

# GIẢI PHÁP CÁCH ĐIỆN CHO ĐỘNG CƠ ĐIỆN HOẠT ĐỘNG Ở NHIỆT ĐỘ CAO

ELECTRICAL INSULATION SOLUTIONS FOR ELECTRICAL MACHINES OPERATING AT HIGH TEMPERATURE

Nguyễn Mạnh Quân<sup>1,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.253>

## TÓM TẮT

Trong quá trình vận hành của động cơ luôn sinh ra nhiệt, nhiệt được truyền qua các bộ phận khác của động cơ khiến chúng xuống cấp theo thời gian. Thành phần quan trọng bị ảnh hưởng bởi nhiệt là hệ thống cách điện của động cơ, do vậy xác định khả năng chịu được nhiệt độ của hệ thống cách điện sẽ dự đoán được tuổi thọ làm việc của động cơ. Nghiên cứu đã trình bày các giải pháp được sử dụng cho hệ thống cách điện của động cơ điện hoạt động ở nhiệt độ cao. Các đặc tính vật lý của các loại vật liệu cách điện đã được phân tích. Nghiên cứu đã thực hiện thử nghiệm trên hai loại mẫu thử thông qua phép đo ngưỡng điện áp phóng điện cục bộ và tuổi thọ. Kết quả đạt được mở ra nhiều hướng phát triển, trong tương lai gần, cho các hệ thống cách điện của động cơ điện ở nhiệt độ cao.

**Từ khóa:** Hệ thống cách điện; nhiệt độ cao; phóng điện cục bộ.

## ABSTRACT

During engine operation, heat is always generated, it is transferred to other parts of the engine, causing them to degrade over time. The important component affected by heat is the motor's insulation system, so determining the insulation system's ability to withstand temperature will predict the motor's working life. Solutions used for the insulation systems of electric motors operating at high temperatures are presented. The physical properties of the materials were analyzed. Tests were conducted on two types of specimens, through partial discharge inception voltage and lifetime measurements. The achieved results open up many development directions, in the near future, for these insulation systems.

**Keywords:** Electrical insulation systems, high temperature, partial discharge.

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: thayquan.hauivn@gmail.com

Ngày nhận bài: 18/4/2024

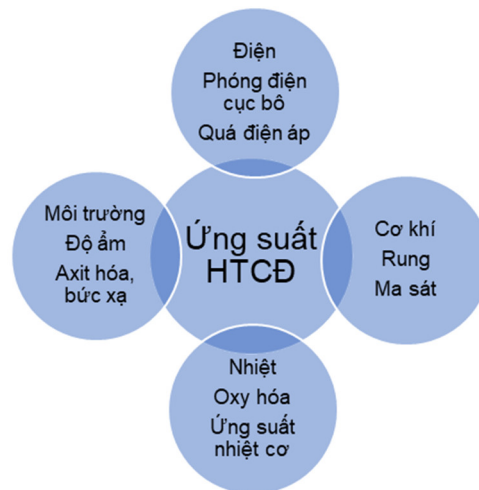
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

## CHỮ VIẾT TẮT

DTM	Dây tráng men
HTCĐ	Hệ thống cách điện
ĐCĐ	Động cơ điện
HSGNH	Hệ số giãn nở nhiệt
PI	Polyimide
PĐCB	Phóng điện cục bộ (Partial Discharge)
PDIV	Ngưỡng điện áp phóng điện cục bộ (Partial Discharge Inception Voltage)
CDX	Cặp dây xoắn (Twisted Pair)

## 1. GIỚI THIỆU



Hình 1. Ứng suất tác động lên HTCĐ của ĐCĐ

Các nghiên cứu về nguyên nhân gây ra sự cố cho ĐCĐ cho thấy, gần 40% sự cố có liên quan đến sự đánh thủng "một phần" của HTCĐ [1, 2]. Tài liệu [3] đưa ra các giải thích vật lý liên quan đến vấn đề lão hoá của các chất cách điện Polymer được sử dụng phổ biến trong HTCĐ của

ĐCĐ. Các cơ chế già hoá cách điện là rất đa dạng (điện, nhiệt, hoá học,...) như mô tả trong hình 1. Các ứng suất này tác động chủ yếu đến liên kết hoá trị giữa các đại phân tử [4] và như vậy là suy yếu cấu trúc của Polymer. Điều này đặt giới hạn cho hoạt động của Polymer ở nhiệt độ khoảng 240°C (cấp cách nhiệt ở mức cao nhất). Các nghiên cứu gần đây cho thấy vẫn có thể mở rộng phạm vi hoạt động của Polymer [5, 6] bằng cách thêm chất độn nano.

