CHẨN ĐOÁN SỰ CỐ TRONG MÁY BIẾN ÁP 3 PHA SỬ DỤNG CÁC TÍN HIỆU DÒNG, ÁP VÀ RUNG ĐỘNG CƠ KHÍ

Đào Duy Yên*, Trần Xuân Minh, Trương Tuấn Anh
Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Hệ thống điện là một hệ thống phức tạp trong cả cấu trúc và vận hành, khi xảy ra sự cố bất kỳ một phần tử nào trong hệ thống đều ảnh hưởng đến độ tin cậy cung cấp điện, chất lượng điện và gây thiệt hại lớn về kinh tế. Vì vậy, việc nhận dạng trạng thái máy biến áp trong quá trình làm việc giúp chuẩn đoán sớm các dạng sự cố trong máy biến áp 3 pha, qua đó giảm bớt những thiệt hại về kinh tế và nâng cao độ tin cậy, chất lượng điện cung cấp cho các hộ tiêu thụ là hết sức cần thiết. Bài báo nghiên cứu chẩn đoán sự cố tiềm ẩn trong máy biến áp phân phối 22/0,4kV bằng cách dùng phần mềm ANSYS để phân tích các mẫu số liệu điện và chuyển vị cơ khí. Thuật toán Levenberg – Marquadrt kết hợp mạng nơ ron MLP được sử dụng để nhận dạng các trạng thái của MBA. Kết quả học của mạng nơ ron đã thành công và nhận dạng được 05 trạng thái sự cố của MBA, bao gồm: Chập 2 vòng dây cuộn cao áp pha B, chập 5%, 10% tổng số vòng dây cuộn cao áp pha B, nới lỏng dây quấn pha B và lỏng bu lông gá các cuộn dây MBA vào xà đỡ. Kết quả nhận dạng đạt độ chính xác 99,8%.

Từ khóa: *Phát hiện sự cố; mô hình máy biến áp; phần mềm ANSYS; chuyển vị rung động; mạng nơron*

Ngày nhận bài: 22/8/2020; Ngày hoàn thiện: 31/8/2020; Ngày đăng: 31/8/2020

IDENTIFYING FAULTS IN 3 PHASE TRANSFORMER USING THE SIGNALS OF CURRENTS, LINE VOLTAGES AND MECHANICAL VIBRATION

Dao Duy Yen*, Tran Xuan Minh, Truong Tuan Anh
TNU - University of Technology

ABSTRACT

The electrical system is a complex system in both structure and operation, where any fault occurs, any element in the system affects power supply reliability, power quality and causes great economic damage. Therefore, the identification of the transformer state in the working process can help us to early diagnose fault patterns in 3-phase transformers, thereby reducing economic losses and improving reliability. The quality of electricity supplied to consumers is essential. This paper deals with identifying faults in 22/0.4kV distribution 3 phase transformers by using the ANSYS software to simulate samples of electrical data and mechanical displacement. The Levenberg - Marquadrt algorithm combined with the MLP neural network was used by the author to identify the MBA states. Neural network learning results have been successful and identified 05 fault states of the MBA, including the short 2 turns of phase B high voltage winding, short 5%, 10% of the total number of phase B high voltage winding, relax phase B windings and loose bolts that attach the MBA coils to the support beam). The identification results have an accuracy of 98.9%.

Keywords: *Fault detection; transformer model; ansys software; mechanical vibration; neural network*

Received: 22/8/2020; Revised: 31/8/2020; Published: 31/8/2020

* Corresponding author. *Email: daoduyyen88@gmail.com*

1. Giới thiệu

Hiện nay có rất nhiều giải pháp nhận dạng trạng thái của máy biến áp (MBA) như:

- Sử dụng tín hiệu điện đầu vào và ra của MBA [1]-[3].

- Đo phóng điện cục bộ trong MBA (PD) [4], [5].

- Phân tích đáp ứng tần số quét (FRA) [6], [7].

