

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÓNG ĐIỆN CỤC BỘ TRONG VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN Ở CÁC TẦN SỐ LÀM VIỆC KHÁC NHAU

MODELLING OF PARTIAL DISCHARGES IN A CAVITY WITHIN AN INSULATION MATERIAL UNDER VARIOUS APPLIED FREQUENCIES

Nguyễn Hồng Việt Phương*, Nguyễn Bình Nam

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; nhvphuong@dut.udn.vn, nbnam@dut.udn.vn

Tóm tắt - Phóng điện cục bộ là nguyên nhân cũng như là dấu hiệu nhận biết sự lão hóa của vật liệu cách điện trong thiết bị điện cao áp. Do đó, theo dõi hiện tượng phóng điện cục bộ là rất quan trọng để chẩn đoán chất lượng cách điện. Bài báo này trình bày tính chất hiện tượng phóng điện cục bộ bên trong lỗ trống nằm trong vật liệu cách điện ở các tần số làm việc khác nhau là 0,1 Hz và 50 Hz. Mô hình hóa hiện tượng phóng điện cũng được đề xuất để nghiên cứu các hiện tượng vật lý khi xuất hiện phóng điện. Kết quả thí nghiệm và mô phỏng đều cho thấy, điện tích phóng điện và tần suất xuất hiện đều nhỏ ở tần số làm việc thấp. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy, hiện tượng tự tiêu tán điện tích trên bề mặt lỗ trống có ảnh hưởng rất lớn đến phóng điện cục bộ ở tần số thấp.

Từ khóa - Phóng điện cục bộ; tần số thấp; mô phỏng; thời gian trễ ngẫu nhiên; lỗ trống hình trụ

1. Đặt vấn đề

Chất lượng cách điện đóng vai trò thiết yếu cho việc vận hành ổn định của các thiết bị điện. Các phương pháp kiểm tra chẩn đoán thiết bị, cụ thể là chẩn đoán phóng điện cục bộ (Partial Discharge – PD) được sử dụng phổ biến để phát hiện sớm tình trạng hỏng hóc của cách điện [1-2]. Phương pháp chẩn đoán phóng điện cục bộ này thường được tiến hành ở tần số điện công nghiệp (50/60 Hz) để mô phỏng tình trạng làm việc bình thường. Tuy nhiên, việc tiến hành thí nghiệm như thế này tại hiện trường là rất khó khăn do yêu cầu về nguồn công suất phản kháng rất lớn để thí nghiệm các thiết bị có điện dung lớn như cáp động lực. Để khắc phục hạn chế này, một phương án khác là thí nghiệm tại tần số rất thấp (Very Low Frequency – VLF), thông thường là 0,1 Hz do công suất phản kháng yêu cầu tỉ lệ nghịch với tần số thí nghiệm. Khó khăn đặt ra là tính chất phóng điện cục bộ thay đổi theo tần số vận hành, do đó các tính chất của phóng điện cục bộ tại tần số công nghiệp khó có thể ứng dụng để giải thích các kết quả phóng điện cục bộ ở tần số thấp để đi đến chẩn đoán chất lượng cách điện.

Các tia phóng điện cục bộ thường xuất hiện ở các hư hỏng bên trong cách điện [3]. Rất nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tiến hành phân tích tính chất của phóng điện cục bộ trong lỗ trống bên trong cách điện [4-9]. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng, tính chất phóng điện cục bộ đo được tại VLF không tương tự khi thí nghiệm tại tần số điện lưới [4], [7], [9].

Để nghiên cứu tính chất vật lý của hiện tượng phóng điện cục bộ bên trong cách điện, có nhiều mô hình đã được đề xuất để mô phỏng hiện tượng này [8-11]. Các mô hình này sau đó đã được kiểm chứng bằng kết quả thí nghiệm tương tự ở các tần số khác nhau từ 0,01 Hz đến 100 Hz. Tuy nhiên, các kết quả thí nghiệm được tiến hành trên nhiều vật liệu khác nhau như Epoxy Resin hay XLPE, với hình dạng hư hỏng trong vật liệu cách điện là hình cầu đến

Abstract - Partial discharge is both a cause and symptom of electrical insulation degradation in high voltage power equipment. Its measurement is an important diagnostic tool for insulation assessment. This investigation compares partial discharge characteristics in a cavity under different applied voltage stresses at very low frequency of 0.1 Hz and at power frequency. A model is proposed to describe physical phenomena of discharges in the cavity at both applied frequencies. Measurement and numerical simulation results show that, discharge magnitude and repetition rate are generally smaller at lower applied frequency. From simulation, it can be concluded that surface charge decay plays a significant contribution to discharge behaviors at very low frequency.

