

# Các chỉ số đánh giá để xác định các mạng nơ ron hướng thẳng tối ưu trong chẩn đoán lỗi máy biến áp điện lực ngâm dầu sử dụng phân tích khí hòa tan

*Vi Văn Đạt*

*Đại học Bách Khoa Hà Nội \**

*E-mail tác giả liên hệ: dat.vv202090@sis.hust.edu.vn*

## Tóm tắt

Tình trạng của máy biến áp điện ngâm dầu có thể được đánh giá bằng cách sử dụng phân tích khí hòa tan. Các loại sự cố bất thường xảy ra trong biến áp cũng có thể được phát hiện với sự trợ giúp của phân tích khí hòa tan (DGA). Ngày nay, học máy được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống chẩn đoán lỗi khác nhau cho máy điện, bao gồm cả máy biến áp điện. Trong học máy, mạng nơ ron hướng thẳng là công cụ phổ biến nhất cho các bài toán phân loại. Tuy nhiên, mạng nơ ron hướng thẳng nên được phát triển với kiến trúc tối ưu, chẳng hạn như số lượng nút ẩn tối ưu. Trong nghiên cứu này, các chỉ số đánh giá cho các bài toán phân loại nhiều lớp bao gồm độ chính xác, độ nhạy, độ đặc hiệu và đường cong ROC được sử dụng để so sánh và xếp hạng các mạng nơ ron hướng thẳng khác nhau được sử dụng để phân loại dữ liệu DGA. Số lượng nút đầu vào của mạng nơ ron hướng thẳng phụ thuộc vào các tỷ lệ của khí hòa tan bao gồm tỷ lệ Doernenburg, tỷ lệ Rogers và tỷ lệ IEC.

**Từ khóa:** Máy biến áp điện ngâm dầu, chẩn đoán lỗi, phân tích khí hòa tan, phân loại mạng nơ-ron tiếp liệu, chỉ số đánh giá.

## 1. Giới thiệu

Máy biến áp điện ngâm dầu là một thiết bị không thể thiếu trong hệ thống truyền tải và phân phối điện, được sử dụng để biến đổi điện áp giữa các mức khác nhau. Đặc trưng của máy biến áp ngâm dầu là các cuộn dây được ngâm trong dầu cách điện nhằm mục đích cách điện và làm mát cho thiết bị bên trong nó. Để đảm bảo hoạt động hiệu quả và an toàn cho hệ thống, việc chuẩn đoán lỗi và giám sát sự cố của máy biến áp rất quan trọng. Trong quá trình vận hành, các hiện tượng phóng điện và hiện tượng quá nhiệt sẽ làm cho dầu máy biến áp bị phân ly hình thành một số khí. Việc phân tích các khí có thể phát hiện ra các lỗi thường gặp trên máy biến áp, giúp kịp thời khắc phục và giảm thiểu sự ảnh hưởng tới quá trình vận hành. Bằng phương pháp phân tích khí hòa tan (Dissolved Gas Analysis - DGA) có thể giúp chúng ta dễ dàng phát hiện ra lỗi và đó cũng là phương pháp phổ biến nhất hiện nay.

Phân tích khí hòa tan là một kỹ thuật phân tích phổ biến được sử dụng để giám sát và chuẩn đoán lỗi thông qua sự phân hủy và lão hóa của dầu cách điện thông qua phân tích thành phần khí có trong dầu. Các khí đặc trưng cho phương pháp này đó

là khí metan  $\text{CH}_4$ , etilen  $\text{C}_2\text{H}_4$ , axetilen  $\text{C}_2\text{H}_2$ , etan  $\text{C}_2\text{H}_6$  và cả khí  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  khi sử dụng cách điện giấy. Sự phát triển của công nghệ thông tin cũng như học máy đã hỗ trợ việc ứng dụng các phương pháp tự động hóa trong chuẩn đoán lỗi máy biến áp điện. Trong các phương pháp học máy, mạng nơ-ron hướng thẳng đã được sử dụng rộng rãi và cho kết quả tốt cho bài toán phân loại và dự đoán các sự cố của máy biến áp dựa trên việc phân tích khí hòa tan làm đầu vào của mạng nơ-ron.

