basing on the power system simulation toolbox, Sim Power Systems of Matlab/Simulink. In addition, the effects of relay protection systems on the duration of voltage sags have also been conducted in this paper. Moreover, other characteristics of the voltage sag such as phase-angle jump and shape of voltage sag have been investigated and analyzed. The research results on voltage sag will help improve people's awareness and prevent the appearance of voltage sag in the distribution network, ensuring and enhancing power quality and bringing satisfaction to electricity customers.

Key words - voltage sag; distribution network; voltage quality; voltage disturbance; fault; relay protection.

2. Đặc tính sự kiện lỗi điện áp

Lỗi điện áp có các đặc điểm chính được trình bày như trong hình 1.



Hình 1. Các đặc tính của lỗi điện áp

+ **Lỗi điện áp**: Sự giảm giá trị hiệu dụng (rms) của điện áp xuống giá trị từ 0,1 đến 0,9 pu ở tần số cơ bản trong khoảng thời gian từ 0,5 chu kỳ đến 1 phút [6].

+ **Biên độ**: Giá trị hiệu dụng nhỏ nhất của điện áp trong suốt sự kiện lỗi điện áp [1, 2].

+ **Thời gian tồn tại**: Là khoảng thời gian mà giá trị hiệu dụng của điện áp nhỏ hơn ngưỡng (0,9 pu) [1, 2].

+ **Dịch góc pha**: Sự khác nhau giữa góc pha của điện áp khi xảy ra sự kiện lỗi điện áp và góc pha của điện áp trước khi xảy ra sự kiện [1, 2].

+ **Hình dáng**: Định nghĩa sự thay đổi của trị hiệu dụng của điện áp trong suốt sự kiện lỗi điện áp. Tùy theo hình dáng của chúng mà lỗi điện áp được phân loại thành: lỗi điện áp hình chữ nhật (giá trị điện áp trị hiệu dụng là hằng số) và lỗi điện áp không hình chữ nhật (giá trị điện áp trị hiệu dụng thay đổi) [1, 7].

+ **Điểm trên sóng lúc xảy ra lỗi điện áp**: Là góc pha

của sóng điện áp cơ bản tại thời điểm bắt đầu xảy ra lỗi điện áp [1, 2].

+ *Điểm trên sóng lúc phục hồi điện áp*: Là góc pha của sóng điện áp cơ bản tại thời điểm điện áp trở lại bình thường [1, 2].

+ *Điện áp trước sự cố*: Là giá trị điện áp trước khi xảy ra lỗi điện áp [1, 2].

Các kịch bản điển hình trong HTĐ được nghiên cứu bằng cách sử dụng các công cụ mô phỏng để xác định các tham số cần quan tâm dựa theo các tiêu chuẩn sau [8]:

+ Thời gian tồn tại lỗi điện áp phụ thuộc vào thời gian cô lập sự cố bởi hệ thống BVRL. Nó có thể được xác định thông qua thời gian tác động của BVRL khi cô lập các sự cố trên lưới điện.

+ Biên độ và dịch góc pha phụ thuộc vào vị trí sự cố và tổng trở của ĐD. Chúng có thể được xác định tại các nút khác nhau của HTĐ.

+ Hình dáng lỗi điện áp là một đặc tính khác cũng được nghiên cứu trong bài báo này, các dạng lỗi điện áp có hình dáng không phải hình chữ nhật có thể được nghiên cứu thông qua việc mô phỏng quá trình khởi động các ĐCKĐB cỡ lớn trong HTĐ.

