

GIÁM SÁT TÌNH TRẠNG ĐỘNG CƠ ĐIỆN CÔNG SUẤT LỚN TẠI NHÀ MÁY ĐẠM CÀ MAU

CONDITION MONITORING FOR LARGE POWER INDUCTION ELECTRICAL
MACHINES AT CA MAU FERTILIZER PLANT

Lư Minh Thừa^{1,2}, Phạm Huy Hoàng²

¹Nhà máy Đạm Cà Mau

²Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT), Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (VNU HCM)

TÓM TẮT

Động cơ điện là một trong những loại máy được sử dụng rộng rãi nhất trong các cơ sở công nghiệp, gia dụng, thương mại và hầu hết các động cơ điện này thuộc loại động cơ cảm ứng với ưu điểm độ tin cậy cao, yêu cầu bảo trì thấp và có hiệu suất tương đối cao. Hơn nữa phạm vi công suất đa dạng từ hàng trăm watt đến megawatt, đáp ứng hầu hết các nhu cầu sản xuất của các quy trình công nghiệp. Trong nhiều trường hợp, động cơ điện là một bộ phận của dây chuyền sản xuất và khi có sự cố đột ngột của động cơ có thể khiến toàn bộ hệ thống ngừng hoạt động. Bài báo này thảo luận về các vấn đề liên quan đến giám sát tình trạng của động cơ công suất lớn tại Nhà máy Đạm Cà Mau, tập trung vào các loại lỗi có thể xảy ra và các triệu chứng liên quan. Nó đưa ra các cơ sở để đưa ra một kế hoạch giám sát tình trạng hiệu quả.

Từ khóa: *Chuẩn đoán lỗi; Động cơ cảm ứng; Độ lệch tâm; Phân tích tính hiệu dòng điện (CMSA).*

ABSTRACT

The electric motor is one of the most widely used machines in industrial, household and commercial establishments. Most of electric motors belong to the induction type with advantages of high reliability, low maintenance requirements and relatively high performance. Furthermore, their power range is diverse from hundreds of watts to megawatts, meeting most of the production needs of industrial processes. In many cases, an electric motor plays an important role in a production line, and a sudden motor failure can bring the entire system to a halt. This article discusses issues related to monitoring the operation status of high power induction electrical machines at Ca Mau Fertilizer Plant, focusing on possible failure types and associated symptoms. It also lays out the basis for an effective monitor plan.

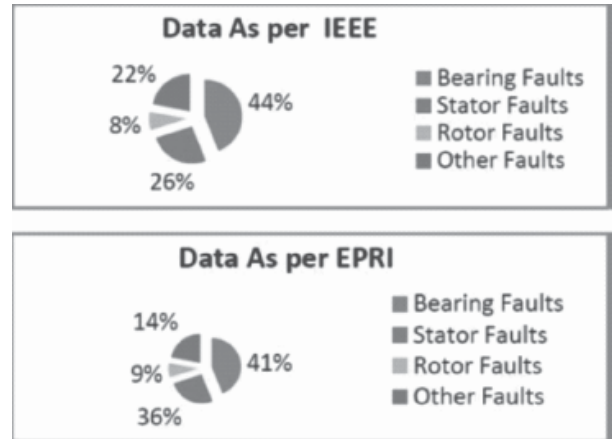
Keywords: *Fault Diagnosis; Induction Motor; Air gap eccentricity; Motor Current Signature Analysis (MCSA).*

1. GIỚI THIỆU

Với vai trò là một trong những Nhà máy cung cấp nguồn phân bón chính cho đồng bằng sông Cửu Long, vùng sản xuất nông nghiệp trọng điểm của khu vực, nên việc duy trì nhà máy Đạm Cà Mau vận hành an toàn, ổn định là một trong những nhiệm vụ rất quan trọng, trong đó không thể không kể đến vai trò của các động cơ điện công suất lớn trong Nhà máy. Hầu hết lượng điện năng tiêu thụ của các động cơ công suất lớn chiếm khoảng 76.25% trên tổng số lượng điện tiêu thụ cho các hoạt động sản xuất.