Key words - Partial discharge; very low frequency; simulation; statistical time lag; cylindrical cavity

hình trụ tròn. Nhìn chung, các mô hình này đã bỏ qua một số hiện tượng vật lý để làm đơn giản hóa quá trình mô phỏng nên kết quả mô phỏng chỉ áp dụng được cho một loại vật liệu nhất định và với một hình dạng nhất định.

Bài báo này đề xuất một mô hình phóng điện cục bộ PD dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM) để mô phỏng hiện tượng phóng điện cục bộ trong một lỗ trống hình trụ nằm trong vật liệu cách điện ở tần số 0,1 Hz và 50 Hz. Mô hình hóa này bao gồm hằng số thời gian tự tiêu tán điện tích (charge decay constant) và hệ số di chuyển điện tích trên bề mặt lỗ trống. Kết quả mô phỏng có được sẽ đem so sánh với kết quả đo thí nghiệm để giải thích các hiện tượng vật lý của hiện tượng phóng điện cục bộ tại các tần số khác nhau.

2. Hiện tượng phóng điện trong lỗ trống bên trong cách điện

Các lỗ trống hư hỏng thường xuất hiện trong vật liệu cách điện cao áp do quá trình sản xuất, lắp đặt hoặc sản sinh trong quá trình vận hành thiết bị. Hiện tượng phóng điện cục bộ sẽ xuất hiện bên trong lỗ trống khi thỏa mãn hai điều kiện: Có electron tự do kích thích tạo ra chùm thác electron và điện trường bên trong lỗ trống vượt quá giá trị đánh thủng.

2.1. Tỷ lệ tạo electron ban đầu

Các electron tự do xuất hiện trong lỗ trống từ 2 cơ chế: Bức xạ bề mặt và ion hóa không gian [4], [10]. Đối với bức xạ bề mặt, các electron tự do được sinh ra từ bề mặt lỗ trống dưới tác dụng của điện trường cục bộ tại đây. Dưới tác động liên tục của các tia phóng điện cục bộ, electron tự do có được từ bức xạ bề mặt là nguồn cung cấp electron tự do chính [10], [12-13]. Đối với cơ chế ion hóa không gian, các electron tự do được sinh ra do tương tác giữa photon năng lượng cao và phân tử khí [14]. Ion hóa không gian là cơ

chế chính tạo ra electron tự do đối với các lỗ trống chưa từng xuất hiện phóng điện cục bộ [10].

2.2. Hằng số trễ ngẫu nhiên của electron tự do

Trong trường hợp điện trường cục bộ trong lỗ trống lớn hơn giá trị đánh thủng, E_{inc} , hiện tượng phóng điện có thể không xảy ra nếu không có electron tự do để kích hoạt thác electron. Đối với trường hợp này, electron tự do sẽ xuất hiện sau một khoảng thời gian so với thời điểm điện trường cục bộ lớn hơn giá trị đánh thủng. Thời gian trung bình của hiện tượng này được gọi là hằng số trễ ngẫu nhiên của electron tự do, τ_{stat} [7], [10]. Do ảnh hưởng của τ_{stat} , hiện tượng phóng điện thường xảy ra ở giá trị điện trường lớn hơn giá trị đánh thủng.

2.3. Hiện tượng điện tích tự tiêu tán

Sau mỗi lần phóng điện, các điện tích tự do được sản sinh ra trong quá trình này sẽ tích tụ trên bề mặt lỗ trống do ảnh hưởng của điện trường cục bộ trong lỗ trống. Sự phân bố điện tích này sẽ phụ thuộc vào hình dạng lỗ trống [4], [10]. Các điện tích tích tụ trên bề mặt này có thể tạo ra một điện trường kí sinh đáng kể làm thay đổi điện trường trong lỗ trống.

Do tác động của sự thay đổi hướng điện trường ngoài xoay chiều bên trong lỗ trống, các điện tích tích tụ này có thể di chuyển dọc theo bề mặt của lỗ trống. Điều này dẫn đến việc tăng điện dẫn suất bề mặt, qua đó sẽ làm tăng quá trình trung hòa các điện tích tích tụ này theo thời gian thông qua các cơ chế tự trung hòa và khuếch tán sâu vào trong vật liệu cách điện. Do đó, điện trường kí sinh do các điện tích tích tụ này sẽ giảm dần theo thời gian do hiện tượng tự tiêu tán điện tích này. Tốc độ tự tiêu tán này phụ thuộc vào điện dẫn suất của bề mặt lỗ trống.

