

ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CỦA HỆ THỐNG CÁCH ĐIỆN CHO CÁC ĐỘNG CƠ ĐIỆN CÓ ĐIỆN ÁP THẤP ĐƯỢC ĐIỀU KHIỂN BỞI BIẾN TẦN PWM

INVESTIGATION ON RELIABILITY OF ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS FOR LOW-VOLTAGE MOTORS FED BY PWM INVERTERS

Nguyễn Mạnh Quân^{1,*}, Hoàng Mai Quyền¹

TÓM TẮT

Chất lượng cách điện của các stator được sử dụng trong bộ phận điều áp và quạt gió của những máy bay thế hệ mới đã được phân tích và đánh giá. Các thử nghiệm được tiến hành thông qua phép đo ngưỡng điện áp phóng điện cục bộ. Ảnh hưởng của việc đai dây và áp suất không khí đối với độ tin cậy của hệ thống cách điện cũng được làm rõ.

Từ khóa: Động cơ điện có điện áp thấp, hệ thống cách điện, phóng điện cục bộ.

ABSTRACT

The quality of insulation has been detailed and investigated for three types of stators designed to turbomachines and fans of new generation aircraft. The technique used for experimental investigations consists of partial discharge inception voltage measures. A particular attention has been paid to the impacts of sizing and environmental constraints on the reliability of insulation systems.

Keywords: Low-voltage motors, electrical insulation systems, partial discharge.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: thayquan.hau@gmail.com

Ngày nhận bài: 08/01/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/03/2018

Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2018

Phản biện khoa học: TS. Trần Anh Tùng

IEC	Ủy ban kỹ thuật điện quốc tế (International Electrotechnical Commission standard)
MFTST	Máy phát điện tần số thấp
BTA	Bộ tăng điện áp
MBA	Máy biến áp
TXP	Tiếp xúc giữa các pha
TXR	Tiếp xúc giữa dây và rãnh

1. GIỚI THIỆU

Ở Châu Âu và Mỹ, các tiến bộ khoa học kỹ thuật trong lĩnh vực hàng không đang bùng nổ. Nhiều công nghệ chế tạo và sản xuất mới liên quan trực tiếp đến các MEA. Việc hạn chế tiêu thụ nhiên liệu trên các MEA (Airbus và Boeing) góp phần làm giảm trọng lượng máy bay, ô nhiễm môi trường và các nguyên nhân gây nên hiệu ứng nhà kính. Hơn nữa, việc thay thế các hệ thống năng lượng cũ (cơ khí, thủy lực, khí nén) bằng các hệ thống năng lượng điện mới cũng giúp cho quá trình điều khiển mọi hoạt động của máy bay trở nên linh hoạt và dễ dàng hơn [1].

Tuy nhiên, sự ra đời các máy bay thế hệ mới này gây nên một thách thức không nhỏ cho các nhà sản xuất động cơ điện. Trên thực tế, sự xuất hiện các hệ thống năng lượng điện mới (bao gồm 1 hệ thống điện xoay chiều với mức điện áp tăng gấp đôi (230V) và 1 hệ thống điện 1 chiều (540V)) đã làm gia tăng ứng suất làm việc (điện áp) lên các HTCĐ của động cơ. Ngoài ra, việc sử dụng biến tần PWM để điều khiển tốc độ động cơ cũng gây hại cho HTCĐ, bằng cách [2]:

- làm xuất hiện quá điện áp ở đầu vào động cơ, trong đó biên độ quá điện áp phụ thuộc vào: sự chênh lệch tổng trở giữa cáp kết nối và động cơ, độ dài của cáp, tốc độ biến thiên điện áp (kV/μs);
- tạo ra phân bố điện áp rất không đồng nhất lên các cuộn dây pha trong quá trình lan truyền của sóng điện áp.

Kết quả là HTCĐ sẽ bị già hóa sớm và/hoặc có sự xuất hiện của PD giữa các dây điện và giữa các dây với mát, từ

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
p	bar	Áp suất không khí

CHỮ VIẾT TẮT

MEA	Máy bay sử dụng nhiều điện hơn (More Electric Aircraft)
PWM	Điều chỉnh độ rộng xung (Pulse Wave Modulation)
HTCĐ	Hệ thống cách điện
PD	Phóng điện cục bộ (Partial Discharge)
PDIV	Ngưỡng điện áp phóng điện cục bộ (Partial Discharge Inception Voltage)