Trong môi trường nhiệt độ cao, HTCĐ ngoài bị tác động bởi các ứng suất liệt kê trong hình 1, còn bị tác động thêm bởi những ứng suất đặc biệt xuất hiện khi nhiệt độ tăng lên như:

**Sự khuếch tán:** Nhiệt độ tối đa cho phép đối với một cuộn dây ĐCĐ không chỉ bị áp đặt bởi HTCĐ mà còn bởi kim loại được sử dụng làm chất dẫn điện. Đồng là kim loại được sử dụng nhiều nhất trong sản xuất dây quấn do nó có điện trở suất thấp và khi ở nhiệt độ cao, vấn đề chính liên quan đến việc sử dụng đồng là quá trình oxy hoá của nó [5]. Ở nhiệt độ phòng, đồng bị oxy hoá không đáng kể. Sự oxy hoá xảy ra nếu nhiệt độ vượt quá 200°C, trong đó, trước hết ở dạng Cu<sub>2</sub>O sau đó dạng CuO [6]. Vậy thì, cấu hình duy nhất có thể cho lớp oxit ở bề mặt đồng là: Cu-Cu<sub>2</sub>O-CuO-không khí. Ở nhiệt độ cao, kim loại dẫn điện khuếch tán vào lớp cách điện để tạo thành vật liệu oxit bán dẫn bên trong lớp cách điện, làm suy giảm đặc tính cách điện. Điều này làm suy giảm mức độ hiệu quả các cách điện và có thể tạo ra các kênh dẫn điện gây ngắn mạch giữa các vòng dây được đặt cạnh nhau. Tài liệu [7] cho thấy rằng độ sâu khuyết tán của đồng trong lớp cách điện phụ thuộc vào nhiệt độ, nhiệt độ càng cao thì độ sâu khuyết tán càng lớn. Để tránh hiện tượng khuyết tán từ đồng, các kim loại khác có thể được sử dụng một lớp ngăn ngừa khuếch tán như Niken (Ni), Titan (Ti), Platin (Pt). Hợp kim của đồng và niken được sử dụng nhiều nhất vì chúng là các nguyên tố cạnh nhau trong bảng tuần hoàn và do đó sẽ dễ dàng để kết hợp chúng.

**Sự giãn nở nhiệt chênh lệch:** Sự giãn nở nhiệt là xu hướng vật liệu thay đổi thể tích để đáp ứng sự thay đổi nhiệt độ. Mức độ thay đổi được thể hiện thông qua HSGNH. Giá trị của hệ số này phải được cân nhắc thận trọng khi lắp ráp các vật liệu có hệ số giãn nở nhiệt khác nhau, thậm chí rất khác nhau. Đối với các chất cách điện vô cơ (silic, thủy tinh, gốm,...), HSGNH ở mức từ 0,5.10<sup>-6</sup>/°C đến 10.10<sup>-6</sup>/°C, thấp hơn nhiều so với kim loại và hợp kim được sử dụng trong các ứng dụng nhiệt độ cao: đồng: 16,5.10<sup>-6</sup>/°C; niken: 13,4.10<sup>-6</sup>/°C. Các vết nứt và kẽ hở, vậy thì, có thể xuất hiện sau vài chu kỳ nhiệt. Các Polymer

được sử dụng phổ biến trong các ĐCĐ hiện tại (Polyester, Polyamides, Polyimides) có tính linh hoạt tự nhiên đối với sự giãn nở của đồng. Do đó, vấn đề giãn nở sẽ chỉ trở nên phức tạp đối với các chất cách điện vô cơ vì sự giãn nở nhiều hơn đáng kể so với đồng sẽ tạo ra ứng suất quan trọng trên lớp cách điện.

**Độ dẫn nhiệt:** Nhiệt lượng phát sinh từ đồng, trong quá trình dẫn điện của nó, khó thoát ra ngoài lớp cách điện do tính dẫn nhiệt thấp. Đối với các chất cách điện thông thường, cách điện khoáng chất có độ dẫn nhiệt cao nhất (gốm: từ 2 đến 4W/m.°K, mica: từ 0,4 đến 0,8W/m.°K, so với đồng: từ 300 đến 400W/m.°K, các Polymer: khoảng 0,2W/m.°K.

**Điện trở suất:** Điện trở suất của vật liệu cũng chịu sự tác động của việc gia tăng nhiệt độ. Trên thực tế, mỗi vật liệu có hệ số thay đổi điện trở suất khác nhau (bảng 1). Bảng này cho thấy đối với các ứng dụng có nhiệt độ cao, đồng và bạc vẫn là sự lựa chọn tốt nhất, ngay cả khi giá trị điện trở thay đổi mạnh. Ở 400°C, giá trị điện suất của đồng hay bạc sẽ tăng lên khoảng 2,5 lần. Lưu ý rằng ngoài việc điện trở suất không tốt ở nhiệt độ phòng, niken cũng có hệ số thay đổi điện trở suất theo nhiệt độ không tốt, điều đó sẽ ảnh hưởng đáng kể đến những dây có cách điện gốm.

Bảng 1. Ứng suất tác động lên HTCĐ của ĐCĐ

Kim loại	Điện trở suất (300°K)	Hệ số thay đổi điện trở suất theo nhiệt độ
Bạc	15.10 <sup>-9</sup> Ω.m	3,85.10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
Đồng	18.10 <sup>-9</sup> Ω.m	3,93.10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
Nhôm	26.10 <sup>-9</sup> Ω.m	4,03.10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
Niken	70.10 <sup>-9</sup> Ω.m	5,37.10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
Sắt	104.10 <sup>-9</sup> Ω.m	6,5.10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>

Mục đích của nghiên cứu này chủ yếu liên quan đến việc đánh giá độ tin cậy của các giải pháp công nghệ có thể giúp sản xuất các ĐCĐ có khả năng hoạt động ở nhiệt độ cao hơn các ĐCĐ hiện tại đang được sử dụng trong lĩnh vực hàng không và một số lĩnh vực khác. Ba giải pháp công nghệ đã được nghiên cứu và đề xuất:

- Thứ nhất là sử dụng các DTM và vecni nhúng được cấu thành cơ bản từ vật liệu hữu cơ (polymer);
- Thứ hai là sử dụng các DTM được phủ bằng các sợi thủy tinh và được nhúng với vecni thích hợp;
- Thứ ba là công nghệ cách điện sử dụng các vật liệu gốm, vốn có khả năng mang lại triển vọng gia tăng nhiệt độ cao hơn nhưng khó thực hiện hơn trong thời hạn ngắn.