2.4. Điện trường đánh thủng

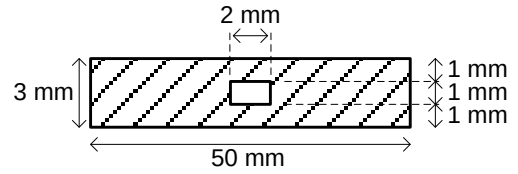
Giá trị đánh thủng của điện trường là giá trị nhỏ nhất của điện trường trong lỗ trống cần đạt được để hiện tượng phóng điện xảy ra. Giá trị này thay đổi phụ thuộc nhiều yếu tố như hình dạng lỗ trống, áp suất khí bên trong lỗ trống, hằng số cách điện của vật liệu, cơ chế ion hóa và khoảng cách giữa 2 điện cực [10], [15-16]. Giá trị này có thể được tính theo công thức sau:

$$E_{inc} = \left(\frac{E}{p} \right)_{cr} p \left[1 + \frac{B}{(pd)^n} \right] \quad (1)$$

Trong đó, $(E/p)_{cr}$, B và n là các thông số liên quan đến cơ chế ion hóa không khí, p là áp suất khí bên trong lỗ trống và d là đường kính lỗ trống. Đối với không khí, các giá trị này là $(E/p)_{cr} = 24,2 \text{ VPa}^{-1}\text{m}^{-1}$, $n = 0,5$ và $B = 8,6 \text{ Pa}^{1/2}$ [3], [10].

3. Mô hình thí nghiệm

Mẫu thử để thí nghiệm hiện tượng phóng điện cục bộ được thiết kế có một lỗ trống hình trụ ở trung tâm của mẫu thử như Hình 1 [5], [17]. Mẫu thử được chế tạo từ 1 máy in 3D có độ chính xác rất cao để đảm bảo kích thước chuẩn xác như thiết kế và vật liệu cách điện là acrylonitrile butadiene styrene (ABS). Mẫu thử được đặt giữa 2 điện cực bằng đồng và toàn bộ điện cực được đặt chìm hoàn toàn trong dầu máy biến áp để loại trừ các phóng điện bề mặt có thể xuất hiện trong quá trình thí nghiệm.

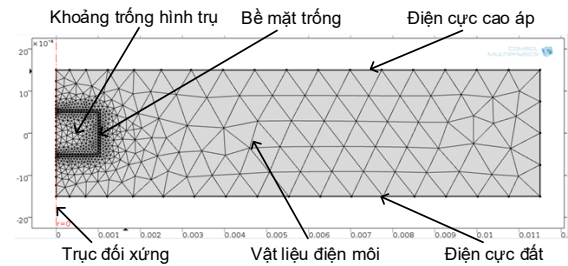


Hình 1. Kích thước mẫu thử

Hiện tượng phóng điện cục bộ xuất hiện bên trong lỗ trống của mẫu thử ở các tần số khác nhau được đo bằng phương pháp đã trình bày trong [18]. Điện áp trong quá trình thử là 8 – 10 kVrms với tần số là 0,1 Hz và 50 Hz.

4. Mô hình phóng điện cục bộ

Mô hình phóng điện cục bộ được xây dựng trên phần mềm COMSOL Multiphysics có kết nối với MATLAB. Các thông số điện trường, điện áp của mô hình được xử lý bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM. Mô hình được tạo chính xác theo kích thước thật như Hình 2, trong đó bề mặt lỗ trống có chiều dày 0,1 mm để mô phỏng quá trình dịch chuyển điện tích trên bề mặt lỗ trống.



Hình 2. Mô hình mô phỏng hiện tượng phóng điện

4.1. Tỷ lệ sản sinh electron

Hiện tượng phóng điện sẽ xảy ra khi có electron tự do ban đầu để kích hoạt thác electron khi giá trị điện trường vượt giá trị đánh thủng. Số lượng electron sẽ ảnh hưởng đến tính chất của hiện tượng phóng điện như tổng điện tích phóng điện, vị trí pha và tần suất phóng điện.

Electron tự do được sản sinh từ 2 nguồn chính: Phát xạ bề mặt và ion hóa không gian. Từ đó, số lượng electron, $N_{PD}(t)$ được tính toán như sau:

$$N_{PD}(t) = N_{es}(t) + N_{ev} \quad (2)$$

Trong đó, $N_{es}(t)$ là số lượng electron do phát xạ bề mặt và N_{ev} là số lượng electron tự do từ ion hóa không gian.

