

# ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN CÁCH ĐIỆN VÀ DÒNG ĐIỆN RÒ CỦA VÉCNI PEI TIÊU CHUẨN VÀ VÉCNI PEI CÓ CHỨA CÁC HẠT NANO VÀ MICRO $SiO_2$

INVESTIGATION ON BREAKDOWN STRENGTH AND DC CONDUCTION CURRENT OF STANDARD PEI VARNISH AND PEI VARNISH WITH MICRO AND NANO  $SiO_2$

Nguyễn Mạnh Quân\*, Hoàng Mai Quyên

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm đo đặc tính cách điện của vécni cách điện PEI. Kết quả cho thấy độ bền cách điện và dòng điện rò của vécni đều bị ảnh hưởng bởi các hạt nano và micro  $SiO_2$ . Các đặc tính xấu nhất được tìm thấy với vécni có chứa các hạt micro  $SiO_2$ .

**Từ khóa:** PEI, Độ bền cách điện, dòng điện rò, nano và Micro  $SiO_2$ .

## ABSTRACT

In this paper, breakdown strength and DC conduction current of standard PEI varnish and PEI varnish with micro and nano  $SiO_2$  are measured and analysed. Experimental results have shown that both dielectric strength and conduction current are affected by  $SiO_2$  fillers. The varnish with micro  $SiO_2$  exhibits the worst characteristics.

**Keywords:** PEI, Breakdown strength, conduction current, nano and micro  $SiO_2$ .

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: nguyenvanmanhquyen@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/01/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 19/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 10/6/2019

## KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
I	A	Cường độ dòng điện
U	V	Điện áp

## CHỮ VIẾT TẮT

PEI	Polyesterimide
DC	Một chiều (Direct Current)
AC	Xoay chiều (Alternative Current)
PWM	Điều chỉnh độ rộng xung (Pulse Wave Modulation)
PĐCB	Phóng điện cục bộ
PD	Phóng điện
ASTM	Các phương pháp kiểm nghiệm theo hệ thống tiêu chuẩn Mỹ (American Standard Testing Methods)

## 1. GIỚI THIỆU

Việc sử dụng biến tần PWM để điều khiển tốc độ các động cơ điện ngày càng phổ biến hiện nay. Các vấn đề liên quan đến việc điều khiển đã được giải quyết triệt để tuy nhiên các ứng suất mới đối với hệ thống cách điện đã xuất hiện. Các ứng suất này, gây ra bởi dạng sóng điện áp PWM có tốc độ biến thiên điện áp  $dV/dt$  rất cao (từ vài  $kV/\mu s$  đến vài chục  $kV/\mu s$ ), bao gồm các quá điện áp ở đầu vào động cơ và bên trong các cuộn dây pha. Quá điện áp ở đầu vào động cơ xảy ra khi có sự không tương thích về tổng trở giữa cáp kết nối và các cuộn dây pha và theo lý thuyết có thể gấp 2 lần điện áp bus. Nếu động cơ làm việc ở chế độ hãm, điện áp DC bus gia tăng, dẫn tới quá điện áp cao hơn. Quá điện áp xảy ra bên trong các cuộn dây pha, đặc biệt là ở các vòng dây đầu tiên, bởi vì quá trình lan truyền điện áp là không tức thời (tốc độ lan truyền tỷ lệ nghịch với căn bậc hai của LC, với L và C lần lượt là điện cảm và điện dung của cuộn dây pha). Đối với trường hợp của động cơ điện áp thấp, quá điện áp có thể xảy ra đối với cách điện giữa các pha và giữa các pha với vỏ động cơ. Vấn đề là khi có khoảng trống hở hoặc kín tồn tại bên trong hệ thống cách điện, các quá điện áp này, khi chúng đủ lớn, có thể kéo theo các hoạt động của PĐCB. Thực tế là hệ thống cách điện thiết kế cho các động cơ điện áp thấp tiêu chuẩn không đủ khả năng chịu đựng các cuộc tấn công của PĐCB và tuổi thọ của chúng sẽ bị suy giảm nhanh chóng.