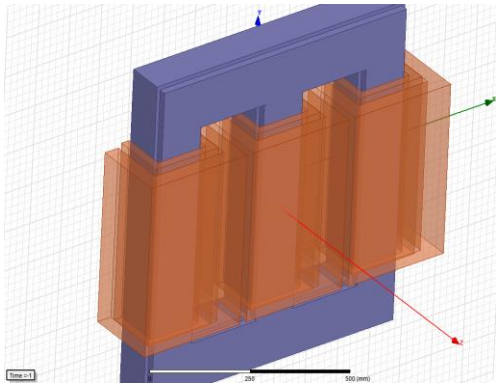
Phương pháp sử dụng tín hiệu điện đầu vào và ra của MBA giúp ta so sánh được sự khác nhau của các tín hiệu điện khi MBA làm việc bình thường và khi có sự cố, đây là một kênh tín hiệu để nhận dạng chính xác trạng thái của MBA. Việc kết hợp lấy các tín hiệu điện và tín hiệu rung động cơ khí sẽ cho ta một bộ mẫu số liệu hoàn chỉnh và tin cậy kết hợp với mạng nơ-ron MLP [8] để học và nhận dạng trạng thái làm việc của MBA một cách chính xác nhất. Bài báo sẽ tập trung nghiên cứu phương pháp sử dụng các tín hiệu điện và cơ khí để nhận dạng trạng thái của MBA.

2. Xây dựng mô hình máy biến áp phân phối

Bảng 1. *Các thông số của MBA*

Công suất định mức	400	kVA
Tổ đấu	Y-Y_0-12	
Điện áp sơ cấp	22	kV
Điện áp thứ cấp	0,4	kV
Chiều cao cửa sổ	530	mm
Chiều rộng cửa sổ	302	mm
Chiều rộng chân lớp 1	140	mm
Chiều rộng chân lớp 2	120	mm
Chiều dầy lớp 1	200	mm
Chiều dầy lớp 2	40	mm
Chiều rộng gông lớp 1	140	mm
Chiều rộng gông lớp 2	120	mm
Đường kính trong cuộn hạ áp	150/250	mm
Đường kính ngoài cuộn hạ áp	189/289	mm
Chiều cao cuộn hạ áp	450	mm
Số vòng cuộn hạ áp	22	
Đường kính trong cuộn cao áp	209/309	mm
Đường kính ngoài cuộn cao áp	282/382	mm
Chiều cao cuộn cao áp	430	mm

Trong nội dung bài báo sẽ đi xây dựng mô hình máy biến áp có công suất 400 kVA, tổ đấu dây Y-Y_0, cấp điện áp 22/0,4 kV trong phần mềm ANSYS [9], [10]. Phần mềm ANSYS có khả năng xây dựng được mô hình MBA và mô phỏng lấy được cả tín hiệu điện và tín hiệu rung động cơ khí mà các phần mềm khác như Matlab… chỉ cho ta mô phỏng lấy được tín hiệu điện. Các thông số của máy biến áp cho trong bảng 1.



Hình 1. *Mô hình máy biến áp phân phối có dung lượng 400kVA, điện áp 22/0,4kV*

3. Cơ sở lý thuyết bài toán trường điện từ và rung động cơ khí

Các phương trình của Maxwell đã tổng quát hóa các định luật thực nghiệm được những người đi trước phát hiện ra: chỉnh sửa định luật Ampe (ba phương trình cho ba chiều (x, y, z)), định luật Gauss cho điện tích (một phương trình), mối quan hệ giữa dòng điện tổng và dòng điện dịch (ba phương trình (x, y, z)), mối quan hệ giữa từ trường và thế năng véctơ (ba phương trình (x, y, z)) [9].