đó tuổi thọ của HTCD sẽ giảm sút nhanh chóng. PD là kết quả của sự phá hủy về điện được hình thành do có các khe hở không khí bên trong lớp cách điện. Nó là "kẻ thù" thầm lặng của mọi chất cách điện. Nó tuy không dẫn đến hư hỏng cách điện ngay lập tức nhưng có ảnh hưởng xấu đến môi trường cách điện như sau [3]:

- có sự bắn phá do các ion trong vật liệu cách điện gây ra phát nhiệt cục bộ có thể dẫn đến sự thay đổi và suy giảm đặc tính hóa học của vật liệu cách điện;
- sự thay đổi các đặc tính hoá học ảnh hưởng đến các thành phần hoá học, làm tăng tốc độ già hoá của vật liệu.

Do đó, việc đánh giá chất lượng cách điện của các động cơ điện được thiết kế mới và định lượng những nguy hiểm gặp phải các động cơ này đối với HTCD, thông qua phép đo PDIV, là vô cùng cần thiết.

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến chất lượng cách điện của các động cơ được sử dụng trong các bộ phận điều áp và quạt gió của những máy bay thế hệ mới, trong đó có tính đến các yêu cầu thiết kế mới (đai dây) và điều kiện môi trường hoạt động của động cơ (áp suất).

2. PHƯƠNG THỨC THỰC NGHIỆM

2.1. Stator

Các nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành đối với hai loại stator của các động cơ điều áp (cabin) và quạt gió (cabin và cánh máy bay):

- Loại A: 5 stator 15kW, 4 cuộn dây trên một pha, dây tráng men có đường kính 0,5mm.
- Loại B: 1 stator 4kW, 6 cuộn dây trên một pha, dây tráng men có đường kính 0,5mm.

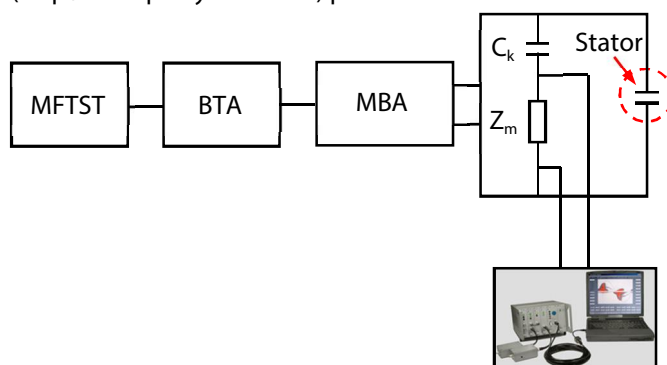
Tất cả các pha của stator đều được đấu hình sao. HTCD của các stator bao gồm: cách điện giữa các dây của các pha khác nhau (cách điện pha) và cách điện giữa các dây với vỏ động cơ (cách điện rãnh).

2.2. Đo PDIV

Các nghiên cứu thực nghiệm mà tác giả đề cập trong bài báo đều liên quan trực tiếp đến phép đo PDIV. Theo định nghĩa, PDIV là giá trị điện áp nhỏ nhất cần thiết để tạo nên ít nhất một PD. Giá trị này tuy không đủ để đánh giá tuổi thọ của HTCD, nhưng sẽ cung cấp thông tin liên quan đến chất lượng cách điện. Thực tế là PDIV càng lớn thì chất lượng cách điện càng cao. Ngoài ra, PDIV cũng cho chúng ta biết các vật liệu cách điện pha và rãnh có được đặt đúng vị trí hay không, trong quá trình chế tạo stator. Nếu giá trị PDIV đo được của cách điện pha gần với giá trị PDIV tìm được khi xảy ra lỗi cách điện pha (tiếp xúc giữa các dây ở các pha khác nhau) thì có nghĩa là các cuộn dây pha phải được tháo ra và xem xét lại trước khi tiến hành đai dây và sơn cách điện. Đối với cách điện rãnh thì lỗi cách điện (tiếp xúc giữa các dây với vỏ động cơ) hiếm khi xảy ra hơn.

Việc đánh giá PDIV được thực hiện thông qua phép đo điện không phá hủy dưới điện áp công nghiệp (xoay chiều, sinus 50Hz), theo chuẩn IEC 270 [4]. Nguyên lý của phép đo dựa trên phép đo điện tích biểu kiến [4].