Độ tin cậy của ba giải pháp công nghệ này đã được xem xét và đánh giá thông qua các kết quả kiểm thử (theo nhiệt độ tăng dần), bằng cách sử dụng các hệ thống đo lường có khả năng thu thập các thông số chính của HTCĐ. Việc phân tích sự thay đổi các thông số, được ghi lại trong các chuỗi kiểm thử, có thể giúp ước lượng nhiệt độ tối đa cho phép ở lõi dây quấn.

Trong nghiên cứu này, trước tiên, hiện trạng các công nghệ “cách điện” cho phép các động cơ điện hoạt động ở nhiệt độ cao sẽ được giới thiệu ngắn gọn. Sau đó, các giải pháp được lựa chọn sẽ được liệt kê. Các kiểm thử sẽ được thực hiện theo hai giai đoạn: Giai đoạn thứ nhất được hiện trên mẫu kiểm thử “đơn giản”; Giai đoạn thứ hai được thực hiện trên mẫu kiểm thử khá gần với thực tế của HTCĐ. Việc làm này cho phép kiểm tra tổng thể hiệu quả của HTCĐ với các vật liệu đã được đề xuất.

## 2. CÔNG NGHỆ CÁCH ĐIỆN CHO PHÉP ĐỘNG CƠ ĐIỆN HOẠT ĐỘNG Ở NHIỆT ĐỘ CAO VÀ LỰA CHỌN GIẢI PHÁP KIỂM THỬ

HTCĐ của ĐCĐ, chủ yếu là cách điện ở stator, bao gồm cách điện dây (giữa các dây quấn trong cùng một pha), cách điện pha (cách điện giữa các dây khác pha), cách điện rãnh (giữa các dây quấn và mạch từ). Có nhiều công nghệ cách điện đã được nghiên cứu và ứng dụng cho ĐCĐ nhằm mục đích cải thiện khả năng hoạt động của ĐCĐ ở nhiệt độ cao.

### 2.1. Cách điện hữu cơ

#### 2.1.1. Cách điện của DTM

Các DTM hữu cơ sử dụng cho ĐCĐ bao gồm lõi dẫn điện bằng đồng hoặc nhôm được bao quanh bởi một lớp cách điện mỏng. Lớp này được tạo thành từ nhiều lớp vécní tráng men có tính chất tương đồng hoặc khác biệt. Mỗi lớp vécní này có nhiệm vụ đảm bảo các chức năng cần có của dây tráng men: bám dính vào đồng, ổn định nhiệt, cách điện, bảo vệ cơ khí, bảo vệ chống lại các tác động của môi trường,... Các lớp vécní hầu hết đều có công thức phức tạp bao gồm nhiều dung môi, nhiều chất tiền-polymer cũng như các chất liên kết. Tùy thuộc vào bản chất hoá học của lớp tráng men và đường kính của dây, lớp vécní tráng men bao gồm từ 18 đến 40% phần hữu ích, phần còn lại là dung môi được đốt cháy trong quá trình polyme hoá. Tuy nhiên, bản chất của dung môi đóng vai trò quan trọng đối với chất lượng sau cùng của dây.

Nhiều kiểu DTM khác nhau đã được thương mại hoá. Các tiêu chuẩn (IEC 60317-38, NEMA MW100 hay JIS 3202) [8-10] miêu tả chi tiết các dây dẫn điện tráng men (đường

kính, độ dày cách điện,...). Trong số các DTM, DTM được cấu thành từ PI có cấp cách nhiệt cao nhất (240°C). DTM này có đặc tính nhiệt và đặc tính cách điện phụ thuộc lớn vào độ ẩm. Độ bền cách điện của PI giảm khoảng 25% khi độ ẩm tương đối tăng từ 0 đến 100% [11].

#### 2.1.2. Polymer có tăng cường chất độn nano

Giải pháp “chất độn nano” mang lại tuổi thọ cao hơn cho các ĐCĐ. Sự có mặt của các “chất độn nano” giúp lớp cách điện Polymer có đặc tính tốt hơn và ứng phó tốt hơn với PĐCB [12, 13]. Trên thực tế, việc bổ sung các hạt vô cơ (vài % khối lượng) cho phép giảm đáng kể (lên tới hệ số 1000) độ nhạy của nhựa hữu cơ đối với PĐCB thông qua việc: giảm năng lượng va chạm trong khi cải thiện khả năng khuếch tán khí [14]; tăng khả năng chịu nhiệt. Nhiều loại hạt khác nhau có thể được sử dụng:  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  hoặc gần đây hơn là các hợp chất mica tổng hợp [15].