Số lượng electron tự do từ hiện tượng phát xạ được tính theo công thức sau:

$$N_{es}(t) = N \frac{|E_{cav}(t)|}{|E_{inc}|} \quad (3)$$

Trong đó, N là số lượng electron sinh ra tại điện trường đánh thủng E_{inc} và $E_{cav}(t)$ là điện trường cục bộ trong lỗ trống tại thời điểm t [8].

Sau khi xuất hiện hiện tượng phóng điện, electron tự do sẽ tự tiêu tán theo các cơ chế đã trình bày ở trên. Tốc độ tiêu tán được đặc trưng bởi hằng số thời gian tự tiêu tán, τ_{decay} . Tốc độ tự tiêu tán của điện tích sẽ là hàm mũ nghịch theo thời gian [9], [12], [20]. Ngoài ra, tỉ lệ sản sinh electron tỉ lệ thuận với điện trường cục bộ bên trong lỗ trống [12], [21-22]. Từ đó, công thức (3) được viết lại như sau:

$$N_{es}(t) = N \left| \frac{E_{cav}(t)}{E_{inc}} \right| \exp \left(-\frac{t-t_{PD}}{\tau_{decay}} \right) \exp \left| \frac{E_{cav}(t)}{E_{inc}} \right| \quad (4)$$

Trong đó, t_{PD} là thời điểm hiện tượng phóng điện xuất hiện lần trước và $(t-t_{PD})$ là thời gian tính từ thời điểm phóng điện lần trước. Trong công thức này, 3 hằng số N , τ_{decay} và N_{ev} được điều chỉnh để hiệu chỉnh kết quả mô phỏng tương ứng với kết quả thí nghiệm.

Do tính chất ngẫu nhiên của hiện tượng phóng điện cục bộ, xác suất xảy ra phóng điện cục bộ, $P(t)$, khi điện trường bên trong lỗ trống $E_{cav}(t)$ lớn hơn giá trị đánh thủng E_{inc} được tính như sau:

$$P(t) = N_{PD}(t) \Delta t \quad (5)$$

Trong đó, Δt là bước thời gian tính toán. $P(t)$ sau đó được so sánh với một giá trị ngẫu nhiên R từ 0 đến 1. Phóng điện xảy ra khi $P(t)$ lớn hơn R . Phóng điện luôn xảy ra khi $P(t)$ lớn hơn 1.

4.2. Mô phỏng quá trình phóng điện

Để mô phỏng hiện tượng phóng điện xuất hiện trong lỗ trống có thể được mô tả bằng cách thay đổi trạng thái vật lý từ cách điện sang dẫn điện bên trong lỗ trống của vật liệu. Điều này được thực hiện bằng cách thay đổi giá trị điện dẫn suất bên trong lỗ trống từ giá trị ban đầu (trạng thái cách điện) khi chưa xuất hiện phóng điện lên giá trị lớn hơn (trạng thái dẫn điện) khi xuất hiện hiện tượng phóng điện. Khi hiện tượng phóng điện kết thúc thì giá trị điện dẫn suất lại trở về ban đầu.

Tổng điện tích xuất hiện trong mỗi lần phóng điện được tính như sau:

$$q_{PD} = \int_t^{t+\Delta t} I(t) dt \quad (6)$$

Trong đó, $I(t)$ là dòng điện xuất hiện khi phóng điện trong thời điểm t .