Ba giải pháp đã được đề xuất để nâng cao tuổi thọ cho các động cơ bị tấn công bởi các PD:

- Sử dụng dây tráng men corona-resistant [1-3] (dây có độ bền cao đối với PĐCB) kết hợp với vécni tiêu chuẩn,
- Sử dụng dây tráng men tiêu chuẩn kết hợp với vécni corona-resistant,
- Sử dụng cả dây tráng men và vécni corona-resistant.

Các phá hoại gây ra bởi PĐCB sẽ bắt đầu xảy ra đối với vécni: ở các vùng lân cận xung quanh các bó dây pha (khoảng trống hở), hoặc giữa các vòng dây (khoảng trống kín). Do đó, các nghiên cứu của chúng tôi được tập trung

vào vécn. Kiểu vécn được thiết kế và thử nghiệm trong bài báo này là một loại nhựa PEI, mà bên trong nó có chứa các hạt vô cơ (được phát triển giống như dây tráng men corona-resistant). Các hạt vô cơ được tăng cường để hạn chế sự phá hoại của PĐCB bằng cách giảm:

- Năng lượng va chạm [2, 4],
- Sự ôxi hóa gây ra do sự phân tán các khí (hoặc lỏng) [5].

Nhiều loại hạt vô cơ đã được sử dụng để nâng cao đặc tính cách điện cho nhựa cách điện:  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  [2, 3]. Trong bài báo này, hạt  $SiO_2$  có kích thước nano và micro đã được lựa chọn cho vécn PEI tiêu chuẩn. Nghiên cứu cho thấy các hạt nano  $SiO_2$  đã góp phần nâng cao tuổi thọ của vécn trong các thử nghiệm ở các điều kiện điện áp, tần số và nhiệt độ khác nhau, đặc biệt là trong điều kiện vécn bị tấn công bởi các PĐCB [6].

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đối với độ bền cách điện và dòng điện rò của vécn PEI tiêu chuẩn và vécn PEI có chứa các hạt  $SiO_2$  này. Trên thực tế, việc định lượng các đặc tính cách điện này sẽ có ý nghĩa quan trọng trong việc cải thiện phương thức sản xuất của vécn có chứa các hạt  $SiO_2$  trong thời gian tới.

## 2. PHƯƠNG THỨC THỰC NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu và mẫu

Các nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành đối với vécn nhúng PEI, thường được sử dụng trong hệ thống cách điện của động cơ điện áp thấp, cấp cách nhiệt  $180^\circ C$ . Hai kiểu hạt  $SiO_2$  đã được sử dụng để đưa vào bên trong vécn PEI:

- Hạt nano có kích thước khoảng 10nm,
- Hạt micro có đường kính trung bình  $0,4\mu m$ .

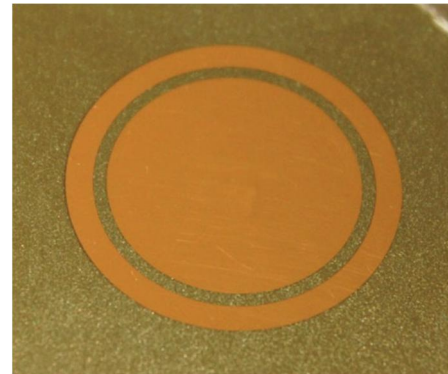
Hạt  $SiO_2$  được sử dụng có kích thước đồng nhất với  $SiO_2$  được sử dụng trong các ứng dụng công nghiệp. Cả hai loại hạt  $SiO_2$  đều có độ tinh khiết cao và có ít nguyên tố vết. Tuy nhiên, chúng đều được sấy trước ở  $200^\circ C$  trong 24 giờ trước khi trộn với polyme để tránh hiện tượng vón cục gây ra bởi sự hấp thụ các nguyên tử nước. Trong cả hai phiên bản vécn có chứa các hạt  $SiO_2$ , tỷ trọng các hạt đều là 1,5%.