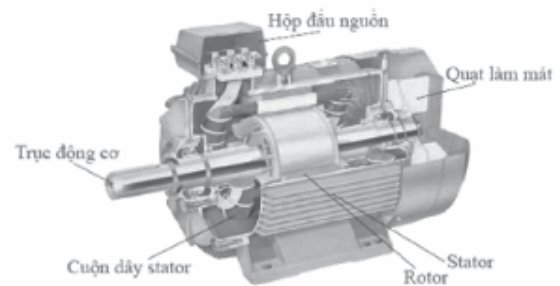
Để nâng cao tính ổn định, tin cậy cho thiết bị việc đánh giá chuẩn đoán tình trạng động cơ công suất lớn tại Nhà máy Đạm Cà Mau là một phần không thể thiếu. Quá trình các thông số của thiết bị được giám sát liên tục. Nếu có bất kỳ thay đổi nào so với các hoạt động thông thường, chúng có thể chỉ ra những hỏng hóc hiện tại hoặc trong tương lai. Điều này sẽ cung cấp cho người giám sát có cái nhìn sâu sắc về tình trạng của thiết bị, từ đó có kế hoạch cụ thể cho việc kiểm soát.

Độ tin cậy của động cơ điện cảm ứng cũng đã được nghiên cứu trong một số cuộc khảo sát như Viện nghiên cứu điện năng EPRI (1983), Viện Kỹ sư Điện - Điện tử IEEE (1985, 1995). Kết quả của các cuộc khảo sát được đưa ra là hư hỏng ổ trục gây ra gần như một nửa $41 \div 44\%$ và hư hỏng cuộn dây stator khoảng $15 \div 36\%$ tất cả các hư hỏng. Tỷ lệ kết hợp của sự cố rotor và trục là khá nhỏ, dưới 10%. Tỷ lệ thiết bị bên ngoài (chất lượng điện năng, mạch công suất) là khoảng $10 \div 22\%$ [1-2].



Hình 1. Phân trăm thành phần lỗi trong động cơ cảm ứng xoay chiều

2. CÁC LỖI CHÍNH TRONG ĐỘNG CƠ CẢM ỨNG



Hình 2. Cấu tạo động cơ cảm ứng

Lỗi vòng bi

Vòng bi là nguyên nhân lớn nhất gây ra lỗi máy móc. Theo số liệu thống kê lỗi vòng bi chiếm hơn 41% tổng số hư hỏng của động cơ. Ứng suất liên tục lên vòng bi gây ra hư hỏng do mỏi, thường là ở các rãnh bên trong, bên ngoài và phần từ con lăn của vòng bi. Các mảnh nhỏ bị vỡ ra khỏi vòng bi được gọi là bong tróc hoặc bong vảy dẫn đến việc vòng bi chạy trong điều kiện không bình thường, tạo ra rung động có thể phát hiện được và tăng mức độ tiếng ồn. Quá trình gây ra lỗi cũng được hỗ trợ bởi các nguồn bên ngoài khác bao gồm ô

nhiểm, ăn mòn, bôi trơn không đúng cách, lắp đặt không đúng cách và sự xâm nhập của nước muối. Điện áp và dòng điện trên trục cũng là nguồn gây ra hư hỏng trên vòng bi. Nhiệt độ trên vòng bi cao cũng là một lý do khác dẫn đến hư hỏng. Để đảm bảo thường nhiệt độ vòng bi không được vượt quá mức tiêu chuẩn quy định của nhà sản xuất. Các khuyết tật trên vòng bi được phân thành các loại theo yếu tố ảnh hưởng sau:

- Khuyết tật vòng ngoài;
- Khuyết tật vòng trong;
- Khuyết tật con lăn.