Tuy nhiên, để đạt được hiệu suất tối ưu khi áp dụng mạng nơ ron hướng thẳng trong chẩn đoán sự cố máy biến áp, việc xác định các thông số tối ưu của mạng như số lớp ẩn, số lượng nút ẩn là vô cùng quan trọng. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiếp cận vấn đề này bằng cách đề xuất và đánh giá các chỉ số đánh giá phù hợp để xác định các mạng nơ ron hướng thẳng tối ưu nhất cho việc phân loại dữ liệu DGA của máy biến áp điện.

## 2. Dầu máy biến áp và phương pháp phân tích khí hòa tan

Dầu máy biến áp có hai chức năng chính đó là lấp đầy các lỗ trong vật liệu cách điện giấy, khoảng trống giữa các dây dẫn

của cuộn dây và cuộn dây với vỏ làm nhiệm vụ cách điện và tăng độ bền cách điện. Thứ hai, dầu có nhiệm vụ làm mát do tổn hao công suất từ dây quấn và lõi thép gây ra. Một ứng dụng khác đó là sử dụng để dập tắt hồ quang điện. Dầu máy biến áp có thành phần hóa học là hỗn hợp của các hydro cacbon khác nhau và có màu từ không màu tới màu vàng sẫm. Trong quá trình làm việc lâu dài cùng các hiện tượng phóng điện, sự gia tăng nhiệt độ trên máy biến áp làm cho dầu máy biến áp bị già hóa, các tính chất của dầu bị giảm đi làm cho dầu có màu trở nên sẫm đi [1]. Điều đó làm cho các liên kết trong hydro cacbon bị phá vỡ và hình thành lên một số khí thoát ra từ dầu. Hiện tượng này tạo ra các khí hydro (H<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), acetylen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), etylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), và etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) bởi sự phân ly của dầu và khí carbon monoxide(CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) tạo ra bởi sự phân ly của giấy.

Việc phân tích các khí này thông qua phương pháp phân tích khí hòa tan DGA( Dissolved Gas Analysis) giúp đánh giá tình trạng của máy biến áp và đưa ra các biện pháp bảo dưỡng hoặc sửa chữa khi cần thiết, nhằm đảm bảo hoạt động an toàn và hiệu quả của hệ thống điện. Thông qua việc phân tích khí hòa tan trong dầu có thể phân loại ra các lỗi sau :

Kiểu lỗi	Mã
Phóng điện cục bộ	PD
Phóng điện năng lượng thấp	D1
Phóng điện năng lượng cao	D2
Các lỗi nhiệt T<300oC	T1
Các lỗi nhiệt 300oC<T<700oC	T2
Các lỗi nhiệt T>700oC	T3
Hỗn hợp của các lỗi điện và nhiệt	DT

Bảng 1. Các kiểu lỗi và mã lỗi trong phân tích khí hòa tan.

Tỷ lệ phần trăm các khí này có trong dầu thường rất nhỏ, chúng chỉ chiếm vài phần triệu ppm. Khi máy biến áp gặp sự

cố thì lượng khí hòa tan này tăng lên đến hàng trăm hoặc hàng nghìn phần triệu. Việc đo lường khí hòa tan thường khó có thể xác định được các sự cố này. Do đó, từ các thông tin từ dữ liệu DGA chúng ta có thể sử dụng tỷ lệ độ lớn của nồng độ DGA, thay vì sử dụng giá trị tuyệt đối của chúng. Một phương pháp hiệu quả có thể được sử dụng đó là định lại tỷ lệ dữ liệu bằng cách sử dụng logarith cơ số 10. Tiếp tục, chúng ta cần chuẩn hóa dữ liệu bằng cách thay đổi tỷ lệ dữ liệu đầu vào để nó có giá trị trong phạm vi từ 0 đến 1:

$$y_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$$

## 2.1 Phương pháp tỷ lệ Dornenburg

Phương pháp này sử dụng bốn tỉ lệ khí khác nhau bao gồm CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> và C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> để làm đầu vào. Dựa vào các phạm vi tỉ lệ khí này, nó chẩn đoán các lỗi khác nhau như sự cố về nhiệt, sự cố phóng điện cục bộ và sự cố hồ quang. Bảng xx và bảng xx chỉ ra mức tối thiểu của nồng độ khí cho các khí chính và phân loại lỗi được sử dụng trong phương pháp này. [Link](#)

Bảng 2. Giới hạn tối thiểu nồng độ khí hòa tan cho phương pháp Dornenburg.