2.1. Mô tả sự kiện lỗi điện áp

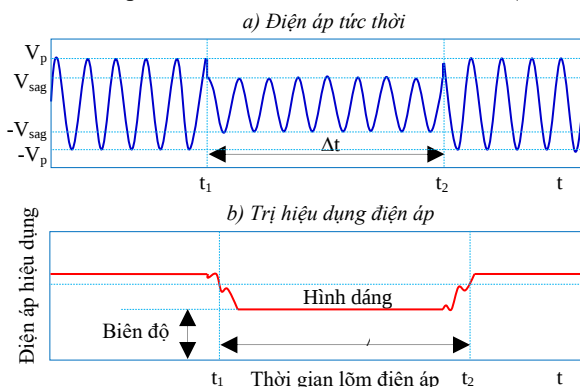
Lỗi điện áp có thể được mô tả bằng hàm toán học mà được định nghĩa bởi các tham số dựa trên các đặc tính của nó như sau:

$$v(t) = \begin{cases} V_p \sin(\omega t) & \text{khí } t < t_1 \\ V_{psag} \sin(\omega t + \phi) & \text{khí } t_1 < t < t_2 \\ V_p \sin(\omega t) & \text{khí } t > t_2 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

- V_p : biên độ điện áp trước khi xảy ra lỗi điện áp;
- ω : tần số góc;
- V_{psag} : biên độ điện áp suốt sự kiện lỗi điện áp;
- ϕ : dịch góc pha;
- t_1 : thời điểm xảy ra lỗi điện áp;
- t_2 : thời điểm điện áp phục hồi;
- $\Delta t = t_2 - t_1$: thời gian lỗi điện áp.

Lỗi điện áp có thể được mô hình hóa bởi hàm sin (hình 2.a)



Hình 2. Các đặc tính của lỗi điện áp trong miền thời gian và điện áp trị hiệu dụng của nó

Giá trị điện áp trị hiệu dụng được tính toán từ điện áp sóng hình sin với công thức sau [1, 2]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (2)$$

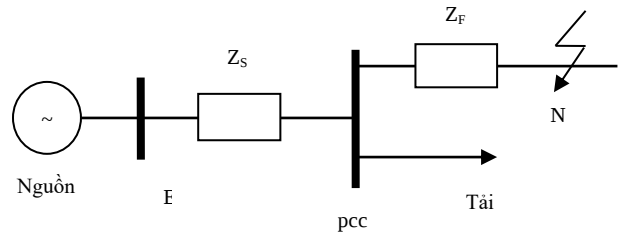
Trong đó:

- N : Số mẫu trong một chu kỳ;
- v_i : điện áp lấy mẫu theo miền thời gian.

Trong bài báo này tần số lấy mẫu được sử dụng là 12,8 kHz (hoặc 256 mẫu trong 01 chu kỳ tần số 50 Hz). Đặc điểm điện áp trị hiệu dụng điển hình được thể hiện trong hình 2.b.

2.2. Cơ sở tính toán biên độ lỗi điện áp

Hình 3 thể hiện mô hình cơ bản để tính toán biên độ lỗi điện áp khi xảy ra NM 3 pha trên lưới điện hình tia.



Hình 3. Mô hình tính toán biên độ lỗi điện áp

Giả thiết bỏ qua dòng điện tải trước và trong khi xảy ra sự kiện lỗi điện áp vì nó có giá trị không đáng kể, do đó điện áp tại pcc được tính toán như sau:

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E \quad (3)$$

Trong đó:

Z_F : tổng trở xuất tuyến (từ pcc đến điểm N);

Z_S : tổng trở nguồn (giữa nguồn và pcc);

E : điện áp nguồn.