Toàn bộ các công thức của Maxwell được viết gọn lại dưới dạng véctor và giải tích như bảng 2 sau đây:

Bảng 2. *Các công thức của Maxwell*

Tên	Dạng vi phân	Dạng tích phân
Định luật Farada	$\vec{\nabla}.E = \frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_c Edl = \frac{d}{dt}\iint_s BdA$
Định luật Ampere	$\vec{\nabla}.H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_c Hdl = \iint_s JdA + \frac{d}{dt}\iint_s DdA$
Định luật Gauss	$\nabla.D = \rho$	$\oiint_s DdA = \iiint_v \rho dV$
Định luật Gauss (Cho từ trường)	$\nabla.B = 0$	$\oiint_s BdA = 0$

3.1. Phương pháp phần tử hữu hạn áp dụng cho bài toán điện từ sử dụng trong phần mềm maxwell

Phương trình điện từ không gian áp dụng cho bài toán điện từ trong Maxwell được viết như công thức (1) sau:

$$\begin{aligned} &\nabla.\vec{H} = \vec{J} \\ &\nabla.\vec{B} = 0 \\ &\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0.\mu_r.H + \mu_0.\vec{M_p} \end{aligned} \quad (1)$$

Trạng thái từ trường biến thiên theo dạng sin 3D áp dụng cho lớp các bài toán về điện từ trường sinh ra bởi các nguồn điện biến thiên điều hòa.

Phương trình biến số không gian tại các nút được xác định bởi công thức (2):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j_{\omega\varepsilon}} \nabla \times H \right) = j_{\omega\mu} H \quad (2)$$

Do nguồn điện biến thiên hoặc sự chuyển động của vật thể. Khi đó hệ phương trình không gian tại nút của các phần tử được xác định bởi công thức (3):

$$\begin{aligned} &\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \\ &\nabla.B = 0 \\ &-\nabla.\left(\varepsilon \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) - \nabla.(\sigma \nabla \Phi) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3.2. Phương pháp tính toán lực điện từ trong phần mềm maxwell

Theo định luật lực điện từ Lorent [10], phần mềm định nghĩa một đại lượng gọi là tenso lực Maxwell bởi công thức (4):

$$\sigma = \begin{bmatrix} H_x \cdot B_x - \frac{|B||H|}{2} & H_x \cdot B_y & H_x \cdot B_z \\ H_y \cdot B_y & H_y \cdot B_y - \frac{|B||H|}{2} & H_y \cdot B_z \\ H_z \cdot B_z & H_z \cdot B_y & H_z \cdot B_z - \frac{|B||H|}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3. Hệ phương trình cơ học trong bài toán phần tử hữu hạn

Lực, chuyển vị, biến dạng và ứng suất.

Có thể chia lực tác dụng ra ba loại và ta biểu diễn chúng dưới dạng véctơ cột:

- Lực thể tích: $f = f\,[\,f_x, f_y, f_z]^T$ (5)
- Lực diện tích: $T = T\,[\,T_x, T_y, T_z]^T$ (6)
- Lực tập trung P_i: $P_i = P_i\,[\,P_x, P_y, P_z]^T$ (7)

Với vật liệu đàn hồi tuyến tính và đẳng hướng, ta có quan hệ giữa ứng suất với biến dạng:

$$\sigma = D\,\varepsilon \quad (8)$$

Trong đó:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}5-\nu \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.4. Phân tích dao động cơ học và độ ồn

Khi nghiên cứu các rung động, ngoài sự dịch chuyển trạng thái x, còn xét tới tốc độ dịch chuyển [4]:

$$\begin{aligned} &v = \frac{dx}{dt} = \omega X_m \cos(\omega t + \varphi) \\ &a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

Trong trường hợp tổng quát, mọi sự chuyển động đều có thể biểu thị dưới dạng chuỗi Fuorie:

$$x(t) = \left[X_n \cos(n\omega t) + Y_m \sin(n\omega t) \right]$$

3.5. Mô hình tính toán dao động bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Xét mô hình phân tích bài toán rung động trong phương pháp phần tử hữu hạn. Ta có phương trình tổng quát như sau [6].:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F^a\} \quad (11)$$