Khí	Nồng độ (ppm)
Axetilen( $C_2H_2$ )	35
Etilen( $C_2H_4$ )	50
Ethan( $C_2H_6$ )	65
Hydro( $H_2$ )	100
Metan( $CH_4$ )	120
Carbon monoxide( $CO$ )	350

Bảng 3. Tỷ lệ các khí trong phương pháp Dornenburg

Đề xuất lỗi	$R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R_3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$	$R_4 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Phân hủy nhiệt	> 1.0	< 0.75	< 0.3	> 0.4
Phóng điện cục bộ	< 0.1	Không đáng kể	< 0.3	> 0.4
Hồ quang	> 0.1 - < 1.0	> 0.75	> 0.3	< 0.4

### 2.2 Phương pháp tỷ lệ Rogers

Phương pháp này giống với phương pháp tỷ lệ Dornenburg tuy nhiên nó sử dụng các tỷ lệ khác đó là C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> và CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> để làm đầu vào. Phương

pháp này có thể chuẩn đoán các lỗi như các lỗi phóng điện, các lỗi liên quan đến nhiệt. Bảng xx chỉ ra giới hạn các lỗi cho phương pháp này bằng các tỷ lệ đầu vào trên

Bảng 4. Tỷ lệ các khí trong phương pháp Rogers.

Đề xuất lỗi	$R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Bình thường	> 0.1 - < 1.0	< 0.1	< 1.0
Phóng điện cục bộ	< 0.1	< 0.1	< 1.0
Phóng điện năng lượng cao	0.1 - 1.0	0.1-3.0	>3.0
Lỗi nhiệt độ thấp	> 0.1 - < 1.0	< 0.1	1.0 - 3.0
Lỗi nhiệt <700oC	> 1.0	< 0.1	1.0 - 3.0
Lỗi nhiệt >700oC	> 1.0	< 0.1	>3.0

### 2.3 Phân tích tỷ lệ IEC

Phương pháp này được sử dụng rộng rãi trong việc chuẩn đoán lỗi máy biến áp bằng cách sử dụng ba tỷ lệ của các khí chính trong DGA. Bảng xx thể hiện các tỷ lệ, giới hạn và các loại lỗi thường gặp trong máy biến áp điện. Mặc dù sử dụng ít tỷ lệ hơn phương pháp Rogers nhưng phương pháp này chủ yếu dùng để phân loại lỗi theo các gốc TH, DA và PD.

### 2. Mạng nơ ron hướng thẳng

Trong mạng nơ ron hướng thẳng, dữ liệu được di chuyển từ lớp đầu vào qua các lớp ẩn để đến lớp đầu ra. Mục đích của quá trình huấn luyện mạng nơron là để thu được giá trị của các trọng số và độ lệch thích hợp dựa trên dữ liệu đầu vào.

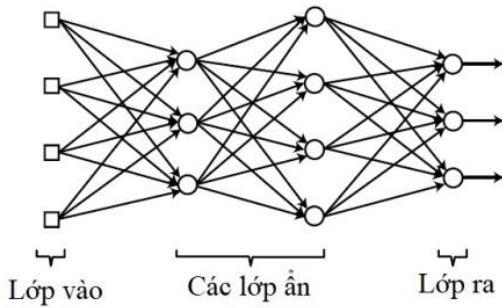
Trong mạng nơron nhân tạo, thành phần cơ bản là các nơron nhân tạo hay còn gọi là các nút. Nguyên tắc xử lý thông tin

của mạng nơron nhân tạo dựa trên sự kết nối của các nút với nhau. Mô hình toán học của một nút được thể hiện với các tín hiệu đầu vào  $[x_1, x_2, \dots, x_N]$  và các trọng số tương ứng là

$[w_1, w_2, \dots, w_N]$ ,  $b$  là độ lệch và  $y$  là đầu ra của nút.