Lỗi trên cuộn dây stator:

Theo khảo sát có 37% sự cố hư hỏng của động cơ cảm ứng có liên quan đến cách điện của cuộn dây stator và phần lớn các hư hỏng liên quan đến cuộn dây stator được bắt đầu bởi các hư hỏng cách điện trong một số vòng của cuộn dây stator trong cùng một pha. Loại lỗi này trong máy điện xoay chiều ba pha đối xứng gây ra dòng điện tuần hoàn lớn và sau đó sinh ra nhiệt quá mức trong dây bị ngắn mạch. Quá trình này tiếp tục diễn ra cho đến khi dòng điện tuần hoàn vượt quá giá trị giới hạn dẫn đến động cơ bị hư hỏng hoàn toàn. Các hư hỏng liên quan đến cuộn dây stator có thể được chia thành các nhóm:

- Vòng dây - Vòng dây;
- Bôi dây - Bôi dây;
- Pha – Pha;
- Pha - đất;
- Lỗi hở mạch (mất pha).

Lỗi thanh rotor bị hỏng:

Đối với các máy điện có công suất định mức thấp thường được sản xuất bằng kỹ thuật

đúc khuôn, trong khi các máy điện có công suất lớn được sản xuất với thanh rotor bằng đồng. Liên quan đến một số vấn đề công nghệ có thể dẫn đến các phát sinh trong quá trình sản xuất rotor.

Một số lý do chính gây ra lỗi rotor.

- Trong quá trình hàn khi sản xuất, ứng suất mỗi hàn lên bề mặt vật liệu không đồng đều dẫn đến tích hợp vào lồng sóc rotor và những ứng suất này cũng có thể dẫn đến hỏng hóc trong quá trình vận hành.

- Thanh rotor không thể di chuyển theo chiều dọc trong rãnh trên lồng sóc, khi ứng suất nhiệt tác dụng lên nó trong quá trình khởi động.

- Vòng ngắn mạch cuối nặng có thể tạo ra lực ly tâm lớn, điều này có thể gây ra ứng suất nguy hiểm cho các thanh rotor.

Với những nguyên nhân trên, thanh rotor có thể bị hỏng và đồng thời có thể xảy ra tình trạng rotor mất cân bằng. Sự không đối xứng của lồng sóc rotor dẫn đến sự phân bố không đối xứng của dòng điện trên thanh rotor. Từ đó, hư hỏng của một thanh rotor dẫn đến gây ra hư hỏng của thanh xung quanh và tiếp tục lan rộng ra dẫn đến gãy nhiều thanh.

Lỗi lệch tâm:

Máy điện quay có khe hở không khí nhỏ giữa rotor và stator. Từ trường hoạt động trong khe hở không khí tạo ra lực điện từ tác động lên cấu trúc máy. Lý tưởng là độ dày khe hở không khí không đổi dọc theo toàn bộ chu vi và các lực điện từ triệt tiêu lẫn nhau. Trên thực tế chiều dày khe hở không khí không đều dọc theo toàn bộ chu vi do sai lệch hình học của stator và rotor, hay do mòn ở ổ, độ lệch tâm tĩnh hoặc

độ lệch tâm động. Do đó lực điện từ không triệt tiêu lẫn nhau làm sinh ra lực đó được gọi là lực kéo từ không cân bằng (unbalanced magnetic pull UMP). Điều này gây ra sự đẩy nhanh quá trình hư hỏng ổ trục, cọ xát giữa rotor với stator gây ra rung động và tiếng ồn không mong muốn, dẫn đến hỏng động cơ sớm.

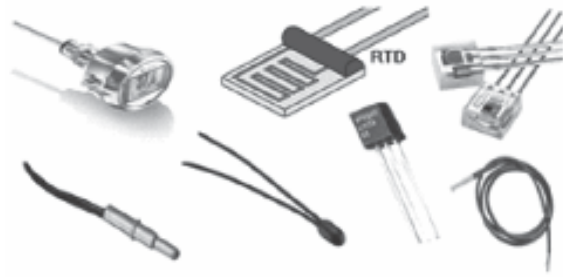
3. GIÁM SÁT TÌNH TRẠNG ĐỘNG CƠ

Có rất nhiều phương pháp đã được sử dụng trong việc theo dõi tình trạng sức khỏe của máy điện công suất lớn, nhưng chung quy lại các kỹ thuật được sử dụng phổ biến nhất được mô tả dưới đây.