Các thành phần ngoại lực tương ứng được viết dưới dạng công thức:

$$\begin{aligned} &\{F\} = \left\{ F_{\max} e^{i\psi} \right\} e^{i\Omega t} \\ &\{F\} = \left\{ F_{\max} \left(\cos\psi + i \sin\psi \right) \right\} e^{i\Omega t} \\ &\{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\Omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

Khi đó hệ phương trình động lực học được viết cho bài toán dao động như công thức sau:

$$(-\Omega^2[M] + i\Omega[C] + [K])(\{U_1\} + i\{U_2\}) e^{i\Omega t} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\Omega t} \quad (13)$$

4. Các trường hợp mô phỏng

Tác giả thực hiện mô phỏng lấy số liệu trong 6 trường hợp làm việc của MBA trong các chế độ 50%; 80%; 100% tải. Các trường hợp hoạt động: có 1 trường hợp MBA làm việc bình thường và 5 trường hợp sự cố là:

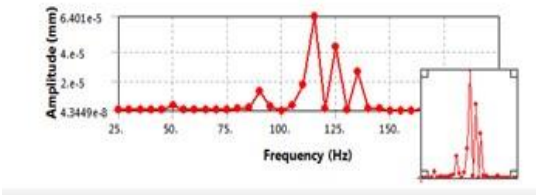
- Bình thường;

- Sự cố ngắn mạch hai vòng dây cao áp;
- Sự cố nới lỏng vòng dây 2 cuộn dây cao áp;
- Sự cố lỏng bu-lông gá cuộn dây;
- Sự cố ngắn mạch chập 5% tổng số vòng dây cao áp;
- Sự cố chập 10% tổng số vòng dây cao áp.

Tổng hợp lại sẽ có 12 bộ kết quả, ký hiệu từ A-1 (các giá trị tức thời của lực hướng trục và hướng kính tác dụng lên cuộn dây và lõi MBA trong trường hợp bình thường) cho tới F-3 (phổ biên độ rung động của vỏ MBA theo ba hướng x, y và z trong trường hợp sự cố chập 10% tổng số vòng dây cao áp.

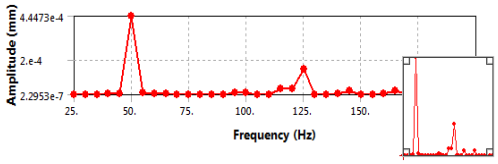
5. Các mẫu số liệu mô phỏng bằng phần mềm Ansys

Trường hợp MBA hoạt động bình thường, tải 50% (trường hợp A-1):



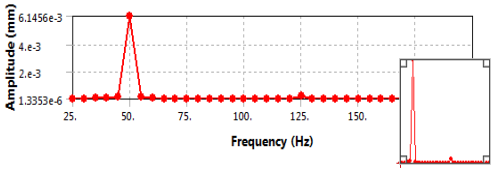
Hình 2. *Đồ thị Chuyển vị theo phương x của vỏ máy biến áp*

Biên độ lớn nhất đạt $6,401 \cdot 10^{-5} mm$ ứng với tần số 115Hz.



Hình 3. *Đồ thị Chuyển vị theo phương y của vỏ máy biến áp*

Biên độ chuyển vị theo phương y lớn nhất đạt $4,4473 \cdot 10^{-4} mm$ ứng với tần số 50Hz.



Hình 4. *Đồ thị Chuyển vị theo phương z của vỏ máy biến áp*

Biên độ chuyển vị theo phương y lớn nhất đạt $6,1456.10^{-3}$mm ứng với tần số 50Hz.