Một mạng nơ ron nhân tạo là một mạng của các nút. Lớp ngoài cùng bên trái được gọi là lớp đầu vào (input layer) và lớp ngoài cùng bên phải được gọi là lớp đầu ra (output layer). Giữa lớp đầu vào và lớp đầu ra là các lớp ẩn (hidden layers). Độ phức tạp của mạng nơ ron phụ thuộc vào số lượng lớp ẩn

và số lượng nút của các lớp ẩn.



Hình 1.5. Cấu trúc lớp của các nút.

Mạng này sử dụng vector của đầu vào thực  $x$  và để tính kích hoạt của các nút như sau:

$$a = \sum_{i=1}^d wx + b, \text{ với } d \text{ là số nút đầu vào}$$

Đầu ra của nút ẩn được tính theo công thức  $y = f(a)$  với  $f(a)$  là một hàm kích hoạt có dạng phi tuyến tính, điển hình như hàm sigmoid, hàm tanh, ReLU, Leaky ReLU,...

Đối với các bài toán phân loại nhiều hơn hai nhóm, hàm kích hoạt đầu ra là hàm ‘softmax’ có dạng:

$$f(a_i) = \frac{\exp(a_i)}{\sum_i \exp(a_i)}$$

Ở nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng các tỷ lệ của khí hòa tan dựa trên phân tích mẫu dầu DGA làm đầu vào cho mạng nơron và với mỗi đầu vào sẽ có một đầu ra tương ứng. Trong mạng này hàm *tanh* được sử dụng để làm các kích hoạt nút của lớp ẩn và hàm softmax để làm kích hoạt đầu ra. Hơn nữa, mạng này có hai lớp ẩn, với mỗi lớp ẩn có 3 nút ẩn, *số lượng lớp ẩn tối ưu đã được trình bày tại nghiên cứu*. Hình xx trên cũng thể hiện rõ mô hình chúng tôi sẽ sử dụng trong bài báo cáo này.

### 3. 1 Thuật toán lan truyền ngược

Lan truyền ngược (Back propagation) là một trong các phương pháp để có thể huấn luyện mạng nơron nhân tạo. Dựa

trên độ sai lệch giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế, quá trình này được thực hiện theo chiều ngược từ lớp đầu ra về lớp đầu vào của mạng. Quá trình này gồm hai giai đoạn:

- . Lan truyền: tính toán đầu ra dựa trên giá trị đầu vào và sai lệch của mạng
- . Cập nhật trọng số thông qua giá trị sai lệch và tốc độ học.

Đối với bài toán phân loại có nhiều hơn hai nhóm, hàm sai số dữ liệu là hàm “entropy” có dạng như sau:

$$E_D(w) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^C t_k^n \ln(z_k^n)$$

Ở đây,  $z_k^n$  là đầu ra thứ k của mạng ứng với mẫu dữ liệu huấn luyện thứ n,  $t_k^n$  là đầu ra mong muốn (mục tiêu) ứng với đầu ra thứ k và mẫu dữ liệu huấn luyện thứ n.

Mục tiêu của quá trình này là cực tiểu hóa hàm sai số kết hợp với phương pháp gradient descent để tìm ra giá trị cực tiểu. Giá trị cực tiểu nhỏ nhất của hàm cost function được gọi là cực tiểu toàn cục (global minimum), tuy nhiên phương pháp này lại không đảm bảo chắc chắn rằng sẽ tìm ra cực tiểu toàn cục, thay vào đó là các cực tiểu cục bộ (local minima). Đối với phương pháp này cần phải tính đạo hàm riêng của hàm sai số theo trọng số và độ lệch để tìm ra chiều biến thiên của độ dốc hàm sai số.