Hai loại mẫu khác nhau (được chế tạo từ nhựa tiêu chuẩn PEI và nhựa PEI được tăng cường các hạt  $SiO_2$ ) đã được chuẩn bị:

- Tấm thép được bọc nhựa (đo độ bền cách điện),
- Tấm thép được bọc nhựa và có điện cực (đo dòng điện rò).

Các tấm thép bọc nhựa được sử dụng có dạng hình vuông ( $50mm \times 50mm$ ). Chiều dày tổng  $0,3mm$ . Lớp vécn phủ có chiều dày khoảng  $90\mu m$ . Chiều dày của lớp vécn của tất cả các mẫu đều được đo đạc cẩn thận để đảm bảo tính đồng nhất của các mẫu, sẽ được sử dụng cho các phép đo cách điện. Đối với các phép đo dòng điện rò, các tấm thép bọc nhựa được bổ sung thêm hai điện cực (một điện cực trung tâm và một vòng bảo vệ) như trong hình 1. Để tránh oxy hóa điện cực, đặc biệt là ở nhiệt độ cao, tấm thép được điện cực hóa bằng vàng. Điện cực có chiều dày

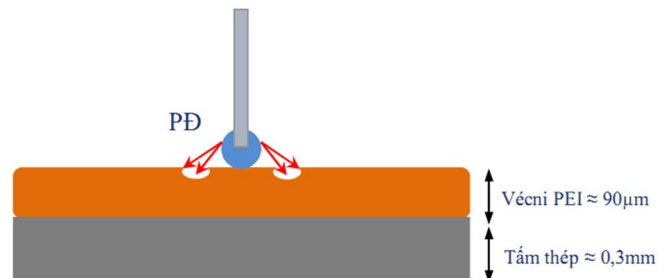
$150nm$  đã được thực hiện bởi quá trình hóa hơi nhiệt. Các kích thước điện cực được tuân thủ theo chuẩn ASTM D257 [7]. Đường kính điện cực trung tâm là  $30mm$  và khoảng cách giữa điện cực này với vòng bảo vệ là  $1,5mm$ .



Hình 1. Tấm thép được bọc nhựa và có phủ điện cực

### 2.2. Đo độ bền cách điện

Tấm thép được sử dụng như một điện cực trong khi đó một điện cực bằng thép không gỉ (đường kính  $1mm$ ) được sử dụng như điện cực thứ hai, giống như miêu tả trong hình 2.



Hình 2. Cấu hình tấm thép - điện cực

Trên thực tế một hệ thống như vậy là cấu hình tốt nhất để đánh giá các đặc tính cách điện bên trong của vécn. Để loại bỏ dòng điện rò trên bề mặt, toàn bộ hệ thống tấm thép - điện cực đã được nhúng trong dầu cách điện (perfluorohexane  $C_6F_{14}$ ).

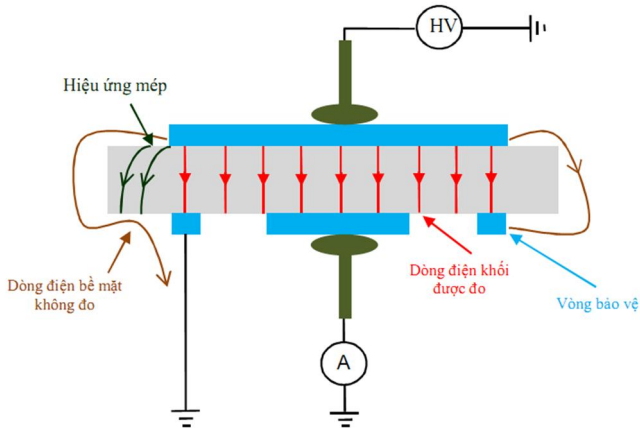
Phép đo độ bền cách điện được thực hiện thông qua phép đo phá hủy mẫu ở nhiệt độ phòng, tuân thủ theo tiêu chuẩn ASTM 2004 [8]. Điện áp, mà tốc độ biến thiên của nó được cố định ở  $1,5kV/\mu s$ , được đặt vào các mẫu đo cho đến khi trong mẫu xuất hiện dòng điện rò  $10mA$  (dòng điện rò có được khi các mẫu đã mất hoàn toàn chức năng cách điện).