Giám sát nhiệt độ:

Giám sát nhiệt độ được thực hiện bằng cách sử dụng các cảm biến để theo dõi tình trạng thiết bị như cuộn dây dẫn stator, ổ trục và chất lỏng làm mát của các máy điện lớn. Các phép đo cho biết các thay đổi tổng thể đang diễn ra trong máy nhưng chúng cực kỳ hiệu quả nếu được gắn và giám sát ở các vị trí được lựa chọn cẩn thận. Khi phép đo nhiệt độ được kết hợp với thông tin về tải và điều kiện môi trường xung quanh của máy, nó cung cấp thông tin giám sát có giá trị. Đối với ổ trục thường nhiệt độ được theo dõi cùng với cảm biến rung động, phép đo nhiệt độ cung cấp cách tiếp cận tiêu chuẩn để đánh giá và ước tính tình trạng của máy. Do đó việc đo nhiệt độ rất quan trọng trong việc giám sát các máy điện và có các phương pháp tiếp cận sau:

- Đo nhiệt độ sử dụng đầu dò nhiệt điện trở (RTD);
- Thermistor;
- Cặp nhiệt điện (Thermocouple T/C);
- Nhiệt kế không tiếp xúc hay nhiệt kế hồng ngoại.



Hình 4: Các đầu dò nhiệt độ

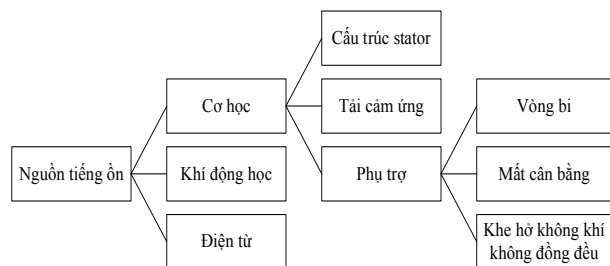
Giám sát tiếng ồn:

Tiếng ồn của máy điện được đặc trưng là một tập hợp các âm thanh do sự thay đổi nhanh chóng của áp suất không khí. Những thay đổi này thường gây ra:

- Rung động của các bộ phận máy hoặc toàn bộ bề mặt thiết bị
- Hiện tượng khí động học dẫn đến xung áp suất gần máy

Nguồn tiếng ồn trong máy điện có thể được chia thành ba loại lớn sau:

- Nguồn cơ học;
- Nguồn khí động học;
- Nguồn điện từ.



Hình 5. Nguồn ồn trong máy điện [5]

Các nguồn cơ học chính của tiếng ồn:

- Căn chỉnh;
- Gia công không chính xác các bộ phận;
- Tốc độ quay;

- Số phần tử lẫn mang tải;
- Tần số cộng hưởng cơ của vòng ngoài;
- Điều kiện bôi trơn;
- Nhiệt độ.

Giám sát rung động:

Giám sát rung động là kỹ thuật theo dõi sức khỏe của động cơ cảm ứng, được sử dụng rộng rãi nhất từ trước đến nay. Để phát hiện các lỗi cơ học như hỏng ổ trục hoặc mất cân bằng cơ học và một bộ chuyển đổi điện áp cung cấp tín hiệu điện áp tỷ lệ với gia tốc thường được sử dụng. Hầu như tất cả các máy điện đều tạo ra tiếng ồn, độ rung và qua đó việc sử dụng rung động để chẩn đoán lỗi trên động cơ. Tiếng ồn và độ rung trong máy điện do các lực có nguồn gốc từ trường, cơ học và khí động học gây ra. Các rung động cũng có thể tạo ra do lỗi giữa các vòng trong cuộn dây, sự mất cân bằng điện áp nguồn cung cấp.

Lực hướng tâm do từ trường khe hở không khí và là nguồn rung và nhiễu lớn nhất trong máy điện. Vì sự phân bố mật độ từ thông trong khe hở không khí là sản phẩm của sóng lực từ động và sóng từ tĩnh. Kết quả lực từ động cũng chứa sự ảnh hưởng do không đối xứng của rotor hoặc stator. Sóng từ tĩnh cũng phụ thuộc vào sự thay đổi của khe hở không khí, lực từ và dao động cũng phụ thuộc vào sự bất đối xứng này. Do đó chúng ta có thể nói rằng phương pháp giám sát rung động là phương pháp phù hợp nhất để phát hiện các lỗi cơ khí như lỗi ổ trục, lệch tâm rotor, lỗi bánh răng và rotor không cân bằng [1].