4.3. Mô phỏng quá trình điện tích tự tiêu tán

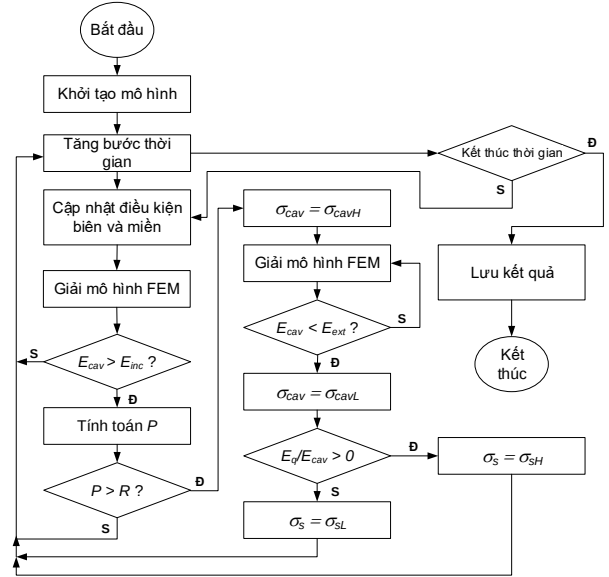
Như đã trình bày ở trên, điện tích tích tụ trên bề mặt lỗ trống sẽ tạo ra một điện trường kí sinh E_q . Sự tương quan giữa chiều của điện trường E_q và điện trường cục bộ bên trong lỗ trống E_{cav} sẽ tác động đến việc di chuyển của các điện tích tích tụ trên bề mặt lỗ trống. Mô phỏng điều này bằng cách thay đổi giá trị điện dẫn suất của bề mặt lỗ trống σ_s , từ giá trị ban đầu σ_{sL} lên giá trị lớn hơn σ_{sH} khi E_q và E_{cav} cùng chiều. Ngược lại, điện dẫn suất bề mặt lỗ trống sẽ quay trở về giá trị ban đầu σ_{sL} , khi E_q và E_{cav} ngược chiều nhau.

Từ các phân tích như trên, thuật toán của chương trình mô phỏng được trình bày trên Hình 3. Bảng 1 thể hiện các thông số của mô hình mô phỏng và Bảng 2 thể hiện các giá trị điều chỉnh trong phương trình (4) để kết quả mô phỏng tương ứng với kết quả thí nghiệm.

Bảng 1. Giá trị các thông số mô phỏng

Tần số (Hz)	Điện áp (kV)	N	τ_{decay} (ms)	N_{ev}
0,1	8	30	1000	2
	9	15	800	3
	10	30	800	3
50	8	2500	2	40

	9	2500	2	50
	10	3500	2	50



Hình 3. Thuật toán mô hình mô phỏng phóng điện

Bảng 2. Thông số mô hình mô phỏng hiện tượng phóng điện trong lỗ trống bên trong vật liệu ABS

Nội dung	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Số chu kỳ mô phỏng	n	500	
Bước thời gian khi không có PD	Δt	$1/500f$	s
Bước thời gian khi có PD	dt	1×10^{-9}	s
Hằng số điện môi vật liệu	ϵ_r	3,1	
Hằng số điện môi bề mặt lỗ trống	ϵ_r	3,1	
Hằng số điện môi lỗ trống	ϵ_{cav}	1	
Điện dẫn suất lỗ trống khi không có PD	σ_{cavL}	0	S/m
Điện dẫn suất lỗ trống khi có PD	σ_{cavH}	5×10^{-3}	S/m
Giá trị điện trường đánh thủng	E_{inc}	$3,93 \times 10^6$	V/m
Giá trị điện trường kết thúc PD	E_{ext}	1×10^6	V/m
Điện dẫn suất bề mặt lỗ trống	σ_{sL}	0	S/m