2.3. Phương pháp tính toán dịch góc pha

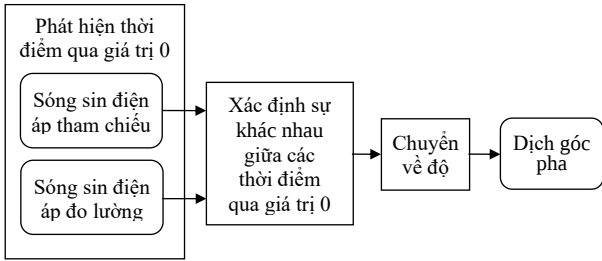
Mô hình tính toán biên độ lỗi điện áp trong Hình 3 cũng có thể được sử dụng để phân tích đặc tính dịch góc pha. Ta coi Z_S và Z_F là các đại lượng phức và kí hiệu là $\bar{Z}_S$ và $\bar{Z}_F$. Giả sử $E = 1$ sử dụng cách tính toán trong hệ đơn vị tương đối thì (3) được viết lại như sau:

$$\bar{V}_{sag} = \frac{\bar{Z}_F}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_F} \quad (4)$$

Trong đó $\bar{Z}_S = R_S + jX_S$ và $\bar{Z}_F = R_F + jX_F$. Argument của $\bar{V}_{sag}$ tương đương với dịch góc pha và được cho bởi phương trình sau:

$$\Delta\phi = \arg(\bar{V}_{sag}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad (5)$$

Nếu $(X_S / R_S) = (X_F / R_F)$ thì (5) sẽ bằng 0 và sẽ không có dịch góc pha. Do đó dịch góc pha chỉ xảy ra nếu tỉ số X/R của nguồn và ĐD khác nhau. Thuật toán tính toán dịch góc pha như hình 4.

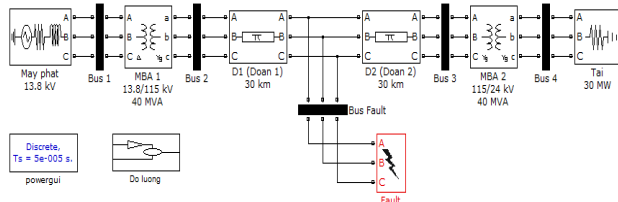


Hình 4. Thuật toán để tính toán dịch góc pha

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Lỗi điện áp đo NM

Hình 5 thể hiện HTĐ được sử dụng trong bài báo này để nghiên cứu sự kiện lỗi điện áp đo NM gây ra.



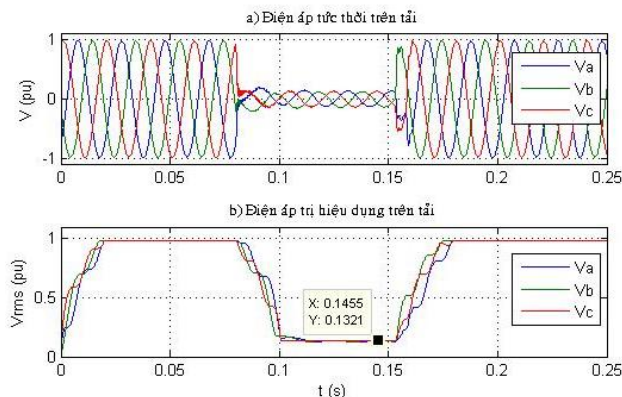
Hình 5. Phân tích lỗi điện áp đo NM

Bảng 1. Tham số mô phỏng biên độ

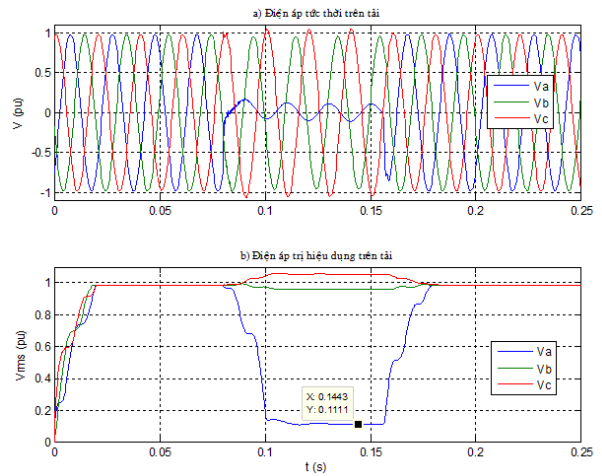
Phần tử	Tham số
Máy phát	$U = 13,8$ (kV); $f = 50$ (Hz)
MBA 1	$U = 13,8/115$ (kV); $S_{dm} = 40$ (MVA)
MBA 2	$U = 115/24$ (kV); $S_{dm} = 40$ (MVA)
ĐD	$L = 2 \times 30$ (km); $R_0 = 0,01273$ (Ω /km); $L_0 = 0,9337$ (mH/km); $C_0 = 0,01274$ (μ F/km)
Tải	30 (MW)
NM	$Z_F = 10$ (Ω); $t_1 = 80$ (ms); $t_2 = 150$ (ms)