Sơ đồ đo và các thiết bị được sử dụng trong phép đo được miêu tả trong hình 1. Với mục đích loại bỏ tất cả nhiễu điện từ gây ra bởi lưới điện công nghiệp, điện áp đầu vào stator được lấy từ MBA (220V/20kV) có kết nối với BTA và MFTST. Mạch đo và stator luôn được bảo vệ trong lồng Faraday suốt quá trình đo để đảm bảo kết quả đo không bị ảnh hưởng bởi nhiễu sóng điện từ bên ngoài. Tụ liên lạc (C_k) kết hợp với tổng trở đo (Z_m) có giá trị tổng trở nhỏ ở tần số cao cho phép trích xuất tín hiệu điện áp liên quan đến các hoạt động của PD. Các tín hiệu này được thu thập thông qua máy hiện sóng với sự giúp đỡ của phần mềm ICM-system do công ty Power Diagnostix Systems BmbH (<http://www.pd-system.com>) phát triển.



Hình 1. Sơ đồ đo và thiết bị đo PDIV

Điện áp đầu vào được tăng từ từ cho đến khi DP quan sát được duy trì. Để đánh giá được PDIV của cách điện giữa các pha và của cách điện rãnh cũng như PDIV xuất hiện khi các lỗi cách điện xảy ra, 4 kiểu mạch đo đã được thiết kế trong khi xét đến các vị trí có thể xảy ra PD trong stator:

- cấp điện cho 1 pha và vỏ động cơ (các pha khác cách điện đối với đất): đánh giá PDIV cho cách điện rãnh;
- cấp điện cho 2 pha (pha thứ 3 và vỏ stator cách điện đối với đất): đánh giá PDIV cho cách điện pha;
- cấp điện cho một mẫu các dây (cùng điện thế) và mát (diện tích tiếp xúc 0,5cm²): mô phỏng lỗi cách điện rãnh;
- cấp điện cho 2 mẫu các dây tiếp xúc với nhau (diện tích tiếp xúc 0,5cm²): mô phỏng lỗi cách điện pha.

8 phép đo được thực hiện cho mỗi giá trị PIDV. Giá trị này đạt được dựa vào thống kê Weibull 2 tham số, theo chuẩn IEEE-std930 [5]. Khoảng tin cậy 90% của giá trị được tính toán với phần mềm được phát triển bởi J.F.Lawless [6].

Xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ (T) và độ ẩm tương đối (HR) đối với PIDV trong không khí, các phép đo đều được thực hiện trong điều kiện môi trường gần như là giống nhau ($T \sim 25^{\circ}\text{C}$, $HR \sim 50\%$).

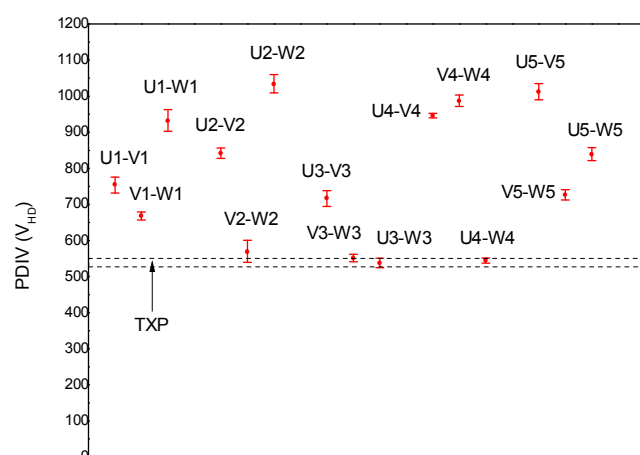
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Đánh giá chất lượng cách điện

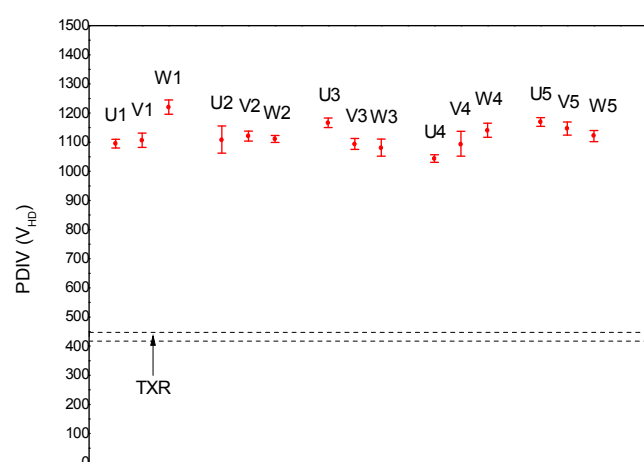
Việc đánh giá chất lượng cách điện đã được tiến hành với:

- 5 stator loại A không đai dây và không được sơn cách điện.
- 1 stator loại B có đai dây và có sơn cách điện.