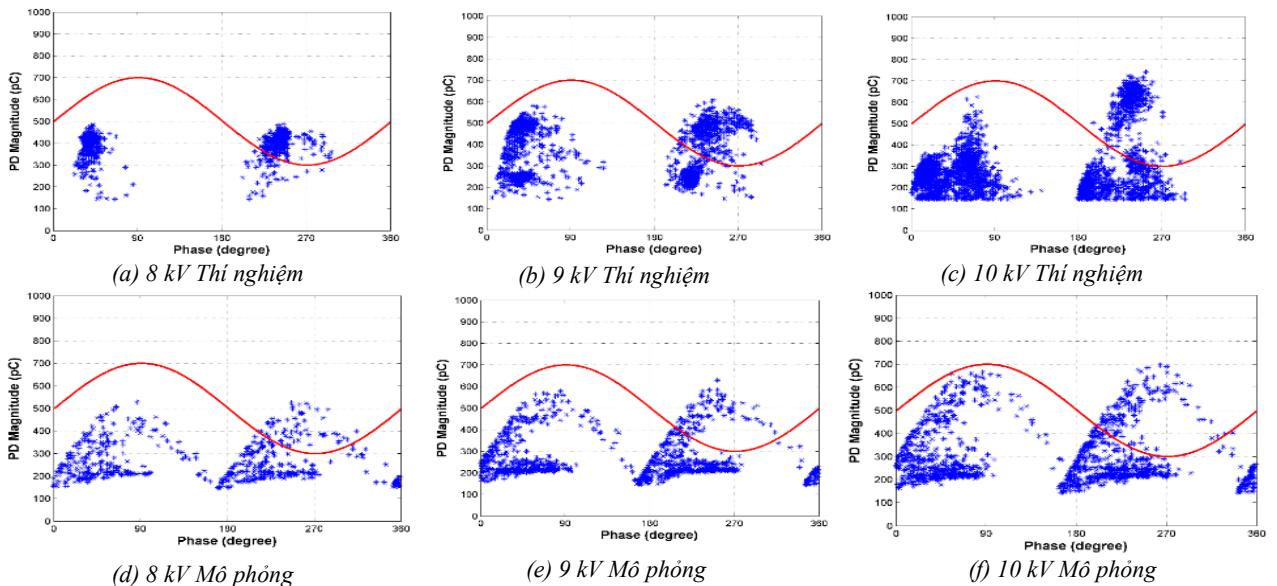
5. Kết quả mô phỏng và thí nghiệm

5.1. Phóng điện cục bộ PD ở tần số 50 Hz

Hình 4 thể hiện biểu đồ pha phân bố phóng điện cục bộ PD có được từ thí nghiệm thực tế và mô hình mô phỏng trong 500 chu kỳ ở tần số 50 Hz. Bảng 3 và Bảng 4 thể hiện các tính chất của hiện tượng PD ở các giá trị điện áp khác nhau, từ đó có thể thấy, kết quả mô phỏng tương ứng với kết quả thí nghiệm. Các giá trị tổng điện tích lớn nhất, tổng điện tích trung bình, tổng điện tích nhỏ nhất trong mỗi lần phóng điện và tần suất phóng điện có giá trị rất giống nhau.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm ở tần số 50 Hz

Điện áp (kV)	8	9	10
Điện tích phóng điện lớn nhất (pC)	488	610	742
Điện tích phóng điện trung bình (pC)	263	306	303
Điện tích phóng điện nhỏ nhất (pC)	144	144	144
Tần suất (lần/chu kỳ)	1,15	2,28	2,46



Hình 4. Biểu đồ pha phân bố điện tích phóng điện ở tần số 50 Hz

Bảng 4. Kết quả mô phỏng ở tần số 50 Hz

Điện áp (kV)	8	9	10
Điện tích phóng điện lớn nhất (pC)	528	629	696
Điện tích phóng điện trung bình (pC)	267	276	304
Điện tích phóng điện nhỏ nhất (pC)	144	145	144
Tần suất (lần/chu kỳ)	1,13	2,20	2,40

Biểu đồ pha của kết quả mô phỏng cho thấy, mô hình mô phỏng này đã tạo ra được phân bố tổng điện tích phóng điện tương tự như kết quả thí nghiệm. Có thể nhìn thấy, “hình tai thỏ” từ kết quả mô phỏng phân bố này, vốn là đặc trưng thể hiện cho phóng điện cục bộ bên trong vật liệu cách điện.

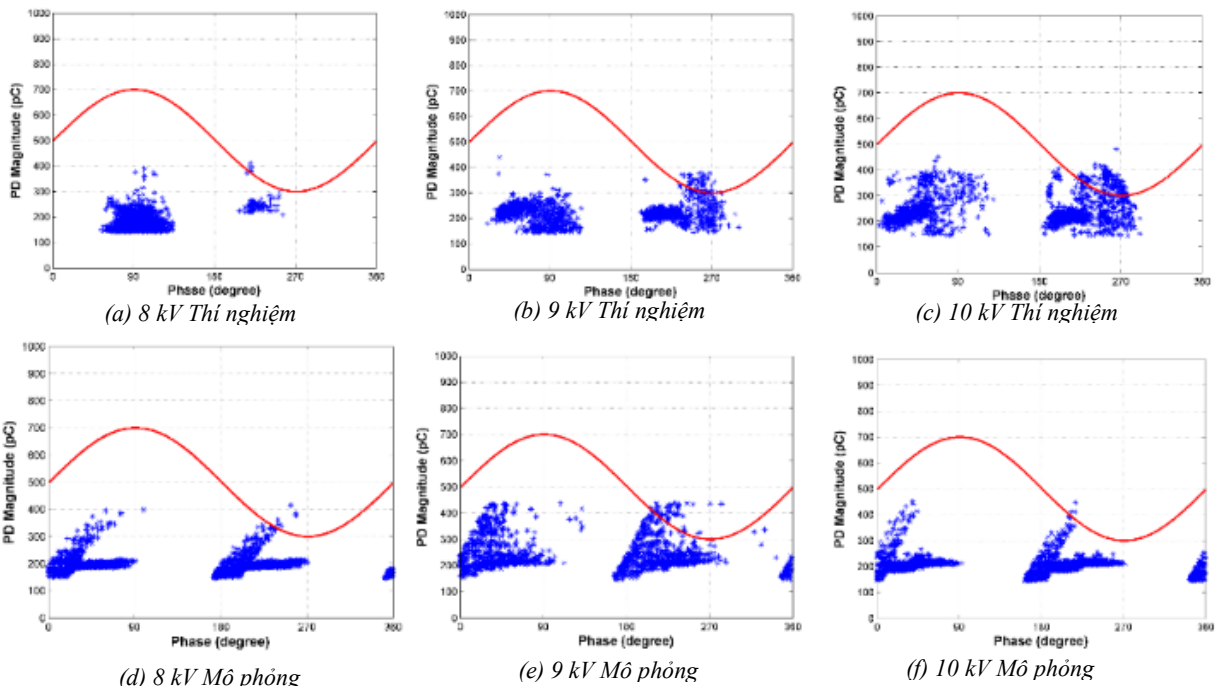
5.2. Phóng điện cục bộ PD ở tần số 0,1 Hz