Sau khi tính đạo hàm riêng của hàm sai số theo từng thành phần thì mạng MLP cập nhật lại các trọng số và độ lệch ở từng bước lan truyền ngược tại các bước lặp như sau:

$$w(m+1) = w(m) - \eta \frac{\partial E}{\partial w(m)}$$

$$b(m+1) = b(m) - \eta \frac{\partial E}{\partial b(m)}$$

với  $\eta$  là tốc độ học và  $m$  là số lần lặp

### 3.2 Xác định đầu vào và đầu ra của mạng MLP

Cơ sở dữ liệu IECTC10 được sử dụng để đào tạo và thử nghiệm cho mạng MLP. Ở đây chủ yếu sử dụng năm khí trong phân tích mẫu dầu DGA: [insert các khí].

Các vector đầu vào của mạng MLP được xây dựng trên các tỷ lệ khí ở trong các kỹ thuật Doernenburg, Roger và IEC đã được nêu ở phần trước. Dữ liệu về các khí được lấy từ ... được thể hiện trong bảng xx. Trong nghiên cứu này, số lượng dữ liệu để huấn luyện là **190 mẫu và 50 mẫu** giành cho việc thử nghiệm của mô hình.

Bảng 5. Bộ dữ liệu DGA

Loại lỗi	Mã lỗi	Số lượng mẫu dữ liệu	
		Tập huấn luyện	Tập thử nghiệm
PD	$[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	21	6
D1	$[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	33	9
D2	$[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$	44	11
T1	$[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]^T$	56	14
T2	$[0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0]^T$	14	4

T3	$[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]^T$	22	6
Tổng		190	50

**Tỷ lệ Doernenburg:** Đầu vào được xác định bởi 4 tỷ lệ dựa trên 5 khí trong phân tích mẫu dầu DGA.

$$[x_{Doernenburg}] = \left[ \frac{CH_4}{H_2} \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \frac{C_2H_2}{CH_4} \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \right]^T$$

**Tỷ lệ Roger:** Đầu vào được xác định bởi 4 tỷ lệ dựa trên 5 khí trong phân tích mẫu dầu DGA.

$$[x_{Roger}] = \left[ \frac{CH_4}{H_2} \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \frac{C_2H_6}{C_2H_4} \right]^T$$

**Tỷ lệ IEC:** Đầu vào dựa trên 3 tỷ lệ với 5 loại khí được sử dụng.

$$[x_{IEC}] = \left[ \frac{CH_4}{H_2} \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \right]^T$$

Các vector đầu ra được mã hóa nhị phân để biểu thị cho lỗi thường gặp trên máy biến áp dầu như trong bảng xx.

### 3.3 Xây dựng và huấn luyện mô hình

#### 4. Phân loại lỗi

Đường cong ROC dùng để xác định ngưỡng và đánh giá mức độ hiệu quả của một phân loại cho bài toán phân loại nhị phân. Trong phân tích ROC, sẽ có bốn trường hợp xảy ra trong kết quả của bộ phân loại: Dương tính thật (True Positive), dương tính giả (False Positive – FP), âm tính thật (True Negative – TN) và âm tính giả (False Negative – FN). Giả sử chúng ta xác định lỗi cho máy biến áp thông qua bộ phân loại và cho ra một trong các kết quả:

1. Nếu là lỗi PD và kết quả đưa ra lỗi PD thì đó được coi là *dương tính thật, TP*
2. Nếu là lỗi PD và kết quả đưa ra là không có lỗi thì đó được coi là *âm tính giả, FN*
3. Nếu không phải lỗi PD và kết quả đưa ra là không phải lỗi PD thì đó được coi là *âm tính thật, TN*
4. Nếu không phải lỗi PD và kết quả đưa ra lại là lỗi PD thì đó được coi là *dương tính giả, FP*

Để đánh giá hiệu suất của bộ phân loại, khái niệm độ chính xác (Accuracy) thường được nhắc đến. Nó được định nghĩa bởi công thức sau :

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Để đánh giá độ hiệu quả của bộ phân loại, người ta thường sử dụng các khái niệm độ nhạy (sensitivity) và đặc trưng (specificity).

Độ nhạy (Sensitivity) là tỷ lệ của số lượng mẫu có lỗi được xác định đúng là có lỗi trên tổng số lượng mẫu có lỗi thực tế.