Các kết quả đo được xử lý với hàm thống kê Weibull ở hai tham số, theo chuẩn IEEE-std930 [9]. Khoảng tin cậy 90% được xác định nhờ vào phần mềm được phát triển bởi J.F.Lawless [10].

### 2.3. Đo dòng điện rò

Đặc tính dẫn điện của vécn được xác định bằng sự phân cực các mẫu dưới điện áp DC. Khi mà dòng điện phân cực là không đáng kể so với dòng điện rò, các phép đo sẽ được thực hiện bởi một điện kế. Trong thực tế, pha khử phân cực sẽ dừng khi dòng điện đạt ngưỡng độ nhạy của mạch đo, trong trường hợp của nghiên cứu là khoảng  $0,5pA$ .

Mạch đo được biểu diễn trong hình 3. Vòng bảo vệ được thiết kế với mục đích để dẫn dòng điện rò ở bề mặt xuống đất (không được đo bởi điện kế) và như vậy sẽ loại bỏ được hiệu ứng mép giữa hai điện cực đo.



Hình 3. Mạch đo dòng điện rò

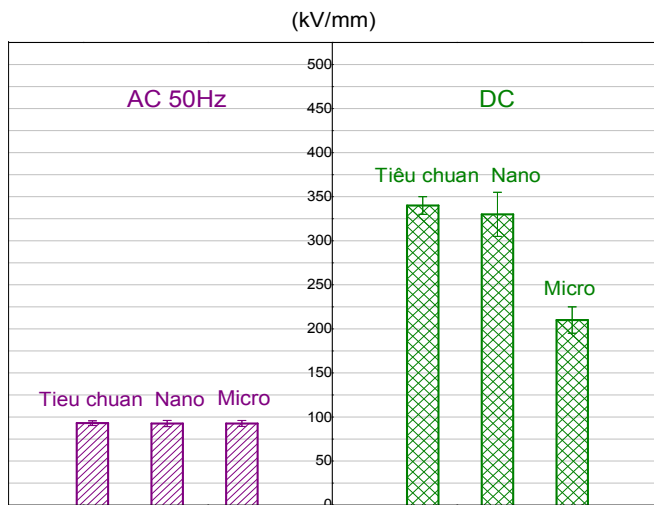
Trong khuôn khổ nghiên cứu, các mẫu được đặt dưới điện áp từ 0,5kV đến 10kV. Các thiết bị được sử dụng bao gồm:

- Nguồn cao áp một chiều Technix SR30-300 (30kV),
- Buồng đo chứa mẫu được trang bị hai điện cực Rogowski bằng thép không gỉ (buồng nhiệt độ Memmert (250°C) giúp đo dòng theo nhiệt độ và tránh cho mẫu khỏi nhiễm điện từ trường bên ngoài),
- Một hệ thống thu thập dữ liệu dòng điện, điều khiển bởi một máy tính nối với điện kế Keithley 485.

**3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU**

**3.1. Độ bền cách điện**

Các kết quả đạt được với phép đo độ bền cách điện, dưới điện áp xoay chiều 50Hz và một chiều, được tổng hợp trong hình 4.



Hình 4. Độ bền cách điện của các loại vécní ( $dV/dt = 1,5kV/\mu s$ , nhiệt độ phòng), thống kê Weibull trên 8 lần độ, khoảng tin cậy 90%

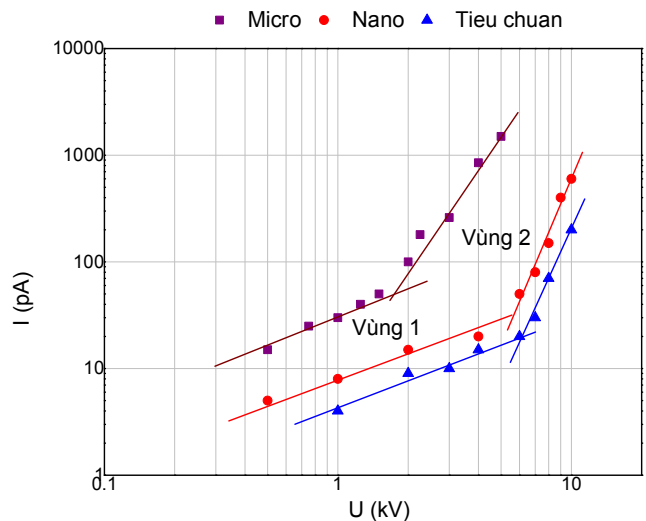
Các kết quả này cho thấy tất cả các vécní thử nghiệm biểu thị một giá trị độ bền cách điện xấp xỉ như nhau ở AC 50Hz. Trong số các lý thuyết khác nhau có thể giải thích