HTĐ bao gồm một máy phát 13,8 kV, MBA 40 MVA tăng áp lên tới 115 kV và ĐD dài 60 km. Ở cuối ĐD có một MBA 40 MVA giảm áp xuống còn 24 kV để cấp cho phụ tải 30 MW trên LĐPP. Các hệ thống đo lường hiển thị các tín hiệu điện áp và dòng điện tại các nút trên hệ thống. Hai kịch bản được nghiên cứu ở đây là: NM 3 pha và NM 1 pha xảy ra ở giữa ĐD (30 km tính từ phía nguồn). Bảng 1 tóm tắt các tham số để phân tích biên độ lỗi điện áp.

Hình 6 thể hiện các kết quả khi NM 3 pha, a) sóng hình sin 3 pha với biên độ được tính trong hệ đơn vị tương đối, b) đồ thị điện áp trị hiệu dụng. Lỗi điện áp 3 pha 0,1321 pu do NM 3 pha và thời gian tồn tại lỗi điện áp là 4 chu kỳ.



Hình 6. Điện áp trên tải khi NM 3 pha giữa ĐD



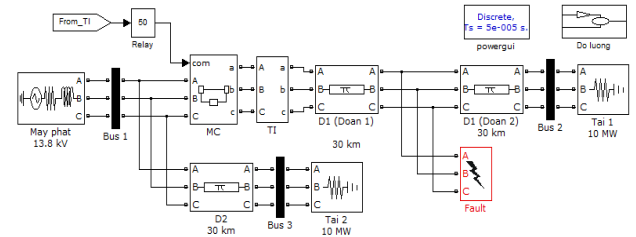
Hình 7. Điện áp trên tải khi NM 1 pha giữa ĐD

Các kết quả mô phỏng khi xảy ra NM 1 pha được thể hiện trong hình 7. Trong trường hợp này có biên độ lỗi điện áp là 0,1111 pu. Trong cả hai trường hợp trên, các tín hiệu sóng điện áp được ghi tại nút 4 (hình 5) nhằm thể hiện sự ảnh hưởng của sự cố NM đến phụ tải trên LĐPP.

3.2. Phân tích thời gian lỗi điện áp có xét đến BVRL

Thời gian lỗi điện áp phụ thuộc vào thời gian tác động của BVRL. Có nhiều dạng bảo vệ trong HTĐ và mỗi một dạng có thời gian cắt NM nhất định. Hơn nữa, thời gian tác động của bảo vệ phải được phối hợp với các bảo vệ khác [9].

Các sự cố NM trên lưới điện truyền tải được loại trừ nhanh hơn sự cố trên LĐPP. Trên các ĐD truyền tải role khoảng cách và role so lệch có thời gian tác động rất nhanh trong khi ở LĐPP thì bảo vệ quá dòng cần thời gian trễ lớn để phối hợp bảo vệ đảm bảo tính chọn lọc.