Giám sát dòng điện:

Giám sát và phân tích tín hiệu dòng điện động cơ (MCSA) là một kỹ thuật được sử dụng tại nhà máy Đạm Cà Mau để xác định điều kiện

hoạt động của động cơ mà không làm gián đoạn quá trình sản xuất thông qua việc chẩn đoán cho từng phân vùng cụ thể liên quan đến stator, rotor, cách điện, air gap, chất lượng điện năng, mạch điện... để ngăn ngừa và phát hiện sớm những hư hỏng của motor trong tương lai.

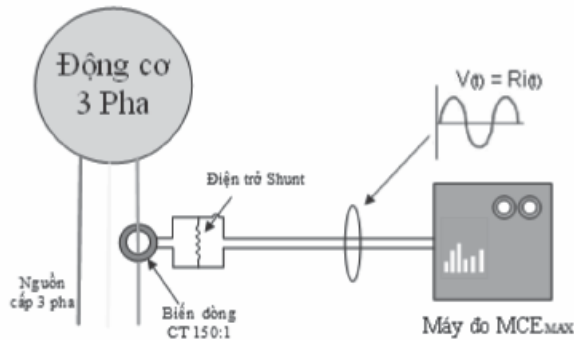
Đối với máy điện khi có dao động cơ học tăng thì dẫn đến độ lớn của các thành phần hài dòng điện stator tương ứng cũng tăng lên. Điều này là do rung động cơ học điều chỉnh khe hở không khí ở tần số cụ thể giữa stator và rotor. Các thành phần tần số này sau đó hiển thị trong điện cảm của stator và cuối cùng là trong dòng điện của stator.

Phân tích tín hiệu dòng điện stator nhằm phát hiện những thay đổi về độ từ thẩm trong máy thông qua việc kiểm tra các tín hiệu dòng điện. Phương pháp phân tích là sử dụng phổ dòng điện của máy để xác định các tần số lỗi đặc trưng. Các tần số lỗi xảy ra trong phổ dòng điện của động cơ là duy nhất đối với các lỗi động cơ khác nhau.

4. ỨNG DỤNG MCSA ĐÁNH GIÁ LỖI LỆCH TÂM

Phân tích tín hiệu dòng điện động cơ (MCSA) là kỹ thuật được sử dụng để phân tích và theo dõi xu hướng thay đổi của động cơ trong quá trình vận hành. Một hệ thống thiết bị đánh giá phân tích cơ bản bao gồm những chi tiết sau:

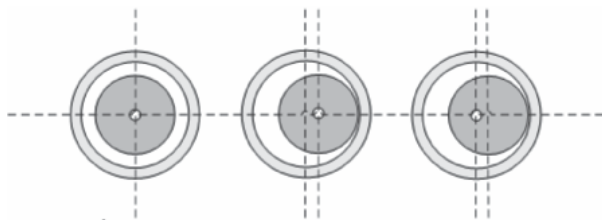
- Máy biến dòng (CT) để ghi nhận tín hiệu;
- Điện trở shunt lắp bên trong đầu ra của CT;
- Máy đo MCEmax để đánh giá phổ tần số dòng điện.