được hiện tượng đánh thủng điện môi rắn (nhiệt, cơ, điện tử [11]), lý thuyết liên quan đến đánh thủng gây ra bởi nhiệt đã bị loại trừ. Trên thực tế, dưới trường điện từ AC 50Hz, hiện tượng gia nhiệt gây ra do dòng điện rò và do tổn hao điện môi không đủ mạnh để có thể làm cho nhiệt độ trong mẫu đi đến giá trị nóng chảy. Cơ chế đánh thủng có nguồn gốc cơ khí cũng bị loại bỏ, bởi vì đặc tính cơ khí của vécní đã giảm mạnh với sự thêm vào của các hạt micro  $SiO_2$  [1]. Như vậy, lý thuyết duy nhất có thể thích hợp là lý thuyết liên quan đến cơ chế đánh thủng có nguồn gốc từ sự phát sinh electron bởi hiệu ứng trường.

Liên quan đến các kết quả đạt được dưới điện áp một chiều, vécní tiêu chuẩn có độ bền cách điện lớn nhất. Trong khi đó, vécní với các hạt nano có giá trị độ bền cách điện thấp hơn một chút (2,5% thấp hơn) nhưng các khoảng tin cậy 90% lại rộng hơn. Ngược lại, vécní với các hạt micro có giá trị độ bền cách điện thấp hơn rất nhiều (khoảng 38%). Các kết quả này chỉ ra rõ ràng rằng độ bền cách điện dưới điện áp một chiều của PEI sẽ bị giảm sút khi các hạt (nhất là các hạt micro) được đưa vào bên trong nó, ngay cả khi mật độ các hạt này là thấp (1,5% khối lượng). Cơ chế vật lý được đưa ra để giải thích hiện tượng đánh thủng dưới điện áp một chiều bên trong PEI đã được làm sáng tỏ trong [12] (đánh thủng có nguồn gốc nhiệt).

**3.2. Dòng điện rò**

Các kết quả đo dòng điện rò được thể hiện trong hình 5. Các kết quả đạt được cho thấy dòng điện rò của vécní PEI đã tăng lên một chút với sự thêm vào của các hạt nano  $SiO_2$ . Ngược lại, với các hạt micro, dòng điện tìm được cao hơn rất nhiều.



Hình 5. Dòng điện rò bên trong các mẫu theo điện áp (nhiệt độ phòng)

Các kết quả đạt được cho thấy dòng điện rò của vécní PEI đã tăng lên một chút với sự thêm vào của các hạt nano  $SiO_2$ . Ngược lại, với các hạt micro, dòng điện tìm được cao hơn rất nhiều.

Trong các tư liệu, chưa có sự nhất trí liên quan đến kiểu hạt mang điện đa số trong PEI. Tuy nhiên, cho dù loại hạt đóng vai trò chủ đạo đối với sự dẫn điện là hạt gì (electron

hay ion), thì sự có mặt của các hạt SiO<sub>2</sub> cũng là thuận lợi hơn cho quá trình dẫn điện. Trên thực tế, sự gia tăng dòng điện rò có liên hệ mật thiết với sự gia tăng độ linh động các hạt mang điện.