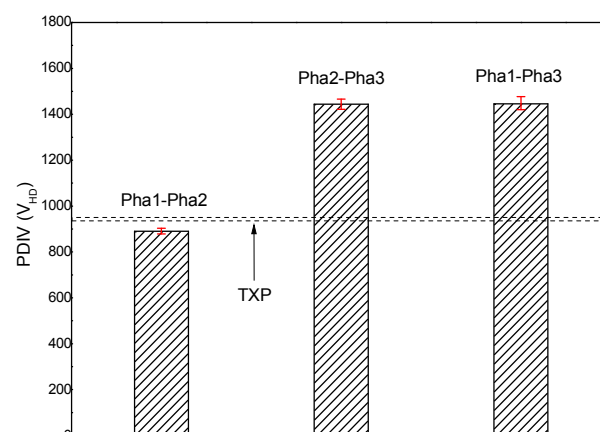
Các giá trị PIDV, biểu thị bằng Volt hiệu dụng (V_{HD}), được biểu diễn trong các hình từ 2 đến 5. Các ký hiệu U1, V1, W1 biểu thị pha U, V, W của stator số 1 loại A và tương tự như vậy đối với các pha của các stator khác cùng loại.



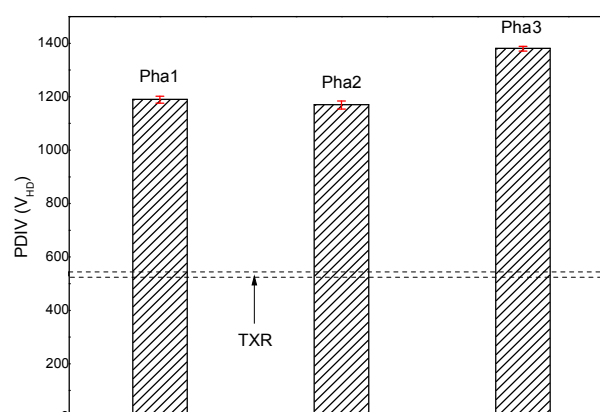
Hình 2. PIDV của cách điện pha (5 stator loại A không đai dây và không được sơn cách điện)



Hình 3. PIDV của cách điện rãnh (5 stator loại A không đai dây và không được sơn cách điện)



Hình 4. PIDV của cách điện pha (1 stator loại B có đai dây và có được sơn cách điện)



Hình 5. PIDV của cách điện rãnh (stator loại B có đai dây và có được sơn cách điện)

Nhìn chung, các giá trị PIDV đạt được đối với cách điện rãnh của cả hai loại stator đều lớn hơn giá trị PIDV tìm thấy khi xảy ra lỗi cách điện rãnh.

Tiếp xúc giữa đầu ra của pha - phần trung gian



Hình 6. Tiếp xúc giữa đầu ra của pha - phần trung gian (stator loại A không đai dây và không có sơn cách điện)

Ngược lại, các kết quả đạt được cho thấy cách điện giữa các pha của một vài stator loại A (stator 2, 3, 4) và stator B

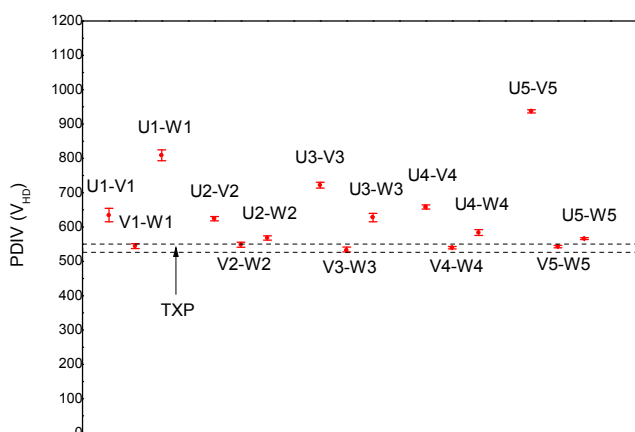
biểu hiện lỗi cách điện: giá trị PDIV của cách điện pha bằng hoặc thấp hơn PDIV khi xảy ra lỗi cách điện (hình 2 và 4). Lỗi cách điện này nhiều khả năng trú ngụ ở phần trung gian hơn là phần tác dụng. Hình 6 chỉ rõ sự tiếp xúc nhìn thấy được giữa các pha ở đầu ra một pha của một stator loại A. Hình 7 cho thấy rằng tiếp xúc giữa các pha của một vài stator cùng loại không xảy ra ở đầu ra của pha mà chắc chắn là nó diễn ra ở bên trong phần trung gian.