Hình 6: Sơ đồ kết nối máy đo MCEmax

Độ lệch tâm khe hở không khí:

Độ lệch tâm trong khe hở không khí của động cơ được thể hiện khi khoảng cách của khe hở không khí giữa rotor và stator không đồng đều. Trong máy điện tồn tại hai loại lệch tâm: Lệch tâm tĩnh và lệch tâm động. Trong trường hợp lệch tâm tĩnh, vị trí của khe hở không khí hướng tâm nhỏ nhất được cố định, trong khi đó trường hợp lệch tâm động vị trí của khe hở không khí nhỏ nhất phụ thuộc vào sự quay của rotor. Trạng thái đồng tâm, lệch tâm tĩnh và động được minh họa trong hình bên dưới.



a) Đồng tâm; b) Lệch tâm tĩnh; c) Lệch tâm động
Hình 7: a) Đồng tâm; b) Lệch tâm tĩnh;
c) Lệch tâm động [6,7]

Khi lệch tâm các thanh rotor kéo lại hoặc tiếp cận gần từ trường của stator, chúng gây ra sự thay đổi dòng điện trong stator. Trong trường hợp tĩnh các thành phần của dãy biên lệch tâm xuất hiện ở các tần số được xác định bởi phương trình (1) và được minh họa trong hình 8.

$$f_{ec} = f_g \left[(R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] \quad (1)$$

Trong đó:

f_{ec} : Tần số lệch tâm (Hz);

f_g : Tần số lưới điện (Hz);

R : Số thanh bar rotor;

s : Độ trượt;

P : Số cặp cực;

n_d = Số nguyên độ lệch tâm động bậc nhất = ± 1 ;

n_{ws} = Số nguyên miền thời gian cơ bản của lực từ động ($n_{ws} = +1$) và hài bậc lẻ 3, 5, 7...

Công thức tính hệ số trượt:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2)$$

N_r : Tốc độ rotor (v/p);

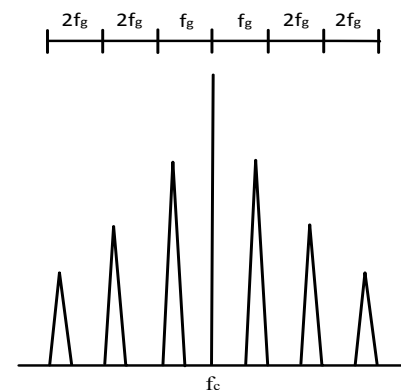
N_s : Tốc độ từ trường quay (tốc độ đồng bộ) (v/p).

Tần số tâm f_c trong hình 8 và 9 được xác định bởi:

$$f_c = R F_{shaft} \quad (3)$$

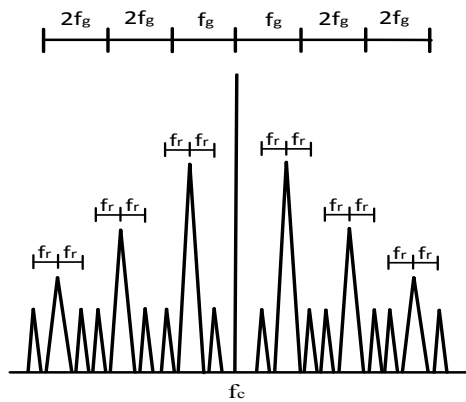
$$F_{shaft} = \frac{RPM \text{ (Tốc độ trên trục)}}{60}$$

Tần số trục (Hz)



Hình 8. Khe hở không khí – lệch tâm tĩnh

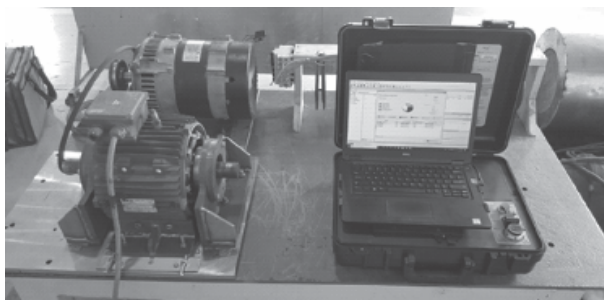
Khi có độ lệch tâm động các thành phần tần số từ độ lệch tâm tĩnh được điều chế thêm với tần số quay của rotor $f_r = f_g \frac{(1-s)}{p}$ như thể hiện trong hình 9 [8].



Hình 9. Khe hở không khí – Lệch tâm động.