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}$$

Đặc trưng (Specificity) là tỷ lệ của số lượng mẫu không có lỗi có kết quả là âm tính trên tổng số lượng mẫu không có lỗi.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}$$

Đường cong ROC này được tạo nên bởi hai chỉ số: TPR – True Positive Rate hay còn gọi là recall hoặc sensitivity và FPR – False Positive Rate tương ứng với :

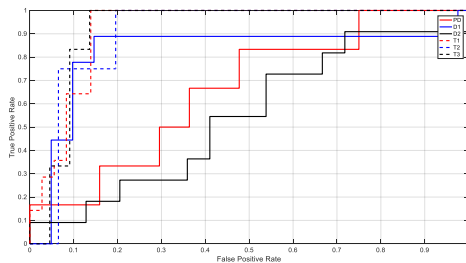
$$TPR = Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{và} \quad FPR = 1 - Specificity = \frac{FP}{TN + FP}$$

Chỉ số TPR càng cao thì các mẫu dương tính càng được phân loại chính xác và chỉ số FPR càng cao thì tỷ lệ các mẫu âm tính được phân loại kém chính xác.

Đồ thị ROC có trục hoành tương ứng với FPR và trục tung tương ứng với TPR, ứng với mỗi ngưỡng ta sẽ có một điểm (TPR,FPR), với nhiều ngưỡng khác nhau ta sẽ có tập hợp các điểm TPR,FPR và tập hợp các điểm này sẽ tạo nên đường cong ROC. Diện tích bao quanh bởi trục hoành và đường cong được gọi là diện tích dưới đường cong AUC (area under curve) có giá trị từ 0 đến 1. Giá trị này càng gần tiến tới 1 thì càng thể hiện độ hiệu quả của bộ phân loại. Do đó bằng cách so sánh các giá trị AUC chúng ta có thể dễ dàng nhận xét được mức độ hiệu quả của mô hình. Hình xx thể hiện đường cong ROC của một bộ phân loại lỗi bằng mạng nơ ron nhân tạo MLP với các giá trị AUC lần lượt là

$$[PD \ D1 \ D2 \ T1 \ T2 \ T3] = [0.66 \ 0.82 \ 0.55 \ 0.92 \ 0.90 \ 0.92]$$

Hình 2 Đường cong ROC của một bộ phân loại lỗi bằng mạng nơ ron nhân tạo MLP.



Đối với bộ phân loại này thì các kết quả phân loại lỗi T1, T2 và T3 được coi là khá tốt, có thể sử dụng được. Tuy nhiên các giá trị còn lại thì có giá trị AUC khá là thấp, đặc biệt phân loại lỗi PD và D2. Vì thế bộ phân loại này khó có thể chấp nhận được.

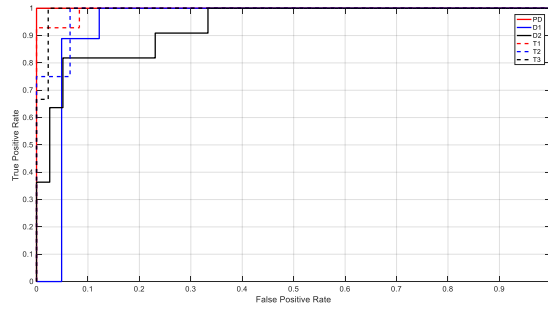
## 5. Kết quả và thảo luận

Bằng việc thay đổi các đầu vào của mạng nơ ron theo các tỷ lệ Doernenbug, Rogers và IEC, chúng ta sẽ có được các kết quả về độ chính xác, độ nhạy, đặc trưng, giá trị AUC ở bảng xx, xx, xx và đường cong ROC tương ứng ở hình xx, xx, xx theo từng lỗi dựa trên đầu ra của mạng.

Bảng 7 Độ chính xác, độ nhạy, đặc trưng và giá trị AUC của bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ Doernenburg.