Để so sánh, mô hình PD này đã được sử dụng để chạy

mô phỏng hiện tượng phóng điện cục bộ ở tần số 0,1 Hz. Biểu đồ pha phân bố phóng điện cục bộ có được từ kết quả mô phỏng và thí nghiệm được thể hiện ở Hình 5. Các tính chất của phóng điện PD thu được thể hiện trên Bảng 5 và Bảng 6. Các kết quả mô phỏng và thí nghiệm cho thấy, chúng có sự tương đồng cao dù cho hình dáng phân bố tổng điện tích của kết quả mô phỏng có ít sai lệch so với kết quả thí nghiệm.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm ở tần số 0,1 Hz

Điện áp (kV)	8	9	10
Điện tích phóng điện lớn nhất (pC)	411	439	480
Điện tích phóng điện trung bình (pC)	183	222	245
Điện tích phóng điện nhỏ nhất (pC)	146	144	144
Tần suất (lần/chu kỳ)	1,10	2,20	2,40



Hình 5. Biểu đồ pha phân bố điện tích phóng điện ở tần số 0,1 Hz

Bảng 6. Kết quả mô phỏng ở tần số 0,1 Hz

Điện áp (kV)	8	9	10
Điện tích phóng điện lớn nhất (pC)	415	440	481
Điện tích phóng điện trung bình (pC)	197	201	207
Điện tích phóng điện nhỏ nhất (pC)	146	144	144
Tần suất (lần/chu kỳ)	2,70	3,30	3,80

5.3. So sánh tính chất phóng điện cục bộ PD ở tần số 0,1 Hz và 50 Hz

Kết quả từ Bảng 3 đến Bảng 6 cho thấy, độ lớn điện tích phóng điện sẽ tăng theo điện áp vận hành ở cả tần số 0,1 Hz và 50 Hz. Tần suất xuất hiện phóng điện cũng tăng theo điện áp đặt ở cả 2 tần số. Điều này có thể giải thích được do sự phụ thuộc của tỉ lệ sản sinh electron vào cường độ điện trường. Với điện áp càng cao, điện trường bên trong lỗ trống sẽ càng lớn dẫn đến tỉ lệ sản sinh electron tự do tăng lên và vì thế số lượng electron tự do xuất hiện bên trong lỗ trống sẽ rất nhiều. Điều này làm cho xác suất hiện tượng phóng điện xuất hiện sẽ rất cao ngay khi điện trường bên trong lỗ trống đạt đến giá trị đánh thủng. Do đó, hiện tượng phóng điện sẽ xuất hiện nhiều hơn ở sườn tăng của chu kỳ điện áp. Điều này cũng được chứng thực bởi các giá trị mô phỏng thể hiện ở Bảng 2.

Với cùng điện áp vận hành, các giá trị tổng điện tích phóng điện và tần suất phóng điện ở tần số 0,1 Hz đều nhỏ hơn giá trị tương ứng ở tần số 50 Hz. Điều này có thể lý giải do ảnh hưởng của điện trường kí sinh E_q sinh ra bởi điện tích tích tụ trên bề mặt lỗ trống sau mỗi lần phóng điện. Điện trường E_q này phụ thuộc vào tốc độ tự tiêu tán điện tích trên bề mặt lỗ trống giữa 2 lần phóng điện liên tiếp ở các tần số làm việc khác nhau. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy rằng, hằng số thời gian điện tích tự tiêu tán, τ_{decay} , nhỏ hơn rất nhiều so với thời gian một chu kỳ điện áp ở tần số 0,1 Hz. Do đó, lượng điện tích tích tụ trên bề mặt lỗ trống tự tiêu tán là rất nhiều sau mỗi lần phóng điện. Ngược lại, ở tần số 50 Hz thì hằng số thời gian này tương đương với một chu kỳ điện áp nên lượng điện tích tự tiêu tán là không đáng kể. Ngoài ra, các giá trị N và N_{ev} ở tần số 0,1 Hz đều nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị ở 50 Hz, thể hiện electron tự do có được từ hiện tượng phát xạ bề mặt và ion hóa không gian phụ thuộc rất lớn vào tần số làm việc. Tất cả các ảnh hưởng này sẽ giảm tỉ lệ sản sinh electron ở giá trị tần số làm việc rất thấp (0,1 Hz), vốn là yếu tố quyết định đến hiện tượng phóng điện cục bộ.

6. Kết luận

Trong bài báo này, hiện tượng phóng điện cục bộ bên trong lỗ trống ở bên trong vật liệu cách điện được nghiên cứu ở tần số làm việc 0,1 Hz và 50 Hz với các giá trị điện áp đặt khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho thấy, tính chất phóng điện phụ thuộc rất lớn vào tần số làm việc. Tổng điện tích phóng điện và tần suất nhìn chung sẽ cao hơn ở tần số làm việc lớn hơn. Để nghiên cứu sự phụ thuộc của các yếu tố vật lý bên trong lỗ trống vào tần số làm việc, một mô hình hiện tượng phóng điện cũng được đề xuất trong bài báo này. Ưu điểm của mô hình này là có ít thông số ngẫu nhiên để mô phỏng

hiện tượng phóng điện. Kết quả mô phỏng cho thấy, hiện tượng tự tiêu tán điện tích có ảnh hưởng rất lớn đến tính chất phóng điện ở tần số rất thấp (0,1 Hz). Hiện tượng tự tiêu tán này làm giảm tỉ lệ sản sinh electron, và do đó giảm tổng điện tích phóng điện và tần suất phóng điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 5, pp. 755–776, 1993.
- [2] P. Cygan and J. R. Laghari, "Models for insulation aging under electrical and thermal multistress", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 923–934, 1990.
- [3] J. Kuffel, E. Kuffel, and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd Ed. Burlington, MA, USA: Newnes (Butterworth-Heinemann), 2000.
- [4] R. Bodega, P. H. F. Morshuis, M. Lazzaroni, and F. J. Wester, "PD recurrence in cavities at different energizing methods", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 2, pp. 251–258, Apr. 2004.
- [5] H. V. P. Nguyen, B. T. Phung, and T. Blackburn, "Effects of aging on partial discharge patterns in voids under very low frequency excitation", in *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2016, pp. 524–527.
- [6] H. Illias, M. Tunio, H. Mokhlis, G. Chen, and A. A. Bakar, "Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 463–471, Feb. 2015.
- [7] C. Forssen and H. Edin, "Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: measurements", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1601–1609, Dec. 2008.
- [8] C. Forssen and H. Edin, "Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: measurements and modeling", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1610–1616, 2008.
- [9] A. Cavallini and G. C. Montanari, "Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 1, pp. 111–121, Feb. 2006.
- [10] L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modeling", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 4, pp. 510–528, 1995.
- [11] H. Illias, G. Chen, and P. L. Lewin, "Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 1, pp. 38–45, 2011.
- [12] H. Illias, G. Chen, and P. L. Lewin, "Partial discharge behavior within a spherical cavity in a solid dielectric material as a function of frequency and amplitude of the applied voltage", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 432–443, 2011.
- [13] R. J. Van Brunt, "Stochastic properties of partial-discharge phenomena", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 5, pp. 902–948, 1991.
- [14] A. Cavallini, F. Ciani, G. Mazzanti, and G. C. Montanari, "First electron availability and partial discharge generation in insulation cavities: effect of light irradiation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 387–394, Apr. 2005.
- [15] A. Cavallini, R. Ciani, M. Conti, P. F. H. Morshuis, and G. C. Montanari, "Modeling memory phenomena for partial discharge processes in insulation cavities", in *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2003, pp. 723–727.
- [16] F. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and simulation of PD in epoxy voids", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 5, pp. 729–743, 1995.
- [17] H. V. P. Nguyen and B. T. Phung, "Cavity Discharge Behaviors under Trapezoid-based Voltage at Very Low Frequency", in *3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON 2017)*, 2017, pp. 160–165.