Kết quả thực nghiệm trên mô hình với độ lệch tâm tĩnh:

Để đánh giá cũng như chẩn đoán tình trạng hoạt động của các động cơ cảm ứng tại Nhà máy Đạm Cà Mau được hiệu quả với độ chính xác cao, một mô hình với các thiết bị đánh giá được lắp đặt như hình 10. Bao gồm một động cơ cảm ứng ba pha rotor lồng sóc được kết nối với tải máy phát một pha qua puli dây đai, máy đo MCEmax để thu thập dữ liệu. Thông số định mức động cơ cảm ứng ba pha rotor lồng sóc được thử nghiệm: 5.5kW, 400V, 11.03A, 1450 v/p. Các thông số chi tiết của động cơ được cho trong Bảng 1.

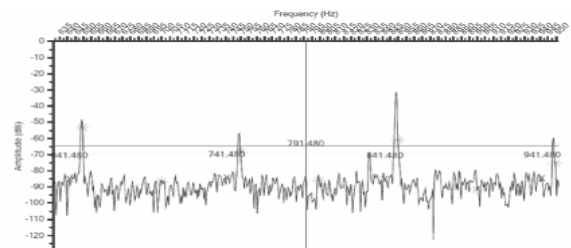


Hình 10. Mô hình thực nghiệm đánh giá lỗi lệch tâm

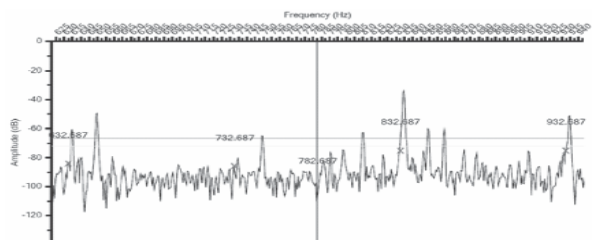
Thiết bị thu thập dữ liệu MCEmax được kết nối với mạch điện đấu vào động cơ cảm ứng ba pha rotor lồng sóc thông qua dây tín hiệu dòng điện với các biến dòng tỉ số 150:1. Động cơ ba pha với bộ phận vỏ startor được lắp đặt rời với gối đỡ hai đầu, 2 bu lông bên chân đế để giúp định vị stator và thiết lập khe hở không khí giữa rotor và stator trong quá trình thử nghiệm, các bộ phận thứ cấp khác như ampe kim (0 - 1000A), máy đo tốc độ, tải điện trở.

Bảng 1. Thông số của động cơ 3 pha:

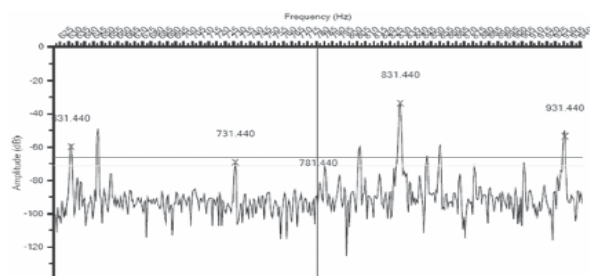
Công suất định mức	5.5 kw
Tần số định mức	50 Hz
Tốc độ định mức	1450 rpm
Điện áp định mức	400 V
Dòng điện định mức	11.03A
Số cặp cực	2
Số rãnh của lõi stator	36
Số rãnh của lõi rotor	32
Đường kính ngoài rotor	135 mm
Đường kính trong stator	136 mm
Chiều dày khe hở không khí	0.5 mm
Cách đấu dây	Δ



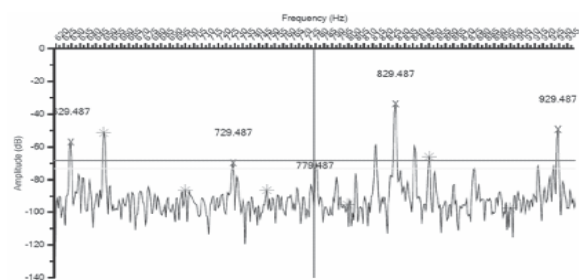
Hình 11. Phổ tần số dòng điện không lệch tâm ở điều kiện không tải



Hình 12. Phổ tần số lệch tâm tĩnh 30% ở điều kiện 50% tải



Hình 13: Phổ tần số lệch tâm tĩnh 30% ở điều kiện 80% tải



Hình 14. Phổ tần số lệch tâm tĩnh 30% ở điều kiện full tải.