Giải pháp sử dụng Polymer có tăng cường chất độn nano có thể thực hiện theo ba cách khác nhau:

- Dây tráng men có tăng cường chất độn nano kết hợp với vécní nhúng truyền thống;
- Dây tráng men tiêu chuẩn kết hợp với vécní nhúng có tăng cường chất độn nano;
- Dây tráng men có tăng cường chất độn nano kết hợp với vécní nhúng có tăng cường chất độn nano.

#### 2.1.3. Vécní nhúng

Chức năng chính của vécní nhúng là giúp gia cố cơ học cuộn dây, bảo vệ nó chống lại các tác nhân của môi trường như độ ẩm và cải thiện khả năng dẫn nhiệt. Vécní nhúng, theo thành phần của nó, được phân chia làm hai loại:

- Vécní có dung môi: dung môi nhằm mục đích có được độ nhớt thấp hơn cho phép giúp việc sử dụng vécní trở nên hiệu quả và dễ dàng hơn, nó bay hơi trong giai đoạn sấy khô hoặc trùng hợp. Dung môi được sử dụng có thể hoàn toàn hữu cơ hoặc có một thành phần chứa nước. Những vécní này có nhược điểm là thải ra một lượng lớn các chất hữu cơ dễ bay hơi gây nguy hiểm cho sức khoẻ con người và môi trường (N-Methyl-Pyrrolidone, dung môi béo và thơm như Naphththa, Toluene, Xylene,...).
- Vécní không dung môi: chúng có chứa chất pha loãng phản ứng (thường là monomer) có thể làm giảm độ nhớt và thường có chất xúc tác làm tăng tốc độ đông cứng.

Vécní nhúng và kỹ thuật nhúng được sử dụng có mối liên hệ chặt chẽ. Vécní phải được nhúng theo cách tốt nhất để loại bỏ được các vùng không khí bên trong dây quấn. Quy trình VPI (nhúng áp suất - chân không) thường

được sử dụng để vécn thâm nhập tốt hơn vào tâm của cuộn dây.

## 2.2. Cách điện vô cơ

Trong môi trường có nhiệt độ hơn 300°C, các chất cách điện khoáng là tốt nhất, phù hợp với thời gian hoạt động lâu dài [16]. Tuy nhiên, ngoài nhiệt độ, các vật liệu này cũng phải chịu đựng được mà không bị hư hỏng dưới các tác động của ứng suất điện và cơ khí.

### 2.2.1. Mica

Mica là một khoáng chất có thành phần chủ yếu là Silicat nhôm và Kali. Mica ổn định khi tiếp xúc với điện trường, ánh sáng, độ ẩm và nhiệt độ cao. Ngoài ra, Mica cũng có khả năng chống lại các PĐCB. Các loại Mica chính được sử dụng trong kỹ thuật điện là Mica phlogopite và Mica muscovite. Mica muscovite được sử dụng chủ yếu trong tụ điện, nhưng độ ổn định nhiệt của nó kém hơn so với Mica phlogopite. Mica phlogopite ổn định ở nhiệt độ cao đến 900°C và được sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi sự kết hợp giữa sự ổn định nhiệt độ và đặc tính điện.

### 2.2.2. Sợi thủy tinh

Thủy tinh là vật liệu hoặc hợp kim cứng, giòn và trong suốt. Ở nhiệt độ phòng, thủy tinh là chất cách điện tốt có điện trở suất  $10^{17}\Omega.m$ , nhưng ở nhiệt độ cao, nó là chất dẫn điện. Ở nhiệt độ 500°C, điện trở suất giảm xuống  $6,3.10^{15}\Omega.m$ . Thủy tinh có đặc tính chịu nhiệt tốt nhưng dễ vỡ và khó sử dụng để làm các cách điện. Vì vậy, thủy tinh được chuyển thành sợi linh hoạt. Những sợi thủy tinh này được dùng để làm vải quấn xung quanh dây cáp. Giống như bất kỳ vật liệu vô cơ nào khác, thủy tinh có khả năng chống chịu tốt với các PĐCB [17].

### 2.2.3. Nhựa silicon

Silicon là những hợp chất vô cơ có chứa một chuỗi Silicon-Oxy được cố định trên nhóm nguyên tử Silicon. Một số nhóm hữu cơ (Carbon, Hydro và đôi khi các thành phần hoá học khác) có thể được sử dụng để liên kết các chuỗi này. Các đặc tính hữu ích nhất của nhựa Silicon bao gồm: sự ổn định nhiệt, nhiệt độ phá huỷ cao và đặc tính cách điện tốt. Trong hầu hết các HTCD, Silicon được sử dụng làm chất kết dính bởi vì Silicon sẽ chuyển thành vật liệu vô cơ khi nó được nung ở nhiệt độ cao [16]. Trong nhiều trường hợp, chất độn khoáng có thể được thêm vào các chất kết dính này. Gốm có tính xốp và ưa nước tự nhiên và đôi khi chúng được hợp nhất với Silicon để chống lại độ ẩm tốt hơn.