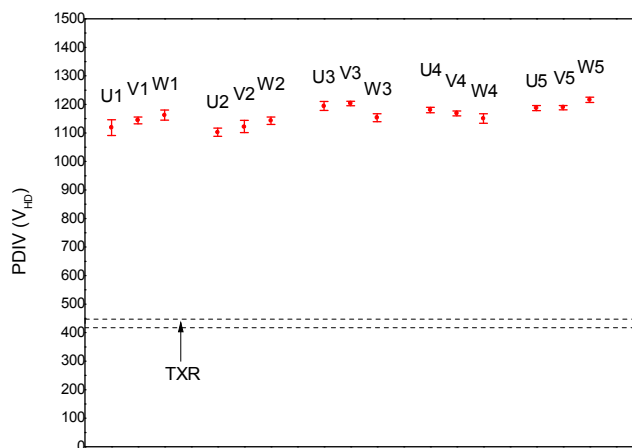
Hình 7. Đầu vào và đầu ra của một pha có tiếp xúc với pha khác: không có tiếp xúc nhìn thấy được với phần trung gian (stator loại A không đai dây và không có sơn cách điện)

3.2. Đánh giá tác động của việc đai dây

Để đánh giá được ảnh hưởng của việc đai dây đối với chất lượng cách điện, các phép đo PDIV đã được thực hiện đối với 5 stator loại A ngay sau khi đai dây (hình 8 và 9).



Hình 8. PDIV của cách điện pha (5 stator loại A có đai dây và không được sơn cách điện)



Hình 9. PDIV của cách điện rãnh (5 stator loại A có đai dây và không được sơn cách điện)

Kết quả đạt được (hình 3 và 9) cho thấy cách điện rãnh không bị ảnh hưởng bởi việc đai dây. Các giá trị PDIV tìm thấy sau đai dây vẫn lớn hơn rất nhiều so với giá trị PDIV nếu xảy ra lỗi cách điện rãnh.

Ngược lại, việc đai dây phần trung gian có tác động xấu đến cách điện giữa các pha. Trước khi đai dây, các stator 2, 3, 4 đã có lỗi cách điện (hình 2). Các giá trị PDIV thể hiện trên hình 8 chỉ ra rằng việc đai dây đã gây ra thêm những lỗi cách điện khác bởi cả 5 stator đều tồn tại lỗi cách điện pha sau khi đai dây. Bởi tác động cơ khí, việc đai dây sẽ làm tiếp xúc các dây trước đây được chia cách bởi vật liệu cách điện pha, bằng cách thay đổi vị trí của chúng.

3.3. Đánh giá tác động áp suất không khí

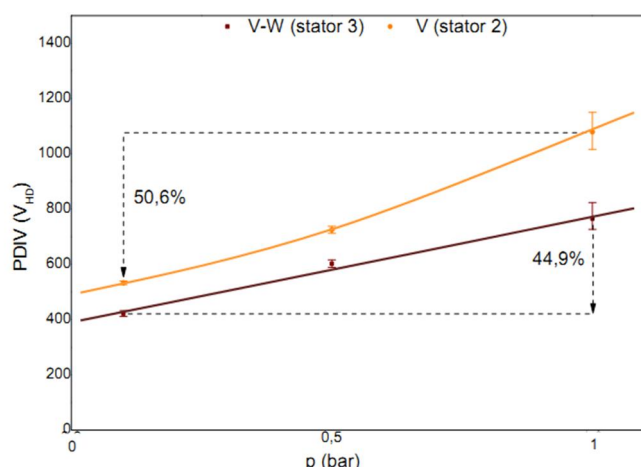
Áp suất không khí có ảnh hưởng lớn đến ngưỡng giá trị PDIV, bởi tác động của nó đối với quá trình phóng điện. Vậy thì việc định lượng giá trị PDIV khi áp suất thấp là vô cùng cần thiết, đối với các stator có vị trí ở những khu vực không được điều áp. Vì lẽ đó, nhằm xác định được giá trị PDIV nhỏ nhất có thể xảy ra, các tác giả đã lựa chọn các stator có ngưỡng PDIV thấp nhất dưới áp suất không khí ở mặt đất (1bar), đạt được trong các phần thử nghiệm trước, để tiến hành thử nghiệm dưới điều kiện áp suất thay đổi. Các stator đó là:

- Loại A: cách điện giữa pha V-W (stator 3) và cách điện rãnh V (stator 2).
- Loại B: cách điện giữa pha 1 và pha 2, cách điện rãnh của pha 1.