Fault Type	Accuracy	Sensitivity	Specificity	AUC
PD	1.00	1.00	1.00	1.00
D1	0.92	0.89	0.93	0.94
D2	0.90	0.73	0.95	0.93
T1	0.96	0.86	1.00	0.99
T2	0.96	0.75	0.98	0.98
T3	0.98	1.00	0.98	0.99

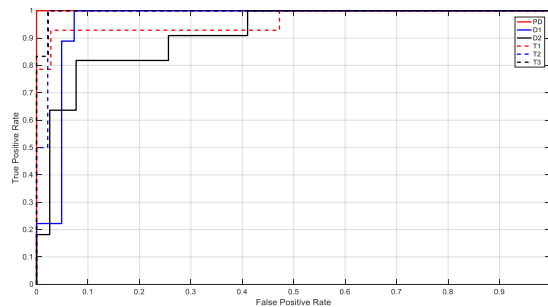
Hình 3 Đường cong ROC đối với bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ Doernenburg.



Bảng 8. Độ chính xác, độ nhạy, đặc trưng và giá trị AUC của bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ Rogers.

Fault Type	Accuracy	Sensitivity	Specificity	AUC
PD	1.00	1.00	1.00	1.00
D1	0.94	0.89	0.95	0.96
D2	0.90	0.81	0.92	0.91
T1	0.94	0.79	1.00	0.96
T2	0.96	0.75	0.98	0.99
T3	0.98	1.00	0.98	0.99

Hình 5 Đường cong ROC đối với bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ Doernenburg.

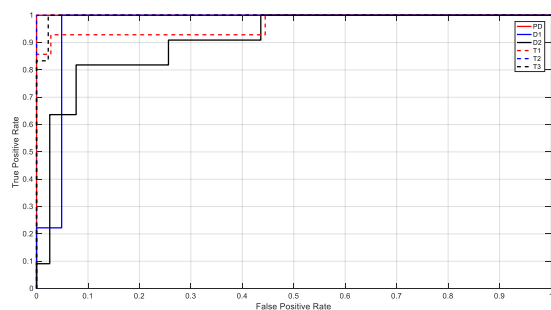


Bảng 9 Độ chính xác, độ nhạy, đặc trưng và giá trị AUC của bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ IEC.

Fault Type	Accuracy	Sensitivity	Specificity	AUC
PD	0.96	1.00	0.95	1.00
D1	0.94	0.89	0.95	0.96
D2	0.86	0.63	0.93	0.91
T1	0.96	0.86	1.00	0.96
T2	0.98	0.75	1.00	1.00
T3	0.98	1.00	0.97	0.99



Hình 4 Đường cong ROC đối với bộ phân loại MLP bằng cách sử dụng dữ liệu đầu vào là tỷ lệ IEC.



Dựa trên các kết quả trên, ta có thể thấy trực quan hơn về độ hiệu quả của mô hình nhận dạng lỗi dựa trên từng lỗi. Kết quả cho thấy độ hiệu quả của mô hình dựa trên các đầu vào khác nhau là gần như giống nhau và có độ hiệu quả đáng tin cậy.

Độ chính xác của bộ phân loại đối với các đầu vào khác nhau có kết quả gần như là giống nhau và đều đạt trên 90% duy nhất chỉ có lỗi D2 đối với tỷ lệ IEC là chỉ đạt được 86%.

Tiếp theo, ở lỗi D2 ở cả ba mô hình cho thấy độ nhạy có kết quả khá thấp, đặc biệt là đối với đầu vào tỷ lệ IEC và chỉ đạt được 63%, tiếp theo đó là đầu vào Doernenbug đạt được 73%. Chỉ có đầu vào tỷ lệ Roger là có thể chấp nhận được và đạt được kết quả là 81%.

Các kết quả đánh giá về đặc trưng và giá trị AUC đều có các giá trị gần giống nhau và đều đạt mức trên 90%.

Đồ thị ROC ở cả 3 trường hợp cho thấy, các đường ROC đối với mỗi một lỗi đều nằm sát về phía bên trái, tiệm cận với đường  $y=1$ , cho thấy độ hiệu quả mô hình này có thể đáp ứng được khả năng nhận diện lỗi cho máy biến áp.

Bảng 10. So sánh chung cho cả 3 vecto đầu vào

Fault Type	Accuracy	Sensitivity	Specificity	AUC
Doernenburg				
Rogers				
IEC				

## 6. Kết luận

### Tài liệu trích dẫn

[1]. Nguyễn Đình Thắng, *Giáo trình Vật liệu điện*, NXB Giáo Dục, Hà Nội, 2002.