### 2.2.4. Gốm

Gốm là chất vô cơ và phi kim loại có đặc tính nhiệt rất tốt. Gốm thường có quán tính hoá học rất cao và có khả

năng chống lại sự tấn công của sự oxy hoá và các hư hỏng gây ra do điều kiện môi trường khắc nghiệt. Gốm vẫn giữ được độ bền của nó ngay cả khi ở nhiệt độ cao và có khả năng chịu đựng sốc nhiệt. Gốm cũng có hệ số dẫn nhiệt và giãn nở nhiệt thấp. Gốm dùng trong kỹ thuật được phân chia làm ba loại:

- Oxit:  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,...

- Không Oxit: Cacbua, Boride, Nitrit, gốm tổng hợp từ Silicon và Vonfram, Magiê, Bạch kim hoặc Titan;

- Vật liệu tổng hợp gốm là sự kết hợp của Oxit và không Oxit.

Nhiều quy trình đã được đề xuất để chế tạo các dây gốm có khả năng hoạt động ở nhiệt độ cao [18]. Các cơ chế gây hư hỏng trong các vật liệu gốm vẫn chưa được làm rõ một cách đầy đủ. Các tài liệu [19, 20] đã chỉ ra các cơ chế đánh thủng có thể là: đánh thủng bởi sự phá hoại của nhiệt độ, đánh thủng bởi sự phá hoại của quá trình oxy hoá, đánh thủng bởi tác động của ứng suất điện cơ.

### 2.2.5. Nhựa Epoxy

Nhựa Epoxy hay còn gọi là Polyepoxy là một Polymer nhiệt rắn, thu được bằng cách trùng hợp các Monomer Epoxy thông qua việc sử dụng chất liên kết như Axit anhydrid, Phenol hoặc thường xuyên hơn là Amin. Nhựa Epoxy cứng không thể đảo ngược sau khi tăng nhiệt độ hoặc bổ sung chất xúc tác. Đối với các ứng dụng nhiệt độ cao, nhựa Epoxy được sử dụng như một ma trận kết cấu được gia cố bằng sợi thủy tinh, mica hoặc gốm. Đối với chất cách điện bằng gốm, nhựa làm giảm độ xốp và như vậy tăng cường thêm độ bền cơ khí [21].

Các nghiên cứu được thực hiện trên nhựa lai Epoxy-Silicon [22] cho thấy vật liệu này biểu hiện đặc tính cơ học rất tốt và hệ số giãn nở nhiệt cao hơn ở nhiệt độ cao (300°C). Các thực nghiệm cũng đã được thực hiện với PĐCB trong chân không đối với vật liệu Epoxy [23]. Các tác giả đã chỉ ra rằng cường độ phóng điện đã thay đổi rất nhiều với sự tăng lên của nhiệt độ.

## 2.3. Tương quan giữa cách điện hữu cơ và cách điện vô cơ

Bảng 2 trình bày sự so sánh ngắn gọn giữa các đặc tính vật liệu vô cơ và hữu cơ. Nhìn chung, để hoạt động ở nhiệt độ cao, các vật liệu vô cơ tốt hơn các vật liệu hữu cơ. Tuy nhiên, đặc tính cơ và điện của vật liệu vô cơ kém hơn. Hơn nữa, ngoại trừ Mica, các vật liệu vô cơ không được khuyến khích trong các ứng dụng có sự gia tăng điện áp định mức do độ xốp của chúng. Ở nhiệt độ cao, sự di chuyển của đồng vào các lớp cách điện vẫn gây ra nhiều vấn đề nhức nhối [24] và bắt buộc phải sử dụng

các rào cản di chuyển như Niken. Tuy nhiên, việc bổ sung các kim loại các đặc tính điện và từ kém tốt hơn so với đồng làm ảnh hưởng đến tính chất của dây quấn cũng như quá trình sản xuất chúng.

Bảng 2. So sánh vật liệu cách điện hữu cơ và vô cơ

	Cách điện vô cơ	Cách điện hữu cơ
Cơ khí	+	-
Điện	+	-
Nhiệt	-	+

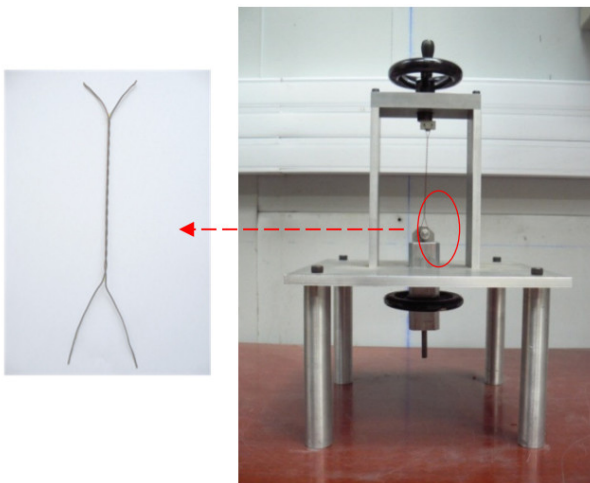
Trong bài báo, tác giả lựa chọn nghiên cứu và kiểm thử khả năng chịu nhiệt độ của bốn giải pháp cách điện chính:

- Polymer (PI);
- Polymer có tăng cường chất độn nano;
- Silicon/sợi thủy tinh;
- Gốm.