6. Ứng dụng mạng MLP trong phân loại các tín hiệu điện - cơ của máy biến áp

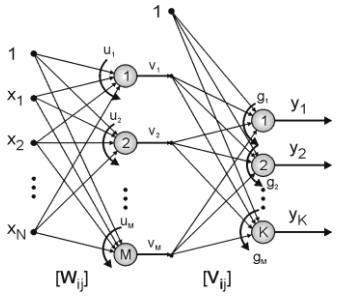
6.1. Mạng Nơrôn MLP

Từ các nơrôn McCulloch - Pitts có thể phát triển thành mạng MLP (MultiLayer Perceptron) là một mạng truyền thẳng:

• Các nơrôn được sắp xếp thành các lớp (layer), mạng gồm một lớp các kênh tín hiệu đầu vào (input layer), một lớp các kênh tín hiệu đầu ra (output layer), và có thể gồm một số lớp trung gian gọi chung là các lớp ẩn (hidden layers);

• Giữa hai lớp liên tiếp có các ghép nối từ các nơrôn của lớp trước tới các nơrôn của lớp sau hướng từ đầu vào đến đầu ra (mạng truyền thẳng) [7], [8].;

• Các nơrôn trên cùng một lớp sẽ có cùng hàm truyền đạt.



Hình 5. *Mô hình mạng MLP với 1 lớp ẩn*

6.2. Quá trình học của mạng Nơrôn MLP

Mạng MLP với cấu trúc như trên hình 5 được sử dụng rộng rãi trong việc tái tạo các ánh xạ vào - ra được xác định từ các bộ số liệu mẫu. Mạng MLP được xây dựng và xác định theo thuật toán học có giám sát. Với bộ số liệu mẫu là một tập hợp gồm p các cặp mẫu được cho ở dạng véctơ đầu vào - véctơ đầu ra tương ứng $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{d}_i\}$ với $i = 1,..., p$, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^N; \mathbf{d}_i \in \mathbb{R}^K$ ta cần xác định một mạng MLP (bao gồm việc xác định được các thông số cấu trúc và các trọng số ghép nối tương ứng với cấu trúc đã lựa chọn) sao cho khi đưa véctơ $\mathbf{x}_i$ vào mạng MLP, thì đầu ra của mạng sẽ xấp xỉ giá trị đích đã có: $\forall i : MLP(\mathbf{x}_i) \approx \mathbf{d}_i$.

hoặc sai số tổng cộng trên các mẫu tiến tới một giá trị cực tiểu nào đó hoặc nhỏ hơn một ngưỡng chọn trước $\varepsilon > 0$ nào đó:

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{p}\left\|MLP(\mathbf{x}_i) - \mathbf{d}_i\right\|^2 \to \min \qquad (14)$$

6.3. Ứng dụng mạng MLP trong phân loại các tín hiệu điện - cơ của máy biến áp

Trong bài báo này, đề xuất chỉ sử dụng các đặc tính liên quan tới rung động của MBA để phân loại trạng thái của MBA được trích xuất từ các tín hiệu đo ở trên như sau:

• Từ phổ tần số của dao động chuyển dịch trên vỏ MBA theo 3 trục: sử dụng giá trị lớn nhất của phổ trên mỗi trục, hay ta có:

$$x_1 = \max_{\omega=25,30,\ldots,200}\left(M_x(\omega)\right);$$

$$x_2 = \max_{\omega=25,30,\ldots,200}\left(M_y(\omega)\right);$$

$$x_3 = \max_{\omega=25,30,\ldots,200}\left(M_z(\omega)\right).$$

• Từ giá trị biến thiên của lực tác dụng theo 3 trục: sử dụng giá trị lớn nhất của lực trên mỗi trục, lựa chọn búi dây pha B, phía cao áp (là pha được sử dụng trong mô phỏng là pha xảy ra sự cố), hay ta có:

$$x_4 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_x(t)\right);$$

$$x_5 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_y(t)\right);$$

$$x_6 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_z(t)\right);$$

$$x_7 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_x(t)\right);$$

$$x_8 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_y(t)\right);$$

$$x_9 = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_z(t)\right);$$

$$x_{10} = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_{cx}(t)\right);$$

$$x_{11} = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_{cy}(t)\right);$$

$$x_{12} = \max_{t\in[0,100ms]}\left(F_{cz}(t)\right);$$

$$x_{13} = \max_{t\in[0,100ms]}\left(I_H(t)\right);$$

$$x_{14} = \max_{t\in[0,100ms]}\left(I_L(t)\right).$$

Như vậy, véctơ đặc tính đầu vào gồm tối đa 14 thành phần. Đầu ra của hệ nhận dạng là mã trạng thái của máy biến áp, bao gồm 6 trạng thái cơ bản:

• MBA ở chế độ bình thường;

• MBA bị lỏng ốc bu lông gá cuộn dây;

• MBA có vòng dây bị nới lỏng quanh trụ;

• MBA bị chập 2 vòng dây liền nhau (tại cuộn dây pha B, phía cao áp);

• MBA bị chập 5% số vòng dây liền nhau (tại cuộn dây pha B, phía cao áp);

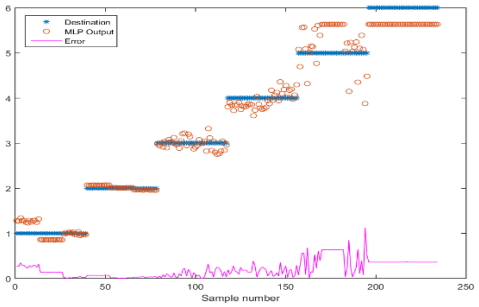
• MBA bị chập 10% số vòng dây liền nhau (tại cuộn dây pha B, phía cao áp).

Số nơ-rôn ẩn sẽ được lựa chọn bằng thực nghiệm để có được số lượng nơ-rôn ít nhất nhưng vẫn đảm bảo học thành công các mẫu số liệu. Thực tế cho thấy số lượng này không lớn (dao động từ 3 đến 6 nơ-rôn ẩn) nên bài báo lựa chọn là thử nghiệm trực tiếp, tăng dần số lượng nơ-rôn ẩn sử dụng (bắt đầu từ 1) cho đến khi đạt được sai số nhỏ.

Chương trình mô phỏng sử dụng thuật toán học Levenberg - Marquadrt và thư viện hỗ trợ Neural Network Toolbox trong Matlab.

Kết quả thử nghiệm với số nơ-rôn ẩn tăng dần như sau:

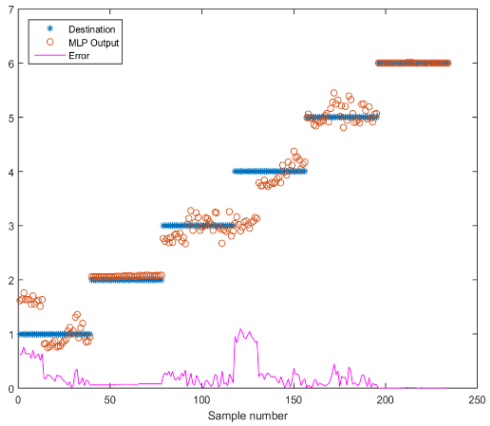
• Với 1 nơ-rôn ẩn:



Hình 6. *Kết quả thử nghiệm với 1 nơ-rôn ẩn*

Kết quả học cho thấy mạng có cấu trúc đơn giản (14 đầu vào, 1 nơ-rôn ẩn, 1 đầu ra) nên chưa học thành công được các mẫu, nên còn nhiều trường hợp lỗi. Trong đó toàn bộ các mẫu thuộc trường hợp 5 và 6 đều học không thành công.