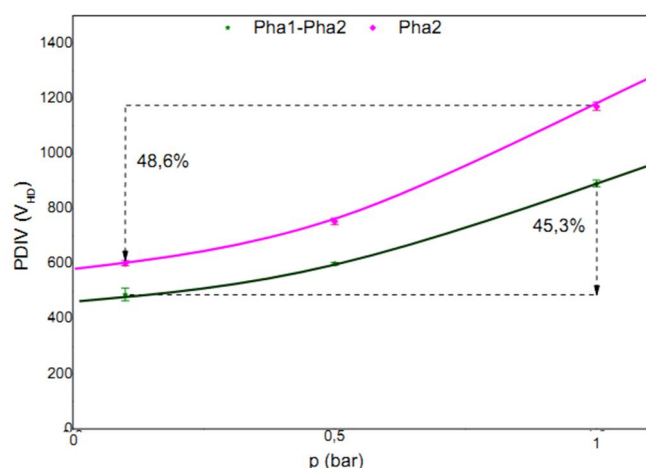
Căn cứ vào mức áp suất thực tế đưa ra bởi các nhà sản xuất máy bay, các thực nghiệm đã được tiến hành dưới áp suất 0,1bar và 0,5bar với buồng điều hòa không khí (climate chamber) của hãng Votsch kiểu 7018 (<http://www.v-it.com>).

Các kết quả PDIV đo được theo điều kiện áp suất không khí được thể hiện trên hình 10 và 11. Các kết quả này chỉ ra rằng ngưỡng PDIV giảm mạnh khi áp suất giảm. Tổng thể, PDIV giảm khoảng 45% đến 50% khi áp suất bằng 1/10 áp suất không khí thông thường (0,1bar). Đối với các stator

được đặt ở những khu vực không được điều áp, áp suất xung quanh các cuộn dây pha dao động xung quanh 0,7bar. Ứng với áp suất này, giá trị PDIV giảm trung bình khoảng 20% so với PDIV ở 1bar.



Hình 10. Giá trị PDIV theo áp suất không khí (stator loại A) ($T=25^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=50\%$)



Hình 11. Giá trị PDIV theo áp suất không khí (stator loại C) ($T=25^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=50\%$)

4. KẾT LUẬN

Các nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành với các stator của động cơ điều áp và quạt gió đưa chúng tôi đến các kết luận dưới đây:

- Việc đai dây ở phần trung gian của các cuộn dây pha không ảnh hưởng đến các chức năng của cách điện rãnh. Ngược lại, nó cực kì gây hại cho cách điện giữa các pha, bằng cách dịch chuyển vị trí của vật liệu cách điện. Trên thực tế, 3 trên 5 stator loại A đều có ít nhất một lỗi cách điện pha sau khi đai dây.
- Áp suất không khí có ảnh hưởng lớn đến các hoạt động PD. Ở 0,7bar, các giá trị PDIV đạt được giảm trung bình khoảng 20% so với giá trị tìm thấy trong điều kiện "mặt đất".

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Liên minh Châu Âu, công ty Liebherr Aerospace, công ty Technofan đã hỗ trợ tài chính cho dự án nghiên cứu (dự án PREMEP, giai đoạn 2003-2007).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Xavier Roboam, 2011. *News trends and challenges of electrical networks embedded in "more electrical aircraft"*. In Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, 27-30 June 2011.
- [2]. Quan Manh Nguyen, 2012. *Study of the impact of aeronautical constraints on electrical insulation systems of environmental control motors*. Thesis, Toulouse University, France.
- [3]. F.H. Kreuger, 1989. *Partial discharge detection in high-voltage equipment*. Elsevier Science & Technology, Oxford, United Kingdom.
- [4]. *Partial discharge measurements*, IEC 270, 1981.
- [5]. *Guide for the statistical analysis of electric insulation voltage endurance data*, IEEE 930, 1987.
- [6]. J.F. Lawless, 1975. *Construction of tolerance bounds for the extreme-value and Weibull distribution*. Technometrics, vol 17, pp. 255-261.