### 3. KIỂM THỬ ĐỐI VỚI MẪU THỬ “ĐƠN GIẢN”

#### 3.1. Mẫu thử

Để thực hiện các mẫu thử sát với thực tế cho 4 giải pháp cách điện được lựa chọn ở mục 3, nghiên cứu đã lựa chọn mẫu đơn giản là 3 loại dây dẫn đã được thương mại hoá. Mẫu sử dụng để kiểm thử là CDX, được chế tạo theo chuẩn NEMA MW 1000 [9]. Các dây dẫn đều có cách điện PI (Polymer có cấp cách nhiệt cao nhất, 240°C). Các thông số khác của dây dẫn được mô tả trong bảng 3.

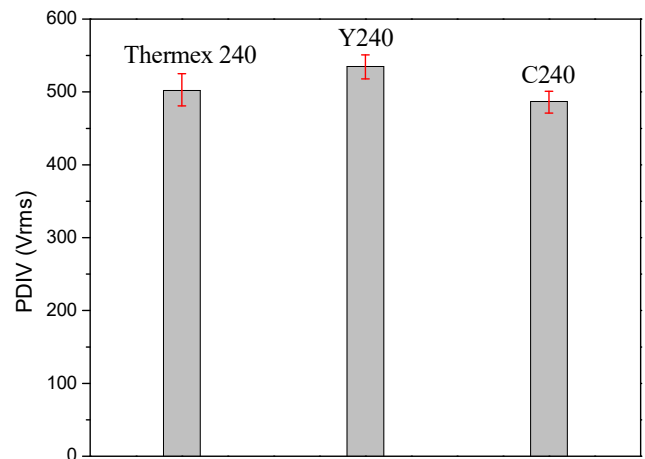


Hình 2. CDX và thiết bị chế tạo

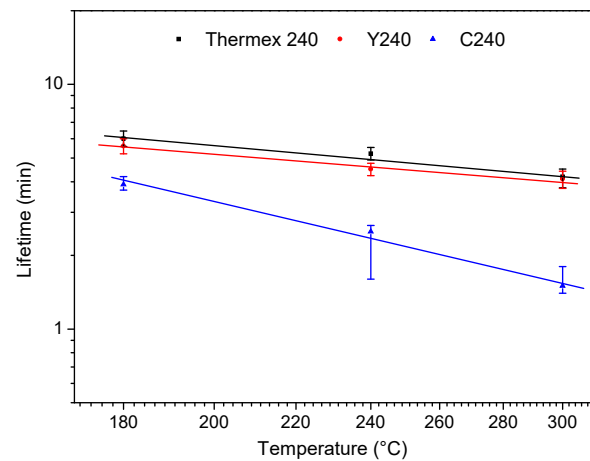
Bảng 3. Các thông số chính của các DTM được lựa chọn

Dây	Hãng	Đường kính (mm)	Cấp	Cách điện
Thermex 240	Von roll	0,5	2	PI
Y240	Essex	0,5	2	PI
C240	Ederfil	0,5	2	PI

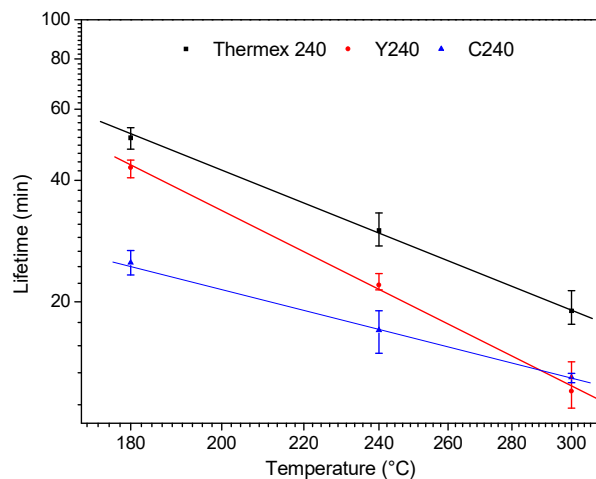
### 3.2. Kết quả thực nghiệm



Hình 3. Kết quả thực nghiệm của PIDV (T = 25°C)



Hình 4. Tuổi thọ của CDX theo nhiệt độ (V = 1kV, f = 10kHz)



Hình 5. Tuổi thọ của CDX theo nhiệt độ (V = 0,5kV, f = 10kHz)

Các kết quả thực nghiệm, liên quan đến các phép đo PIDV (theo tiêu chuẩn IEC 270 [25]) và tuổi thọ, đối với các CDX, được mô tả lần lượt trong các hình 3, 4 và 5. So sánh với các dây PI khác, dây Thermex 240 biểu hiện đặc tính cách điện tốt nhất. Dây Thermex 240 có ngưỡng PIDV chỉ

thấp hơn dây Y240 nhưng có tuổi thọ vượt trội. Trên thực tế, cả ba loại dây này đều có cùng thành phần cách điện (lớp men PI). Như vậy, các giá trị PIDV đạt được không chỉ đến từ chất lượng của lớp men cách điện mà còn phụ thuộc vào sự kết nối của chúng với đồng.