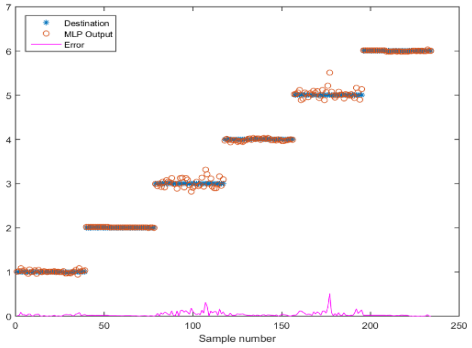
• Với 2 nơ-rôn ẩn:



Hình 7. *Kết quả thử nghiệm với 2 nơ-rôn ẩn*

Kết quả học cho thấy mạng vẫn có cấu trúc quá đơn giản (6 đầu vào, 2 nơ-rôn ẩn, 1 đầu ra) nên vẫn chưa học thành công được các mẫu, tuy nhiên số lượng sai sót ít hơn so với trường hợp 1 lớp ẩn. Còn 1 trường hợp (mẫu số 4) bị nhầm từ dạng 2 sang dạng 3, 1 mẫu (số 17) bị nhầm từ dạng 6 sang dạng 5.

• Với 3 nơ-rôn ẩn:



Hình 8. *Kết quả thử nghiệm với 3 nơ-rôn ẩn*

Kết quả học cho thấy mạng đã học thành công được tất cả các mẫu, tất cả các trường hợp đều có sai số nhỏ (nhỏ hơn ngưỡng 0,5).

7. Một số kết luận và hướng phát triển

Bài báo đã trình bày về các trạng thái của MBA được mô phỏng và đánh giá gồm: 1 trạng thái làm việc bình thường và 5 trạng thái sự cố. Với mỗi trạng thái, MBA được mô phỏng với tải biến thiên từ 50% đến 100% định mức, các tín hiệu thu thập về gồm dòng điện phía sơ cấp và thứ cấp, lực tác dụng lên búi dây (đã phân tách theo các trục x, y và z), chuyển dịch theo các trục x, y và z tại điểm đầu mút của cánh tản nhiệt. Trên cơ sở các số liệu mô phỏng này, đối với mỗi trạng thái, một véctơ 14 thành phần đặc tính được trích xuất để làm cơ sở nhận dạng trạng thái, đó là: 03 biên độ của thành phần tần số của chuyển dịch lớn nhất theo các trục; 09 biên độ lớn nhất của lực tác dụng theo 3 trục; 02 biên độ lớn nhất dòng các phía. Mô hình phi tuyến để xử lý véctơ đặc tính là mạng nơ-rôn MLP. Với 1 lớp ẩn và 3 nơ-rôn ẩn, mạng đã học thành công 100% các mẫu học.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu có thể bao gồm 2 hướng chính:

1. Bổ sung thêm các mẫu học phong phú để nâng cao độ tin cậy của các thuật toán nhận dạng và xử lý tín hiệu;

2. Khảo sát khả năng triển khai thực tế thiết bị cho các giải pháp lý thuyết đã đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1]. T. T. Pham, *Power Transformer Design*. Scientific and Technics Publishing House, 2005.

[2]. Department of Electrical Machines and Tools, *Transformer Design*. Lecture notes, Hanoi university of science and technology, 1967.

[3]. S. Brahma, "Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1325-1331, 2005.

[4]. M. Djuric, Z. Radojevic, and V. Terzija, "Distance protection and fault location utilizing only phase current phasors," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1020-1026, 1998.

[5]. J.-A. Jiang, J.-Z. Yang, Y.-H. Lin, C.-W. Liu, and J.-C. Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines Part I: Theory and algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 486-493, 2000.

[6]. A. Girgis, D. Hart, and W. Peterson, "A new fault location technique for two- and three-terminal lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 98-107, 1992.

[7]. A. Gopalakrishnan, D. Hamai, M. Kezunovic, and S. McKenna, "Fault location using the distributed parameter transmission line model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1169-1174, 2000.

[8]. Y. Lin, C. Liu, and C. Chen, "A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination-part I: theory and algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1587-1593, 2001.

[9]. S. Brahma, and A. Girgis, "Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1619-1622, 2004.

[10]. P. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, "Power quality analysis using S-transform," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 406-411, 2003.