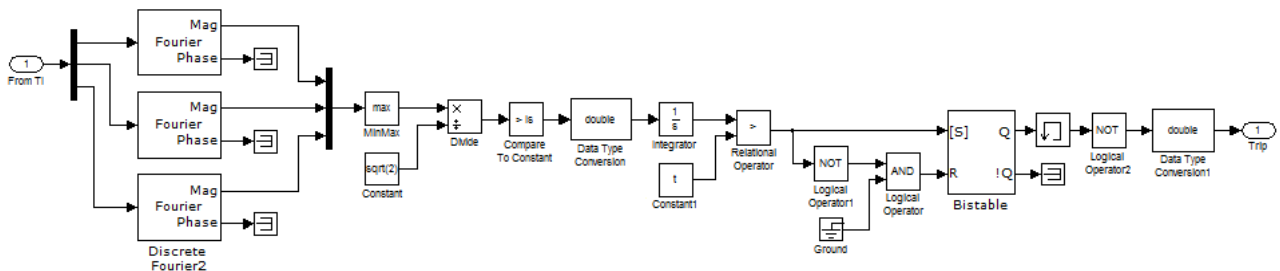


Hình 8. Phân tích thời gian lỗi điện áp có xét đến BVRL

Bảng 2. Các tham số mô phỏng thời gian lỗi điện áp

Phần tử	Tham số
Nguồn áp	$U = 115$ (kV); $f = 50$ (Hz)
D1, D2	D1: $L = 2 \times 30$ (km); D2: $L = 30$ (km); $R_0 = 0,01273$ (Ω /km); $L_0 = 0,9337$ (mH/km); $C_0 = 0,01274$ (μ F/km)
Các tải	10 (MW); $\cos \varphi = 1$
NM	$Z_F = 4$ (Ω); $t_1 = 80$ (ms); NM vĩnh viễn
BVQD	$I_{kd} = 10$ (pu); $t = 50$ (ms)

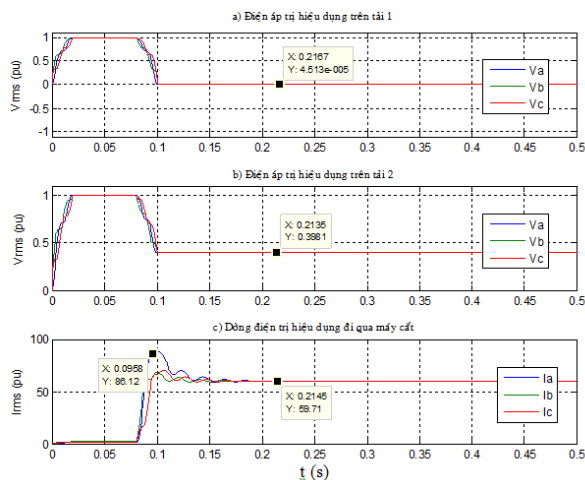
Bởi vì trong Matlab/Simulink không tích hợp sẵn các mô hình role nên việc xây dựng mô hình thiết bị BVRL trên Matlab/Simulink là cần thiết cho nghiên cứu lỗi điện áp. Xét HTĐ như hình 8 có đặt BVQD cắt nhanh (chức năng 50, theo tiêu chuẩn ANSI) [10]. Mô hình role BVQD cắt nhanh được xây dựng trong Matlab/Simulink có mô hình chi tiết như hình 9.



Hình 9. Mô hình role BVQD

Hệ thống bao gồm hai ĐD cấp điện áp 115 kV có chiều dài lần lượt là 60 km (D1) và 30 km (D2). Mỗi một ĐD cấp điện cho tải 10 MW (Tải 1 và 2). Giả thiết sự cố NM 3 pha vĩnh viễn ở giữa D1 sẽ gây ra sự gián đoạn cho phụ tải 1 và lôm điện áp trên tải 2. Hai kịch bản được nghiên cứu đối với trường hợp này là: Không có BVQD và có BVQD. Bảng 2 tóm tắt các tham số để phân tích thời gian lôm điện áp.