#### 4. KIỂM THỬ ĐỐI VỚI MẪU THỬ “GẮN THỰC TẾ”

##### 4.1. Mẫu thử

Các mẫu này thực chất là các vòng dây được quấn xung quanh một lõi thép (hình 6). Các vòng dây được phân chia với lõi thép bởi cách điện và vécni nhúng. Một mẫu như vậy cho phép đánh giá được mức độ tin cậy của cách điện giữa các vòng dây với mát (cấu trúc của cách điện rãnh trong các động cơ điện hiện hành).

Các mẫu được chế tạo theo 4 giải pháp khác nhau, được nhóm tác giả đề xuất cho hệ thống cách điện, theo thứ tự giảm dần đối với sự chín muồi của công nghệ. Giải pháp 0 là giải pháp PI cổ điển, đã được sử dụng nhiều trong công nghiệp. Giải pháp 1 sử dụng các Polyme có tăng cường chất độn nano kết hợp với vécni nhúng silicon (giải pháp ít thường thấy hơn). Giải pháp 2 là một giải pháp sử dụng dây gôm kết hợp với nhựa silicon. Giải pháp cuối cùng là giải pháp tương đối thực tế vì tất cả các vật liệu cách điện đều liên quan đến gôm. Bảng 3 mô tả chi tiết thành phần cách điện của các giải pháp này.



Hình 6. Mẫu thử “gắn thực tế”

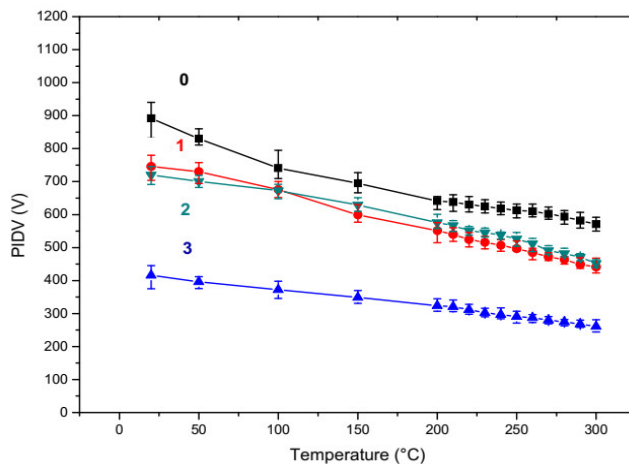
Bảng 4. Các giải pháp được đề xuất để kiểm thử độ tin cậy với mẫu “gắn thực tế”

Giải pháp	Dây tráng men	Cách điện rãnh	Vécni nhúng
0	PI	PI/sợi thủy tinh	Polyimide
1	PI/chất độn nano	Mica	Nhựa silicon
2	Gôm	Silicon/sợi thủy tinh	Nhựa silicon
3	Gôm	Giấy gôm	Xi măng gôm

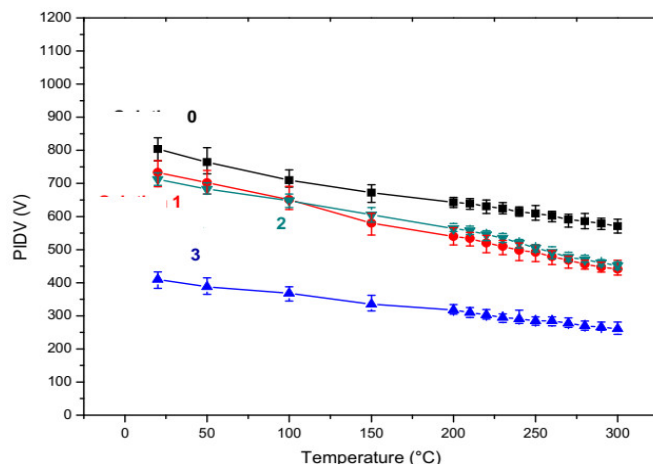
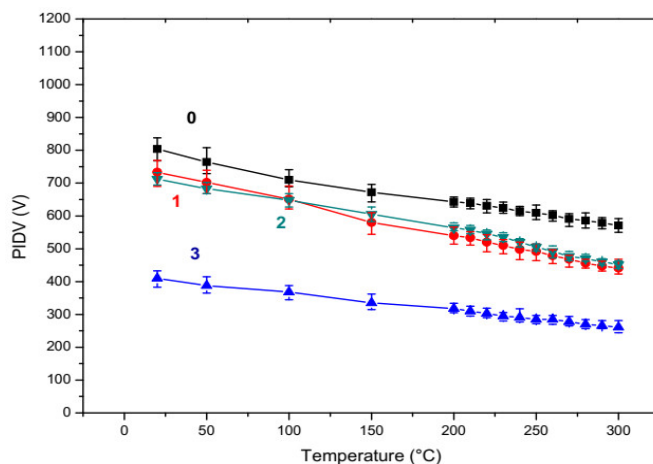
##### 4.2. Kết quả thực nghiệm

Các kết quả thực nghiệm PIDV đối với các mẫu “gắn thực tế” được thể hiện trong các hình 7 và 8. Các kết quả

cho thấy các giá trị PIDV giảm khi nhiệt độ tăng, đối với bất kỳ thành phần cách điện. Các giải pháp “không gôm” (0 và 1) biểu hiện đặc tính cách điện tốt hơn các giải pháp “gôm” (2 và 3). Các kết quả cũng cho thấy không có nhiều sự khác biệt về giá trị PIDV khi đo tăng dần theo nhiệt độ và giảm dần theo nhiệt độ.