➤ Quan sát thấy ở trường hợp lệch tâm 30%, điều kiện tải 50% được thể hiện trong hình 12, biên độ của phổ tần số dòng điện lệch tâm xuất hiện và tăng dần, điều này được thể hiện rõ ở 80%, 100% tải. Các tần số lỗi xuất hiện ở tải 80% tương ứng $n_{ws} = 1, 3$ là 831.44Hz; 731.44Hz; 931.44Hz; 631.44Hz. Khi đầy tải, tần số lỗi xuất hiện ở 829.487Hz; 729.487Hz; 929.487Hz; 629.487Hz. Từ Hình 13 ta thấy rằng biên độ lệch tâm ở tần số 631.44 là -60.44dB trong khi biên độ ở mức đầy tải với tần số 629.487 là -57.60 dB. Nó chỉ ra rằng biên độ của tần số sự cố tăng lên khi tăng tải.

➤ Qua kết quả đánh giá cho thấy dãy biên độ lệch tâm thứ nhất xuất hiện ở +/- 50 Hz so với tần số độ lệch tâm. Dãy biên độ thứ ba xuất hiện ở +/- 150 Hz so với tần số lệch tâm. Các giá trị này dựa trên tần số cơ bản là 50 Hz.

5. KẾT LUẬN

Động cơ điện là một thiết bị rất quan

trọng trong ngành công nghiệp hiện đại ngày nay. Sự cố của động cơ điện sẽ gây ra ngừng hoạt động sản xuất, mất sản lượng, tổn thất lớn về mặt bảo trì và mất doanh thu. Do đó, việc giám sát tình trạng của các động cơ điện công suất lớn tại Nhà máy Đạm Cà Mau là cực kỳ quan trọng đối với việc duy trì tính ổn định và tin cậy cho hệ thống. Hầu hết các lỗi trên động cơ điện cảm ứng đều có những điểm tương đồng ở dạng sóng và hàm lượng hài của dòng điện cung cấp cho động cơ. Nên việc ứng dụng giải pháp phân tích tín hiệu dòng điện để đánh giá và chuẩn đoán lỗi như lệch tâm, thanh rotor bị gãy, hở hoặc ngắn mạch trong cuộn dây là một giải pháp rất hữu ích và góp phần quan trọng vào các công cụ giám sát tình trạng của động cơ tại nhà máy. ❖

Ngày nhận bài: 01/6/2022

Ngày phản biện: 08/6/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Siddiqui, K.M., K. Sahay, and V. Giri, "Health monitoring and fault diagnosis in induction motor-a review," International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 1, January 2014.
- [2]. Seungdeog Choi. "Introduction," in Electric Machines_ Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis, Taylor & Francis Group, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013, pp. 1-7.
- [3]. Özdemir Göl, Andrew Nafalski. "condition monitoring of large electrical machines," Zeszyty Problemowe – Maszynы Elektryczne Nr 77/2007.
- [4]. Swapnali Janrao, and Prof. Mrs. Rupalee Ambekar. "Fault Diagnosis of an Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis," International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 13, Number 12 (2018) pp. 11002-1008, 2018.
- [5]. Praveen Vijayraghavan, IEEE. "Noise in Electric Machines. A Review," IEEE transactions on industry applications, vol. 35, No. 5, september/october 1999.
- [6]. Thomson, William T.; Gilmore, Ronald J. (2003). "Motor Current Signature Analysis To Detect Faults In Induction Motor Drives - Fundamentals, Data Interpretation, And Industrial Case Histories," Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories. Available electronically from <https://hdl.handle.net/1969.1/163283>.
- [7]. Dubravko, Miljković. "Brief review of motor current signature analysis," HDKBR INFO Magazine, Vol. 5, No. 1, 2015.
- [8]. E.L. Bonaldi, Levy Lacerda Oliveira et al. "Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors, Induction Motors – Modeling and Control," InTech, October 2012.