Kết quả đo đặc dòng điện rò cũng cho thấy tất cả các vécnỉ thử nghiệm đều biểu hiện đặc tính giống nhau. Tất cả các mẫu đều có một dòng điện rò được thiết lập bởi hai vùng riêng biệt, phân cách bởi sự thay đổi độ dốc. Một cách lôgic, điện áp đạt được với vécnỉ nano SiO<sub>2</sub> tương tự như với vécnỉ tiêu chuẩn. Ngược lại, điện áp dịch chuyển của vécnỉ micro SiO<sub>2</sub> nhỏ hơn khoảng 4 lần.

Phép nội suy tuyến tính các điểm đo đã được thực hiện. Đối với vùng 1, độ dốc xấp xỉ 1. Còn với vùng 2, độ dốc lớn hơn 2. Độ dốc này được đặc trưng bởi một dòng điện rò giới hạn bởi điện tích khoảng không [13].

#### 4. KẾT LUẬN

Qua các nghiên cứu thực nghiệm đo độ bền cách điện và dòng điện rò có thể đưa ra các kết luận dưới đây:

- Các hạt SiO<sub>2</sub>, ở kích thước nano hay micro, đều có ảnh hưởng không tốt đến độ bền cách điện và dòng điện rò của vécnỉ PEI. Các hạt micro có ảnh hưởng tiêu cực nhất: độ bền cách điện kém nhất, dòng điện rò cao nhất.
- Cơ chế đánh thủng vécnỉ PEI ở AC 50Hz là cơ chế vật lý liên quan đến sự phát sinh electron bởi hiệu ứng trường.
- Dòng điện rò của tất cả các vécnỉ thử nghiệm đều biểu hiện đặc tính giống nhau. Như vậy, cơ chế dịch chuyển điện tích bên trong vécnỉ PEI không bị ảnh hưởng bởi sự thêm vào các hạt SiO<sub>2</sub>. Các nghiên cứu của chúng tôi trong thời gian tới sẽ làm sáng tỏ hơn hình thức dịch chuyển điện tích này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. P.C. Irwin, 2003. *Characterization of commercial corona resistant magnet wire enamels using nanoindentation techniques*. Proceeding on IEEE-Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, pp. 105-107.
- [2]. H. Kikuchi, Y. Yukimori and S. Itonaga, 2002. *Inverter surge resistant enameled wire based on nanocomposite insulating material*. Hitachi Cable Review, 21, pp. 55-62.
- [3]. Y. Weijun, K. Bultemeier, D. Barta and D. Floryan, 1997. *Improved magnet wire for inverter-fed motors*. Proceeding on Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, pp. 379-382.
- [4]. M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, 2004. *Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharge using IEC (b) Electrodes*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 833-838.
- [5]. L.M. Sherman, 1999. *Nanocomposites: a little goes a long way*. Plastic Technology, pp. 52-57.
- [6]. Quan Manh Nguyen, 2012. *Study of the impact of aeronautical constraints on electrical insulation systems of environmental control motors*. Thesis, Toulouse University, France.

[7]. ASTM D257, 2005. *Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulation Materials*.

[8]. ASTM, 2004. *Standard Test Methods for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies*.

[9]. IEEE 930, 1987, *Guide for the statistical analysis of electric insulation voltage endurance data*.

[10]. J.F. Lawless, 1975. *Construction of Tolerance Bounds for the Extreme-Value and Weibull Distributions*. Technometrics, vol. 17, pp. 255-261.

[11]. J.J. O'Dwyer, 1973. *Construction of Tolerance Bounds for the Extreme-Value and Weibull Distributions*. Clarendon Press, Oxford,

[12]. N. Zebouchi, V.H. Truong, R. Essolbi, M. Se-Ondoua, D. Malec, N. Vella, S. Malrieu, A. Toureille, F. Schué and R.G. Jones, 1998. *The electric breakdown behaviour of polyetherimide films*. Polym. Int., Vol.46, pp. 54-58.

[13]. G. Teyssedre, G. Tardieu, D. Mary and C. Laurent, 2001. *AC and DC electroluminescence in insulating polymers and implication for electrical ageing*. J.Phys.D:Appl.Phys., Vol.34, pp. 2220-2229.

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Manh Quan, Hoang Mai Quyen**

Faculty of Electrical Engineering Technology, Hanoi University of Industry