Hình 10 thể hiện các kết quả của kịch bản đầu tiên. Trong hình a) sự gián đoạn xảy ra trên tải 1 do sự cố NM ở giữa D1; trong hình b) điện áp trên tải 2 rơi xuống 0,3981 pu; trong c) dòng điện đỉnh được đo lường ở ĐD xảy ra sự cố là 86,12 pu và xác lập ở giá trị 59,71 pu.

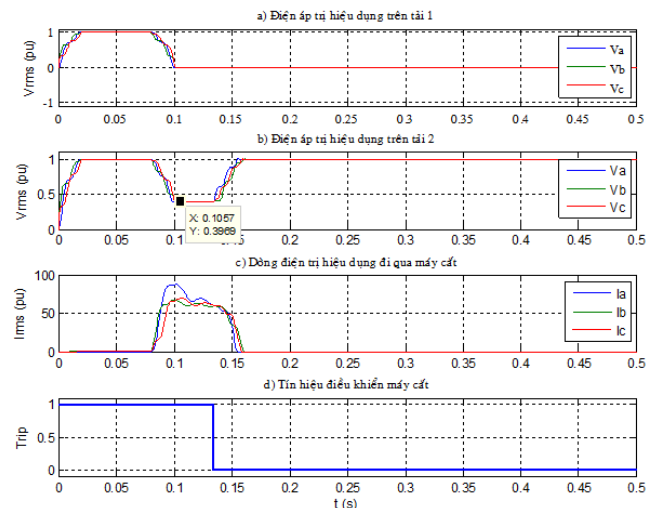


Hình 10. Kết quả khi không xét BVQD

Đối với kịch bản thứ hai, mô hình BVQD được tích hợp trong Matlab/Simulink. Trong mô hình này, dòng điện trị hiệu dụng của các pha được so sánh với dòng điện khởi động trong hệ đơn vị tương đối (nếu bất kì pha nào có dòng điện vượt dòng điện khởi động thì BVRL sẽ đưa tín hiệu đi cắt NM).

Hình 11 thể hiện kết quả sự kiện lôm điện áp khi có xét đến role BVQD. Khi tín hiệu ở mức 1 thì máy cắt tương

ứng sẽ đóng, do đó ĐD được bảo vệ vẫn duy trì cấp điện cho phụ tải. Khi tín hiệu điều khiển ở mức 0 thì máy cắt sẽ mở và cắt điện ĐD để cô lập vị trí sự cố. Ban đầu thì BVQD phát hiện sự cố khi dòng điện lớn hơn 10 lần so với dòng điện định mức và sẽ thay đổi trạng thái sau khoảng thời gian trễ định trước (50 ms như hình 11), do đó máy cắt sẽ được mở ra để cô lập điểm sự cố.

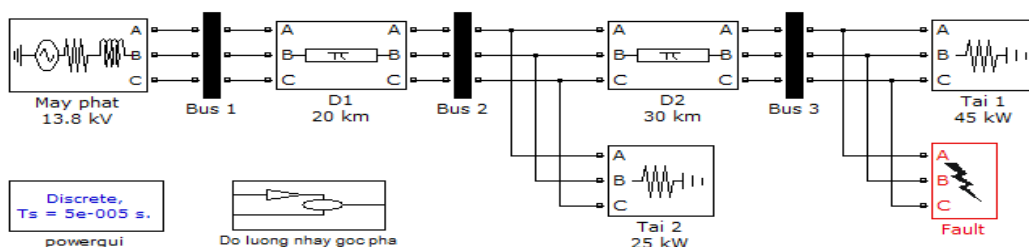


Hình 11. Kết quả khi có xét đến BVQD

Hình 11 thể hiện các kết quả khi có BVQD. Trong hình a) điện áp trên tải 1 rơi xuống bằng 0 khi sự cố xảy ra. Khi bảo vệ tác động (duy trì ở giá trị 0) bởi vì ĐD không được cấp điện; trong hình b) tải 2 bị ảnh hưởng bởi lôm điện áp có biên độ là 0,3994 pu và thời gian tồn tại của lôm điện áp được xác định bởi thời gian loại trừ sự cố của BVQD (xấp xỉ bằng 50 ms); trong hình c) dòng điện trên D1 tăng khi bắt đầu xảy ra NM. Nhưng đến khi bảo vệ tác động thì dòng điện giảm xuống bằng 0, nghĩa là ĐD không được cấp điện.

3.3. Đánh giá tham số dịch góc pha

Hình 12 thể hiện HTĐ được nghiên cứu để phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến tham số dịch góc pha của lôm điện áp. Bảng 3 tóm tắt các tham số.

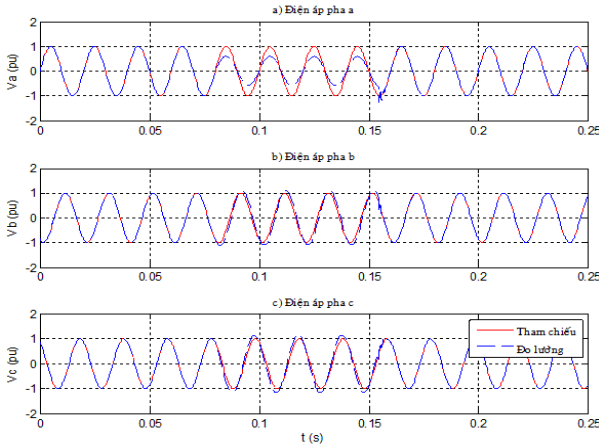


Hình 12. Mô hình phân tích dịch góc pha

Bảng 3. Tham số mô hình dịch góc pha

Phần tử	Tham số
Máy phát	$U = 13,8$ (kV); $f = 50$ (Hz)
D1	$L = 20$ (km); $R_0 = 0,01273$ (Ω /km); $L_0 = 0,9337$ (mH/km); $C_0 = 0,01274$ (μ F/km)
D2	$L = 30$ (km); $R_0 = 0,051$ (Ω /km); $L_0 = 0,9337$ (mH/km); $C_0 = 0,01274$ (μ F/km)
Tải 1, 2	Tải 1: 45 (kW); Tải 2: 25 (kW)
NM	NM pha A; $Z_F = 1,5$ (Ω); $t_{on} = 80$ (ms); $t_{off} = 150$ (ms)

Các kết quả mô phỏng trong cả ba pha được thể hiện trong hình 13. Các kết quả của trường hợp mô phỏng này là: dịch góc pha trong pha A là 14,47 độ; trong pha B là 6,54 độ; và trong pha C là 7,56 độ.

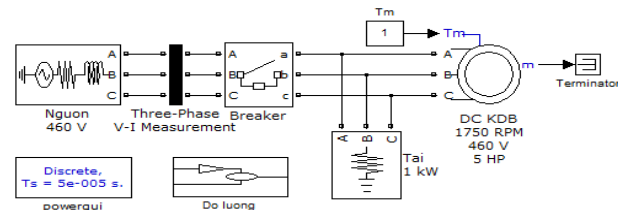


Hình 13. Kết quả mô phỏng dịch góc pha

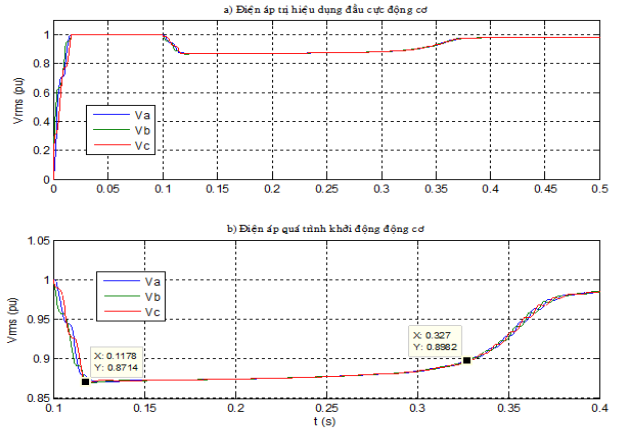
3.4. Hình dáng lổm điện áp do khởi động ĐCKĐB

Một nguyên nhân khác gây ra lổm điện áp là do khởi động ĐCKĐB cỡ lớn. Suốt thời gian khởi động ĐCKĐB dòng điện khởi động tăng cao hơn nhiều so với dòng điện định mức của nó (thể hiện là 5 - 6 lần). Dòng điện này duy trì ở giá trị cao cho đến khi động cơ dần đạt đến tốc độ định mức [1, 2]. Khi đó xảy ra hiện tượng lổm điện áp có hình dáng không phải hình chữ nhật. Ảnh hưởng của quá trình khởi động của ĐCKĐB đến điện áp được mô phỏng bởi mô hình như hình 14.

Sơ đồ mô phỏng gồm có nguồn điện áp 460 V cấp điện cho một tải 1 kW và ĐCKĐB 5 HP (3,73 kW); ĐCKĐB sẽ đóng điện sau 100 ms để quan sát ảnh hưởng của quá trình khởi động động cơ đến lổm điện áp. Hình 15 thể hiện lổm điện áp trên tải có hình dáng không phải hình chữ nhật có biên độ là 0,8723 pu và thời gian tồn tại là 200 ms (thời gian để mà động cơ đạt đến tốc độ định mức).



Hình 14. Lổm điện áp do khởi động ĐCKĐB



Hình 15. Lổm điện áp do khởi động ĐCKĐB

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày việc nghiên cứu, phân tích và đánh giá các đặc tính của sự kiện lổm điện áp trên LĐPP. Các kết quả mô phỏng, phân tích và đánh giá cho thấy rõ các tham số chính của sự kiện lổm điện áp do các nguyên nhân khác nhau như NM và khởi động ĐCKĐB cỡ lớn.

Các nghiên cứu này cho thấy đối với các nguyên nhân gây lổm điện áp khác nhau thì sẽ có đặc tính và tham số khác nhau chẳng hạn như về hình dáng và về hiện tượng dịch góc pha,... Ngoài ra bài báo cũng đã nghiên cứu ảnh hưởng của hệ thống BVRL đối với thời gian tồn tại lổm điện áp trên HTĐ. Đồng thời trong nghiên cứu này cũng đã tích hợp mô hình của role BVQD trên Matlab Simulink để hỗ trợ việc nghiên cứu lổm điện áp khi có xét đến vai trò của BVRL trong HTĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Đình Long, Nguyễn Sỹ Chương, Lê Văn Doanh, Bạch Quốc Khánh, Đinh Thành Việt,... *Sách tra cứu về chất lượng điện năng*, NXB Bách khoa – Hà Nội, 2013.
- [2] M. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press on Power Engineering, 2000, pp. 139-251.
- [3] IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. IEEE Std 1346. *IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment*, 1998.
- [4] R. Dugan, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd, McGraw-Hill, 2004, pp.43–110.
- [5] X. Yang, Q. Gui, Y. Tian, and A. Pan, Research on Calculation Model of Voltage Sags Due to High Voltage and Great Power Motor Starting, *Electricity Distribution (CICED)*, pp. 1-9, September 2010.
- [6] IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, IEEE Std 1159. *IEEE Recommended Practice for monitoring electric power quality*, 1995.
- [7] CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4.110, *Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations*, 2010.
- [8] J. Caicedo, F. Navarro, E. Rivas, and F. Santamaria, The state of the art and new developments in voltage sag immunity, *Ingeniería investigación*, vol. 31, pp. 81-87, November 2011.
- [9] IEEE Industry Applications Society, IEEE Std 493. *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. 1997.
- [10] J. Blackburn and T. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 3rd, CRC Press, 2006.