Hình 7. PIDV của “mẫu gắn thực tế” khi nhiệt độ tăng từ 20°C đến 300°C (thống kê Weibull với khoảng tin cậy 90%)



Hình 8. PIDV của “mẫu gắn thực tế” khi nhiệt độ giảm từ 300°C xuống 20°C (thống kê Weibull với khoảng tin cậy 90%)

## 5. KẾT LUẬN

Các thử nghiệm tiến hành đối với PI, PI có tăng cường chất độn nano, sợi thủy tinh, silicon và gốm đã cho phép nhóm tác giả đưa ra những đánh giá sơ bộ về mức độ chín muồi của mỗi giải pháp. Các giải pháp "gốm" thể hiện các đặc tính cách điện kém hơn so với các giải pháp sử dụng vật liệu hữu cơ. Các thử nghiệm liên quan đến đặc tính nhiệt và cơ sẽ được tiến hành trong thời gian tới nhằm đưa ra các kết luận toàn diện hơn về mức độ tin cậy của các giải pháp được đề xuất cho hệ thống cách điện của động cơ điện áp hoạt động ở nhiệt độ cao.

---

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. P. Mighdoll, R. P. Bloss, F. Hayashi, *Improved motors for utility applications - Industry assessment study*. Electric Power Research Institute, Cleveland, OH, Report EL-2678, 1982.
- [2]. H. A. Toliyat, G. B. Kliman, *Handbook of Electric Motors, Edition 2 Revised and Expanded*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2004.
- [3]. L. A. Dissado, J. C. Fothergil, *Electrical degradation and breakdown in polymers, Edition 1*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.
- [4]. E. Richaud, J. Verdu, *Viellissement chimique des polymères - Mécanismes de dégradation*. Techniques de l'ingénieur, référence AM3151, 2011.
- [5]. S. Mrowec, A. Stokłosa, "Oxidation of copper at high temperatures," *Oxidation of Metals*, 3, 3, 291-311, 1971.
- [6]. F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. S. Michel, A. Anton, A. Gimenez, "Degradation and dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)," *IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD '07*, Winchester, United Kingdom, 130-133, 2007.
- [7]. H. Mitsui, R. Kumazawa, R. Aizawa, T. Okamoto, T. Ito, M. Kanegami, "Investigation of the voltage life of mica-alumina composite insulation at high temperatures," *Electrical Engineering in Japan*, 129, 4, 24-31, 1999.
- [8]. *Specifies for particular types of winding wires*, IEC 60317-38, 2007.
- [9]. *Magnet wire*, NEMA MW 1000, 2007.
- [10]. *Enamelled winding wires*, JIS C3202, 1994.
- [11]. Dupont, *Technical Guide for NOMEX® Brand Fiber*. Technical document H-52720.
- [12]. P.C. Irwin, "Characterization of commercial corona resistant magnet wire enamels using nanoindentation techniques," in *Proceeding on IEEE-Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*, 105-107, 2003.
- [13]. T. Tanaka, G. C. Montanari, R. Mülhaupt, "Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 11, 763-784, 2004.
- [14]. H. Kikuchi, Y. Yukimori, S. Itonaga, "Inverter surge resistant enameled wire based on nanocomposite insulating material," *Hitachi Cable Review*, 55-62, 2002.
- [15]. N. Fuse, Y. Ohki, M. Kozako, T. Tanaka, "Possible mechanisms of superior resistance of polyamide nanocomposites to partial discharges and plasmas," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 15, 161-169, 2008.
- [16]. H. Mitsui, "Progress in Japan in electrical insulation at high temperatures," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 12, 3, 16-27, 1996.
- [17]. G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines, Edition 1*. Wiley Interscience, 2004.
- [18]. E. R. Kreidler, V. P. Bhammudi, *Research on high temperature ceramic insulation for electrical conductors*. The Ohio State University, Ohio, USA, Report NAG 3-2090, 2001.
- [19]. C. Menguy, *Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides*. Techniques de l'ingénieur, référence D2310, p. 31, 1997.
- [20]. J. M. Haussonne, *Céramiques pour l'électronique et l'électrotechnique, Edition 1*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2002.
- [21]. J. A. Rice, P. E. Fabian, C. S. Hazelton, "Mechanical and electrical properties of wrappable ceramic insulation," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9, 2, 220-223, 1999.
- [22]. A. Takahashi, Y. Satsu, A. Nagai, M. Umino, "Heat-resistant epoxy-silicon hybrid materials for printed wiring boards," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 28, 2, 163-167, 2005.
- [23]. R. Schifani, R. Candela, P. Romano, "On PD mechanisms at high temperature in voids included in an epoxy resin," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8, 4, 589-597, 2001.
- [24]. S. Mrowec, A. Stokłosa, "Oxidation of copper at high temperatures," *Oxidation of Metals*, 3, 3, 291-311, 1971.
- [25]. *Partial discharge measurements*, IEC 270, 1981.

---

### AUTHOR INFORMATION

#### Nguyen Manh Quan

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam