

# ỨNG DỤNG LOGIC MỜ KẾT HỢP VỚI PHƯƠNG PHÁP IEC VÀ ROGER TRONG VIỆC CHẨN ĐOÁN LỖI MÁY BIẾN ÁP LỰC DỰA TRÊN DGA

## A FUZZY LOGIC APPROACH COMBINED WITH IEC AND ROGER METHODS FOR POWER TRANSFORMER FAULT DIAGNOSIS BASED ON DGA

Nguyễn Kim Ánh\*, Lê Huy Hoàng, Phùng Bá Tú, Trần Huy Vũ

*Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam<sup>1</sup>*

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nkanh@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 05/01/2025; Sửa bài / Revised: 11/3/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 20/3/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.010

**Tóm tắt** - Phân tích khí hòa tan (DGA) là một phương pháp chẩn đoán quan trọng trong việc xác định lỗi tiềm ẩn bên trong máy biến áp (MBA) dầu. Trong số các phương pháp DGA truyền thống, phương pháp tỉ lệ IEC và Roger được áp dụng rộng rãi tại các Trung tâm thí nghiệm của ngành điện. Tuy nhiên, độ chính xác của các phương pháp này bị hạn chế bởi sự mơ hồ trong các ngưỡng tỉ lệ khí và quy tắc phân loại lỗi. Nghiên cứu này đề xuất một cách tiếp cận mới trong chẩn đoán lỗi của MBA bằng cách tích hợp logic mờ cải tiến với bộ quy tắc quyết định của phương pháp IEC và Roger. Khác với FL truyền thống, phương pháp cải tiến này giúp nâng cao đáng kể độ chính xác và khả năng thích nghi với tập dữ liệu DGA đầu vào. Các đánh giá thực nghiệm trên bộ dữ liệu DGA thực tế cho thấy phương pháp dựa trên logic mờ cải tiến vượt trội hơn các kỹ thuật truyền thống về độ chính xác, tính nhất quán và độ tin cậy.

**Từ khóa** - Phân tích khí hòa tan; chẩn đoán máy biến áp; phương pháp IEC; phương pháp Roger; logic mờ

### 1. Đặt vấn đề

Máy biến áp (MBA) là thành phần quan trọng nhất trong hệ thống truyền tải và phân phối điện năng. Sự cố của MBA không chỉ gây ra tổn thất kinh tế lớn mà còn ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ tin cậy và ổn định của hệ thống điện. Vì vậy, việc chẩn đoán sớm các lỗi tiềm ẩn trong MBA để đưa ra các quyết định hiệu quả đã trở thành một trong những nhiệm vụ thiết yếu trong các công ty điện lực cũng như trong công nghiệp [1], [2]. Trong số các phương pháp được phát triển để giám sát tình trạng MBA, phân tích khí hòa tan (DGA - Dissolved Gas Analysis) đã khẳng định vai trò của mình như một công cụ chẩn đoán hiệu quả [2], [3]. DGA dựa trên việc phân tích các loại khí được hòa tan trong dầu cách điện của MBA để xác định các lỗi tiềm ẩn. Các phương pháp truyền thống như IEC 60599 và tỉ lệ của Roger (RRM - Roger Ratio Method) đã được áp dụng rộng rãi nhờ sự đơn giản và dễ áp dụng trong thực tế [4], [5], [6]. Tuy nhiên, những phương pháp này vẫn tồn tại một số hạn chế, đặc biệt là tính cứng nhắc trong các quy tắc chẩn đoán và sự không chắc chắn khi dữ liệu nằm ở vùng ranh giới giữa các tỉ lệ khí. Điều này dẫn đến độ chính xác chưa tối ưu trong một số trường hợp chẩn đoán [7], [8]. Logic mờ (Fuzzy Logic - FL), được đề xuất lần đầu tiên bởi Zadeh vào năm 1965 [9], đã chứng minh được khả năng linh hoạt trong việc xử lý các vấn đề liên quan đến sự không chắc chắn và mơ hồ. Logic

**Abstract** - Dissolved gas analysis (DGA) is a crucial diagnostic method for identifying potential faults inside oil immersed type transformers. Among the traditional DGA methods, the IEC and Roger ratio methods are widely used in the testing laboratory of power companies. However, the accuracy of these methods is limited by the ambiguity in the gas ratio thresholds and fault classification rules. This study proposes a new approach for fault diagnosis of power transformers by integrating improved fuzzy logic (FL) with the decision rules of the IEC and Roger methods. Different from the traditional FL, this proposed method significantly improves the accuracy and adaptability to the input DGA dataset. Experimental evaluations on real DGA datasets show that the proposed fuzzy logic-based method outperforms the traditional techniques in terms of accuracy, consistency, and reliability.

**Key words** - Dissolved gas analysis; power transformer fault diagnosis; IEC method; Roger method; fuzzy logic

mờ cho phép biểu diễn và xử lý các thông tin không chính xác hoặc thiếu rõ ràng, giúp nâng cao hiệu quả trong nhiều ứng dụng kỹ thuật, bao gồm cả DGA [10], [11]. Một số nghiên cứu trước đây đã áp dụng hệ thống logic mờ truyền thống để cải thiện khả năng chẩn đoán của các phương pháp DGA. Tuy nhiên, những hệ thống này vẫn gặp hạn chế trong việc tối ưu hóa độ chính xác và xử lý các lỗi phức tạp, đòi hỏi cần có các cải tiến về cấu trúc và thuật toán để đạt hiệu suất tốt hơn [12], [13]. Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp chẩn đoán mới bằng cách tích hợp FL cải tiến với bộ quy tắc quyết định của phương pháp IEC và RRM. Thay vì sử dụng các hệ thống logic mờ truyền thống, phương pháp được thiết kế nhằm giảm thiểu sự mơ hồ và tăng khả năng phân loại lỗi thông qua việc bổ sung các tập luật mới và tối ưu hóa các thuật toán xử lý [7], [8]. Những cải tiến này không chỉ giúp nâng cao độ chính xác và tính nhất quán trong kết quả chẩn đoán mà còn tăng khả năng áp dụng thực tiễn. Bài báo sẽ trình bày chi tiết về các cải tiến của hệ FL, cách tích hợp FL vào các phương pháp IEC và RRM cũng như các kết quả thực nghiệm trên dữ liệu trong thực tế. Kết quả nghiên cứu khẳng định phương pháp FL cải tiến mang lại hiệu suất vượt trội trong chẩn đoán lỗi MBA.

### 2. Phương pháp luận

Để phát triển mô hình chẩn đoán lỗi hiệu quả, mục này sẽ tập trung trên hai vấn đề chính bao gồm: (i) nghiên cứu

<sup>1</sup> The University of Danang – University of Science and Technology, Vietnam (Nguyen Kim Anh, Le Huy Hoang, Phung Ba Tu, Tran Huy Vu)

các kỹ thuật chẩn đoán lỗi truyền thống dựa trên phương pháp đánh giá tỉ lệ giữa các khí sinh ra trong quá trình vận hành của MBA; (ii) cơ sở của logic mờ (FL - Fuzzy Logic) và đề xuất hướng cải tiến.

2.1. Phương pháp DGA truyền thống

Trong quá trình vận hành, các khí hòa tan như Hydro (H<sub>2</sub>), Methane (CH<sub>4</sub>), Ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Ethylene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), Acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) và Carbon Monoxide (CO) được sinh ra trong dầu cách điện của MBA dưới sự ảnh hưởng bởi các yếu tố không mong muốn như phóng điện cục bộ (PD – Partial Discharge), quá nhiệt, hồ quang điện [2], [14]. Việc đánh giá nồng độ và tỉ lệ giữa các khí này cho phép chúng ta chẩn đoán một cách hiệu quả các lỗi tiềm ẩn liên quan đến các quá trình điện và nhiệt này. Phương pháp này còn được gọi là phương pháp DGA [1], [2]. Hai trong những phương pháp DGA truyền thống thường được áp dụng để chẩn đoán lỗi sau quá trình sắc ký dầu cách điện đó là phương pháp tỉ lệ RRM và IEC.

Bảng 1. Mã lỗi của phương pháp RRM

| Tỉ lệ khí                                                    | Khoảng       | Mã lỗi |
|--------------------------------------------------------------|--------------|--------|
| CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>                              | ≤ 0,1        | 5      |
|                                                              | > 0,1 và < 1 | 0      |
|                                                              | ≥ 1 và < 3   | 1      |
|                                                              | ≥ 3          | 2      |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> / CH <sub>4</sub>              | < 1          | 0      |
|                                                              | ≥ 1          | 1      |
|                                                              | < 1          | 0      |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | ≥ 1 và < 3   | 1      |
|                                                              | ≥ 3          | 2      |
|                                                              | < 0,5        | 0      |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | ≥ 0,5 và < 3 | 1      |
|                                                              | ≥ 3          | 2      |

Bảng 2. Phân loại dựa trên mã lỗi của phương pháp RRM

| Kiểu lỗi                                                           | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</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> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Bình thường                                                        | 0                               | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            |
| PD                                                                 | 5                               | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            |
| Quá nhiệt nhẹ dưới 150°C                                           | 1 - 2                           | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            |
| Quá nhiệt nhẹ [150, 200°C]                                         | 1 - 2                           | 1                                              | 0                                                            | 0                                                            |
| Quá nhiệt nhẹ [200, 300°C]                                         | 0                               | 1                                              | 0                                                            | 0                                                            |
| Quá nhiệt dây dẫn                                                  | 0                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            |
| Dòng điện tuần hoàn trong cuộn dây                                 | 1                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            |
| Dòng điện tuần hoàn trong lõi thép, vỏ máy và mối nối bị quá nhiệt | 1                               | 0                                              | 2                                                            | 0                                                            |
| Phóng điện bề mặt không kèm theo dòng điện duy trì                 | 0                               | 0                                              | 0                                                            | 1                                                            |
| Hồ quang kèm theo dòng điện duy trì                                | 0                               | 0                                              | 1 - 2                                                        | 1 - 2                                                        |
| Phóng tia lửa liên tục đến điện thế nổi                            | 0                               | 0                                              | 2                                                            | 2                                                            |
| PD kèm theo rò rỉ                                                  | 5                               | 0                                              | 0                                                            | 1 - 2                                                        |

**Phương pháp RRM** sử dụng bốn tỉ lệ khí cháy: CH<sub>4</sub>/H<sub>2</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 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> để phân loại lỗi thành các nhóm lỗi cơ bản như: phóng điện nhẹ, quá nhiệt trung bình, quá nhiệt nặng và phóng điện hồ quang. Tuy nhiên, do các ngưỡng cố định, phương pháp này gặp khó khăn trong việc xử lý các tình huống không rõ ràng hoặc nằm ngoài giới hạn [4], [7], [14]. Các luật và mã của phương pháp RRM được thể hiện trong Bảng 1 và Bảng 2.

**Phương pháp IEC** là cách tiếp cận có hệ thống hơn bằng cách bổ sung các quy tắc logic nhằm cải thiện độ chính xác trong phân loại lỗi. Phương pháp này dựa trên các tỉ lệ khí tương tự như phương pháp RRM. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn gặp một số hạn chế tương tự trong việc xử lý các mẫu khí không chắc chắn và các trường hợp lỗi không phổ biến [4], [5], [7]. Các luật và mã của phương pháp IEC được thể hiện trong Bảng 3 và Bảng 4.

Bảng 3. Mã lỗi của phương pháp IEC

| Tỉ lệ khí | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|-----------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| < 0,1     | 0                                                            | 1                               | 0                                                            |
| 0,1 – 1,0 | 1                                                            | 0                               | 0                                                            |
| 1,0 – 3,0 | 1                                                            | 2                               | 1                                                            |
| > 3,0     | 2                                                            | 2                               | 2                                                            |

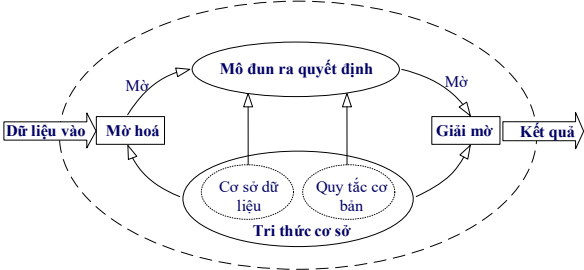
Bảng 4. Phân loại dựa trên mã lỗi của phương pháp IEC

| Kiểu lỗi                                   | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Sự suy giảm bình thường                    | 0                                                            | 0                               | 0                                                            |
| Phóng điện cục bộ năng lượng thấp          | 0                                                            | 1                               | 0                                                            |
| Phóng điện cục bộ năng lượng cao           | 1                                                            | 1                               | 0                                                            |
| Phóng điện năng lượng thấp                 | 1 - 2                                                        | 0                               | 1 - 2                                                        |
| Phóng điện năng lượng cao                  | 1                                                            | 0                               | 2                                                            |
| Quá nhiệt mức thấp <150°C                  | 0                                                            | 0                               | 1                                                            |
| Quá nhiệt mức thấp (150°C đến 300°C)       | 0                                                            | 2                               | 0                                                            |
| Quá nhiệt mức trung bình (300°C đến 700°C) | 0                                                            | 2                               | 1                                                            |
| Quá nhiệt mức cao (>700°C)                 | 0                                                            | 2                               | 2                                                            |

Các hạn chế chính của cả hai phương pháp này đó là khả năng nhận biết kém đối với các mẫu dữ liệu mơ hồ hoặc hiếm khi xảy ra. Điều này dẫn đến nguy cơ chẩn đoán sai, đặc biệt là khi tỉ lệ khí nằm gần các ngưỡng phân loại hoặc chịu ảnh hưởng từ yếu tố bên ngoài [3], [13]. Nhược điểm này có thể được khắc phục nhờ vào logic mờ. Phương pháp tích hợp này cho phép cải thiện độ chính xác và tính linh hoạt của các phương pháp truyền thống ở trên [7], [8], [15].

2.2. Chẩn đoán lỗi áp dụng FL

FL là một trong những phương pháp tính toán mềm đã chứng tỏ được tính hiệu quả trong chẩn đoán lỗi của MBA nhờ khả năng xử lý dữ liệu không chắc chắn, mơ hồ và phức tạp [9], [10]. Sơ đồ nguyên lý của FL gồm các bước cơ bản như: mờ hóa, tính toán mờ và giải mờ được thể hiện như trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của FL

FL cho phép biểu diễn các tỉ lệ khí dưới dạng tập mờ, từ đó xác định mức độ tương thích của dữ liệu với các kiểu lỗi khác nhau trong MBA. Việc áp dụng FL để chẩn đoán lỗi khá linh hoạt hơn các phương pháp khác trong việc xử lý dữ liệu không rơi hoàn toàn vào các quy tắc định trước [10], [11]. Nhưng quá trình xây dựng mô hình FL thường dựa trên kinh nghiệm.

Các công việc phải được thực hiện để xây dựng mô hình FL bao gồm: việc biểu diễn các tỉ lệ khí dưới dạng tập mờ, xây dựng hệ thống quy tắc chẩn đoán và hợp nhất các nguồn thông tin khác nhau để đưa ra kết luận duy nhất [10], [13]. Tuy nhiên, các hệ thống logic mờ truyền thống vẫn gặp khó khăn trong việc xây dựng tập mờ và quy tắc cũng như xử lý các tập dữ liệu lớn hoặc các trường hợp lỗi phức tạp [12], [13]. Những hạn chế này đặt ra nhu cầu cải tiến các mô hình FL hiện tại để tăng cường hiệu quả và độ chính xác trong công tác chẩn đoán lỗi dựa trên hương pháp DGA.

Để giải quyết vấn đề không chắc chắn, mơ hồ cũng như các lỗi hiếm khi xuất hiện trong mẫu dầu, nghiên cứu đã đề xuất một mô hình FL cải tiến, trong đó bổ sung các tập luật mới nhằm phân loại hiệu quả hơn các trường hợp ngoại lệ và tình huống không rõ ràng.

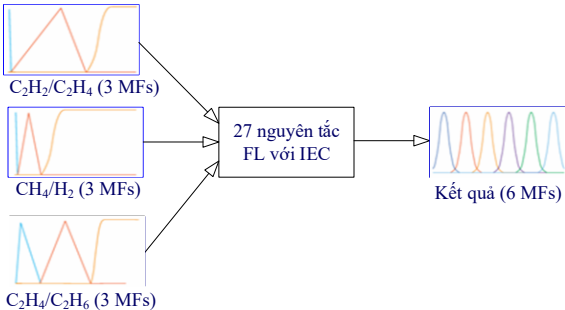
**3. Mô hình FL cải tiến kết hợp với phương pháp RRM và IEC truyền thống**

Trong mục này, nghiên cứu sẽ phân tích chi tiết mô hình FL truyền thống dựa trên các quy tắc chẩn đoán truyền thống của RRM và IEC; chỉ ra những hạn chế của các mô hình kiểu này và sau đó sẽ đưa ra mô hình FL cải tiến nhằm khắc phục những thiếu sót và nâng cao độ chính xác của quá trình chẩn đoán.

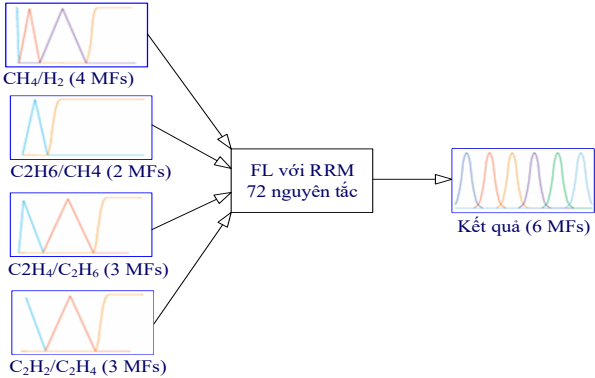
**3.1. Mô hình FL kết hợp với phương pháp RRM và IEC truyền thống**

**3.1.1. Mô hình FL kết hợp**

FL kết hợp với các phương pháp truyền thống đã được áp dụng trong các nghiên cứu [10], [11], [12]. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu này vẫn còn những hạn chế như sau: đối với phương pháp IEC và RRM, các hàm thuộc của tỉ lệ các khí đầu vào phải tuân theo các khoảng được định nghĩa cứng nhắc cho trước như trong Bảng 1 và Bảng 3 có nguồn gốc từ [4], [14]. Ngoài ra, hình dạng và độ dốc của các hàm thuộc phải được điều chỉnh cẩn thận để đảm bảo tính liên tục và chính xác khi chuyển đổi từ một mức giá trị này sang mức giá trị khác. Chính vì lí do đó, mô hình FL trong nghiên cứu này được thiết kế lại như được cho thấy tương ứng trong Hình 2 và Hình 3. Hình 2 trình bày mô hình FL tích hợp với phương pháp IEC với 27 nguyên tắc quyết định dựa trên 3 tỉ lệ khí ngõ vào và Hình 3 trình bày mô hình FL tích hợp với phương pháp RRM với 72 nguyên tắc quyết định dựa trên 4 tỉ lệ khí ngõ vào. Các cấu trúc này bao gồm các lớp đầu vào, lớp xử lý logic mờ và lớp đầu ra với khả năng cung cấp kết quả xác suất thay vì chỉ phân loại một cách cứng nhắc.



**Hình 2.** Hàm thành viên được thiết kế lại cho phương pháp mờ hoá với IEC

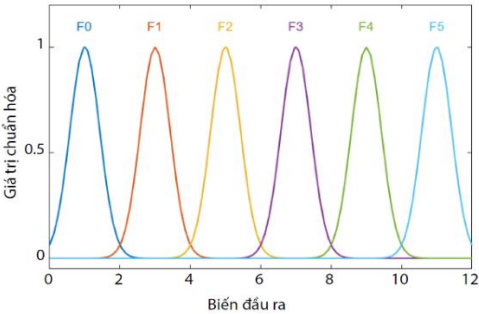


**Hình 3.** Hàm thành viên được thiết kế lại cho phương pháp mờ hoá với RRM

**Bảng 5.** Mã lỗi cho hàm thuộc đầu ra

| Lỗi | Kết quả          | Chuẩn đoán lỗi                                        |
|-----|------------------|-------------------------------------------------------|
| F0  | $0 < D \leq 2$   | - Bình thường N                                       |
| F1  | $2 < D \leq 4$   | - Quá nhiệt mức thấp T1 ( $< 300^{\circ}\text{C}$ )   |
| F2  | $4 < D \leq 6$   | - Quá nhiệt mức cao T2-T3 ( $> 300^{\circ}\text{C}$ ) |
| F3  | $6 < D \leq 8$   | - Phóng điện cục bộ PD                                |
| F4  | $8 < D \leq 10$  | - Hồ quang điện D                                     |
| F5  | $10 < D \leq 12$ | - Ngoài giới hạn OOC                                  |

Tập hàm thuộc đầu ra của cả hai phương pháp được thiết kế như trong Bảng 5 với các hàm thuộc từ F1 đến F4 tương ứng với dải giá trị của D thay đổi từ 2 đến 10 và các lỗi tương ứng từ T1, T2 – T3, PD, D. Hàm F0 được xác định trong khoảng  $[0, 2]$  và F5 nằm trong khoảng  $[10, 12]$ . Hai hàm này được thiết kế riêng để biểu thị tình trạng bình thường (N) và không thể xác định (ký hiệu OOC). Do đó, tập các hàm thuộc F đầu ra của hệ FL của cả hai phương pháp sẽ được xác định trong khoảng từ 0 đến 12 với các nhãn lỗi có thể nhận được từ N cho đến OOC được thể hiện như trên Hình 4.



**Hình 4.** Đồ thị hàm thuộc ở ngõ ra

**Bảng 6.** Tập luật mờ cho mô hình FL với tiêu chuẩn IEC

| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Mã lỗi |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| 0                                                            | 0                               | 0                                                            | F0     |
| 0                                                            | 1                               | 0                                                            | F3     |
| 1                                                            | 1                               | 0                                                            | F3     |
| 1 - 2                                                        | 0                               | 1 - 2                                                        | F4     |
| 1                                                            | 0                               | 2                                                            | F4     |
| 0                                                            | 0                               | 1                                                            | F1     |
| 0                                                            | 2                               | 0                                                            | F1     |
| 0                                                            | 2                               | 1                                                            | F2     |
| 0                                                            | 2                               | 2                                                            | F2     |

Tiếp theo, luật mờ sẽ được thiết kế tuân theo các luật truyền thống đã được định nghĩa như trong Bảng 2 và Bảng 4. Đối với các trường hợp mà tỷ lệ khí nằm ở ranh giới giữa các khoảng giá trị hoặc nằm ngoài phạm vi định nghĩa, các

luật mờ cần được mở rộng để cho phép mô hình FL gia tăng phạm vi xác định lỗi và cung cấp một giá trị đầu ra xác suất thay vì phân loại cứng nhắc. Tập luật trên được thể hiện lần lượt trong Bảng 6 và Bảng 7.

**Bảng 7.** Tập luật mờ cho mô hình FL với RRM

| CH <sub>4</sub> /H <sub>2</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> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Mã lỗi |
|---------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| 0                               | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            | F0     |
| 5                               | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            | F4     |
| 1 - 2                           | 0                                              | 0                                                            | 0                                                            | F1     |
| 1 - 2                           | 1                                              | 0                                                            | 0                                                            | F1     |
| 0                               | 1                                              | 0                                                            | 0                                                            | F1     |
| 0                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            | F2     |
| 1                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            | F2     |
| 1                               | 0                                              | 2                                                            | 0                                                            | F2     |
| 0                               | 0                                              | 0                                                            | 1                                                            | F4     |
| 0                               | 0                                              | 1 - 2                                                        | 1 - 2                                                        | F4     |
| 0                               | 0                                              | 2                                                            | 2                                                            | F4     |
| 5                               | 0                                              | 0                                                            | 1 - 2                                                        | F3     |

3.1.2. Phương pháp giải mờ trọng tâm

Để tạo ra kết quả chẩn đoán chính xác, hệ thống logic mờ sử dụng phương pháp giải mờ trọng tâm, tính toán trọng tâm của đồ thị tập mờ đầu ra đã được tổng hợp. Phương pháp này được biểu diễn toán học như sau:

$$D_{output} = \frac{\int \mu_{output}(x) x dx}{\int \mu_{output}(x) dx} \tag{1}$$

Trong đó,  $D_{output}$  là giá trị đầu ra chẩn đoán đã giải mờ;  $\mu_{output}(x)$  là hàm thuộc tính tổng hợp của biến đầu ra;  $x$  là dải giá trị liên tục có thể có của đầu ra. Phương pháp trọng tâm đảm bảo rằng, kết quả chẩn đoán cuối cùng thể hiện được cách diễn giải cân bằng nhất của tất cả các luật mờ. Từ đó giảm thiểu độ lệch và duy trì tính nhất quán trong việc phân loại lỗi.

3.1.3. Xác định độ chính xác

Độ chính xác, kí hiệu là  $A$  (%), được xác định như sau:

$$A = \frac{N_{sc}}{N_{tc}} \times 100\% \tag{2}$$

Trong đó,  $N_{tc}$  là tổng số trường hợp được thử nghiệm và  $N_{sc}$  là số trường hợp mà phương pháp dự đoán chính xác.

**3.2. Đề xuất mô hình FL cải tiến kết hợp với phương pháp RRM và IEC truyền thống**

Việc thiết kế tích hợp mô hình FL-IEC và FL-RRM như trong Mục 3.1 mang lại một số điểm nổi trội hơn trong việc xử lý những dữ liệu không chắc chắn và mở rộng khả năng ứng dụng của các phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, một vấn đề nổi lên là độ chính xác của hệ thống có thể không đạt được như phương pháp truyền thống trong một số trường hợp nhất định. Chính vì vậy, mục này tiếp tục cải tiến độ chính xác của mô hình FL bằng cách thêm một số luật mới cho cả hai mô hình (FL-IEC và FL-RRM). Ngoài 11 luật đã cho của FL-IEC và 17 luật đã cho của FL-RRM (xem Bảng 6 và 7), nghiên cứu đã bổ sung thêm 10 luật mới cho mô hình FL-IEC và 28 luật mới cho mô hình FL-RRM. Các luật mới này được mô tả chi tiết lần lượt như trong Bảng 8 và Bảng 9. Việc thêm các luật mới giúp mô

hình FL bao quát tốt hơn các trường hợp phức tạp hoặc không rõ ràng, đồng thời giảm thiểu sai sót trong quá trình phân loại lỗi. Các luật bổ sung không chỉ dựa trên các quy tắc truyền thống mà còn được thiết kế dựa trên dữ liệu thực nghiệm để đảm bảo rằng hệ thống có khả năng xử lý linh hoạt hơn với các tập dữ liệu đa dạng và cải thiện đáng kể độ chính xác tổng thể của mô hình. Phiên bản đầy đủ của tập luật sau khi cải tiến cho cả hai mô hình FL-IEC và FL-RRM được trình bày chi tiết lần lượt trong Phụ lục 1 (27 luật trong đó có 21 luật cho kết quả cụ thể) và Phụ lục 2 (72 luật trong đó có 45 luật cho kết quả cụ thể).

**Bảng 8.** Đề xuất thêm các quy tắc cho mô hình FL với IEC

| Tỉ lệ                                                        |                                 |                                                              | Lỗi      | Mã lỗi |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------|--------|
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |          |        |
| 0                                                            | 0                               | 2                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 0                                                            | 1                               | 1                                                            | PD       | F3     |
| 0                                                            | 1                               | 2                                                            | PD       | F3     |
| 1                                                            | 1                               | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                                                            | 2                               | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                                                            | 1                               | 0                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                                                            | 1                               | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                                                            | 1                               | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                                                            | 2                               | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                                                            | 2                               | 2                                                            | Hồ quang | F4     |

Nhờ những cải tiến này, mô hình FL đề xuất đạt được khả năng phân loại chính xác hơn, tăng cường hiệu quả chẩn đoán và giảm thiểu sai sót so với các phương pháp truyền thống với FL dựa trên các luật gốc.

**Bảng 9.** Đề xuất thêm các quy tắc cho mô hình FL với RRM

| Tỉ lệ khí                       |                                                |                                                              |                                                              | Lỗi      | Mã lỗi |
|---------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------|--------|
| CH <sub>4</sub> /H <sub>2</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> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |          |        |
| 2                               | 0                                              | 0                                                            | 1                                                            | Nhiệt    | F1     |
| 1                               | 1                                              | 1                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 1                               | 1                                              | 2                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 1                               | 1                                              | 2                                                            | 1                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 2                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 2                               | 0                                              | 2                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 2                               | 1                                              | 1                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 2                               | 1                                              | 2                                                            | 0                                                            | Nhiệt    | F2     |
| 5                               | 0                                              | 1                                                            | 0                                                            | PD       | F3     |
| 5                               | 0                                              | 2                                                            | 0                                                            | PD       | F3     |
| 5                               | 1                                              | 0                                                            | 0                                                            | PD       | F3     |
| 5                               | 0                                              | 1                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 0                                              | 2                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 0                                              | 2                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 1                                              | 0                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 1                                              | 1                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 1                                              | 1                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 5                               | 1                                              | 2                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 0                               | 0                                              | 0                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 0                               | 1                                              | 0                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 0                               | 1                                              | 1                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                               | 0                                              | 0                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                               | 0                                              | 1                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                               | 0                                              | 2                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                               | 0                                              | 2                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 1                               | 1                                              | 0                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                               | 0                                              | 1                                                            | 2                                                            | Hồ quang | F4     |
| 2                               | 1                                              | 0                                                            | 1                                                            | Hồ quang | F4     |

3.3. Chuẩn bị và chuẩn hoá dữ liệu

Tập dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là tập dữ liệu DGA nhằm đánh giá các tình trạng lỗi của MBA. Tập dữ liệu cung cấp thông tin chi tiết về nồng độ các loại khí hòa tan gốc Hydro có trong các mẫu dầu cùng với các phân loại lỗi tương ứng dựa trên các tiêu chuẩn và phân tích của chuyên gia. Tập dữ liệu thực nghiệm bao gồm 100 mẫu dầu được sử dụng từ các nguồn tin cậy khác nhau bao gồm: hồ sơ vận hành từ các MBA trong thực tế, dữ liệu thí nghiệm được kiểm soát để mô phỏng các kịch bản lỗi cụ thể và các tập dữ liệu đã được xác nhận từ các nghiên cứu trước đây [16]. Các mẫu dữ liệu này thể hiện khá phong phú đối với các lỗi như: phóng điện cục bộ PD, phóng điện năng lượng thấp D1, phóng điện năng lượng cao D2. Sự đa dạng của tập dữ liệu đảm bảo tính bền vững và khả năng thích ứng trong chẩn đoán lỗi với bất kỳ tập dữ liệu nào.

Dữ liệu được tiền xử lý trước khi được đưa vào mô hình logic mờ để chẩn đoán. Cụ thể, các tỉ lệ tương ứng với từng mô hình phải được chuyển sang tỉ lệ từ các thành phần khí đơn lẻ. Ví dụ, mô hình FL-RRM, đầu vào bao gồm bốn tỉ lệ khí: CH<sub>4</sub>/H<sub>2</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 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

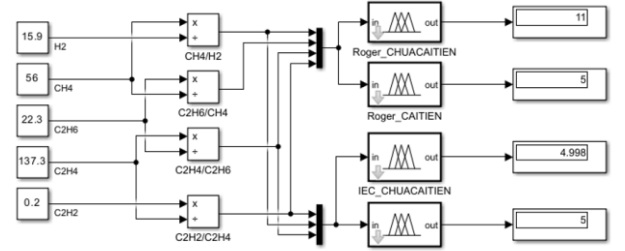
4. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá hiệu quả của mô hình FL-IEC và FL-RRM cải tiến, nghiên cứu tiến hành xây dựng các mô hình này trên phần mềm Matlab/Simulink với tập dữ liệu 100 mẫu DGA thực tế để kiểm tra khả năng chẩn đoán và phân loại các lỗi. Tiếp theo, để chứng minh hiệu quả của mô hình đề xuất, nghiên cứu sẽ tiến hành so sánh độ chính xác của kết quả giữa các mô hình này với các mô hình FL-IEC, FL-RRM [1], [10] truyền thống và phương pháp tỉ lệ theo IEC, RRM [4], [14].

4.1. Mô hình mô phỏng trên Matlab/Simulink

Cấu trúc mô hình mô phỏng gồm các thành phần chính sau: khối tiền xử lý dữ liệu, khối logic mờ, khối giải mờ, và khối hiển thị kết quả. Khối tiền xử lý dữ liệu tiếp nhận các thông số

DGA đầu vào (nồng độ các khí hòa tan: H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) và tính toán các tỉ lệ khí tương ứng với phương pháp IEC và RRM. Các tỉ lệ khí này sau đó được chuẩn hóa để phù hợp với các tập mờ trong hệ thống. Khối logic mờ được thiết kế bằng Fuzzy Logic Toolbox của Matlab. Việc triển khai các tập mờ và quy tắc suy diễn dựa trên các bảng luật đã định nghĩa trong Bảng 6 và Bảng 7 cùng với các luật cải tiến như đã được cho Bảng 8 và Bảng 9. Phương pháp suy diễn Mamdani được sử dụng để tính toán giá trị đầu ra mờ, từ đó chỉ ra các loại lỗi như: phóng điện cục bộ PD, phóng điện D, lỗi nhiệt nhẹ T1 và lỗi nhiệt nặng T2 hoặc T3. Mô hình mô phỏng đầy đủ các phương pháp được thể hiện trong Hình 8.



Hình 8. Mô phỏng mô hình FL đề xuất với Matlab/Simulink

4.2. Kết quả và đánh giá

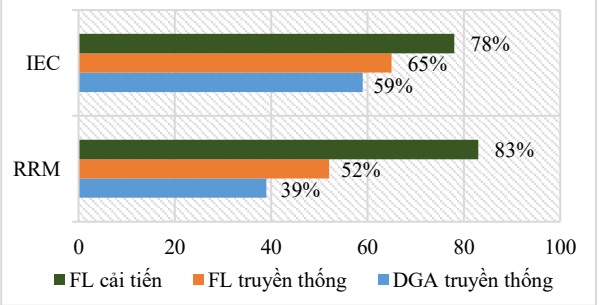
Bảng 10 cho thấy, kết quả chẩn đoán từ 10 mẫu dữ liệu ngẫu nhiên trích xuất từ tập 100 mẫu DGA thực tế. Các ký hiệu mới trong bảng cụ thể: ở dòng thứ 2 gồm dấu “-” để chỉ cho phương pháp RRM và IEC không có FL; “FL” là mô hình FL-RRM và FL-IEC cũ; “FL cải tiến” là hai mô hình đề xuất trong nghiên cứu này; UD nghĩa là không xác định. Kết quả trong bảng này cho thấy, độ chính xác của chẩn đoán thay đổi theo hướng tăng dần từ phương pháp truyền thống (RRM, IEC) đến mô hình FL cũ (FL-RRM và FL-IEC) và cuối cùng là mô hình FL cải tiến. Ví dụ, độ chính xác của các phương pháp IEC, FL-IEC cũ và FL-IEC cải tiến lần lượt là 4/10, 7/10 và 9/10.

Bảng 10. Cải thiện kết quả chẩn đoán từ phương pháp đề xuất

| Mẫu | Dữ liệu đầu vào |                 |                               |                               |                               |    | RRM |             |    | IEC |             |  | Lỗi thực tế |
|-----|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----|-----|-------------|----|-----|-------------|--|-------------|
|     | H <sub>2</sub>  | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | -  | FL  | FL cải tiến | -  | FL  | FL cải tiến |  |             |
| 1   | 10              | 44              | 106                           | 28                            | 0                             | T1 | FL  | F1          | T1 | F1  | F1          |  | T1          |
| 2   | 15.9            | 56              | 22.3                          | 137.3                         | 0.2                           | UD | F5  | F2          | T3 | F2  | F2          |  | T2          |
| 3   | 14              | 15              | 42                            | 73                            | 0                             | UD | F5  | F2          | T2 | F2  | F2          |  | T2          |
| 4   | 7.5             | 269.9           | 192.4                         | 322.2                         | 0                             | UD | F5  | F2          | T2 | F2  | F2          |  | T3          |
| 5   | 36036           | 4704            | 554                           | 5                             | 10                            | D1 | F3  | F3          | UD | F5  | F5          |  | PD          |
| 6   | 9340            | 995             | 60                            | 6                             | 7                             | D1 | F3  | F3          | UD | F3  | F3          |  | PD          |
| 7   | 716             | 7.1             | 33                            | 20                            | 6.8                           | UD | F5  | F3          | PD | F3  | F3          |  | PD          |
| 8   | 124             | 14              | 4                             | 0                             | 13                            | UD | F5  | F4          | UD | F5  | F4          |  | D1          |
| 9   | 595             | 32              | 4                             | 18                            | 65                            | UD | F5  | F4          | UD | F5  | F4          |  | D1          |
| 10  | 7911.9          | 947.4           | 96.9                          | 907.2                         | 4844.5                        | D2 | F4  | F4          | D1 | F4  | F4          |  | D2          |

Trong bảng này cũng cho thấy kết quả chẩn đoán của mô hình FL-RRM cải tiến (10/10) chính xác hơn mô hình FL-IEC cải tiến (9/10). Đối với 90 mẫu còn lại, hai mô hình FL cải tiến luôn cho ra kết quả chính xác hơn bốn mô hình còn lại, trong đó mô hình FL-RRM cải tiến cho kết quả tốt nhất với độ chính xác là 83% như được cho thấy Hình 9.

Mô hình FL mới cho phép cải thiện độ chính xác đáng kể 13% (từ 65% lên 78%) đối với phương pháp IEC và 31% (từ 52% lên 83%) đối với phương pháp RRM. Kết quả này chứng minh hiệu quả sự vượt trội của hai mô hình FL cải tiến trong việc chẩn đoán và phân loại lỗi đối với MBA lực dựa trên tiếp cận DGA.



Hình 9. Kết quả so sánh giữa phương pháp DGA và FL truyền thống với mô hình logic mờ đề xuất



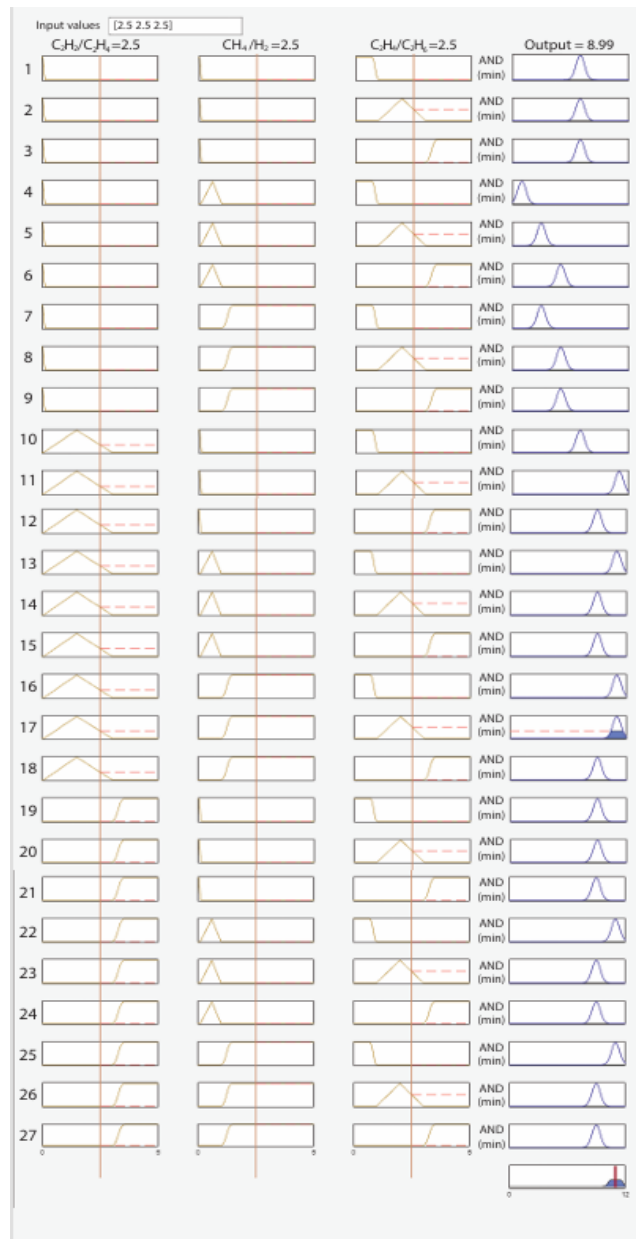
## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã phát triển hai mô hình FL-RRM và FL-IEC cải tiến nhằm cải thiện hiệu quả của quá trình chẩn đoán lỗi MBA so với các cách tiếp cận tương tự. Hiệu quả của mô hình cải tiến nhờ vào việc bổ sung các luật mới và tái thiết kế lại các hàm thuộc. Điều này cho phép hai mô hình đề xuất giải quyết tốt hơn các tình huống mà các mẫu dữ liệu chứa đựng các thông tin mơ hồ hoặc các lỗi hiếm khi xuất hiện trong thực tế. Các kết quả thực nghiệm đã chứng minh hiệu quả rõ ràng của hai mô hình đề xuất trên 10 mẫu dữ liệu DGA thực tế, đặc biệt đối với các lỗi khó mà các phương pháp còn lại chẩn đoán sai hoặc không xác định được. Khi thực nghiệm trên 100 mẫu DGA, độ chính xác của phương pháp cải tiến đạt lần lượt 83% và 78% cho các phương pháp RRM và IEC. Kết quả này vượt trội hơn so với bốn phương pháp còn lại. Điều này chứng minh được tính hiệu quả nhờ vào sự đơn giản trong việc áp dụng, tính nhất quán và khả năng thích nghi của mô hình chẩn đoán đề xuất. Mặc dù nghiên cứu đã chứng minh được mức độ cải thiện đáng kể của hai mô hình đề xuất tuy nhiên độ chính xác vẫn nên được tiếp tục nghiên cứu và cải thiện. Hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai có thể bao gồm việc tích hợp thêm các thuật toán thích nghi, các mô hình học máy,... để thích nghi hơn nữa với những mẫu dữ liệu phức tạp cũng như phân loại được nhiều hơn nữa các lỗi liên quan đến vật liệu cách điện rắn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. C. Sun, Y.-C. Huang, and C.-M. Huang, "A Review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers", *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1220–1225, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1079.
- [2] S. A. Wani, A. S. Rana, S. Sohail, O. Rahman, S. Parveen, and S. A. Khan, "Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, pp. 111–1347, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111347.
- [3] A. Nanfak, I. Fofana, E. Samuel, C. Hubert Kom, F. Meghnefi, and M. G. Ngaleu, "Traditional fault diagnosis methods for mineral oil-immersed power transformer based on dissolved gas analysis: Past, present and future", *IET Nanodielectrics*, vol. 7, no. 3, pp. 97–130, 2024, doi: 10.1049/nde2.12082.
- [4] R. Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, no. 5, pp. 349–354, 1978, doi: 10.1109/tei.1978.298141.
- [5] International Electrotechnical Commission, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service. Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", *IEC Standard 60599:2022*, 2007.
- [6] S. I. Ibrahim, S. S. M. Ghoneim, and I. B. M. Taha, "DGALab: an extensible software implementation for DGA", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 18, pp. 4117–4124, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5564.
- [7] I. B. M. Taha, S. S. M. Ghoneim, and A. S. A. Duaywah, "Refining DGA methods of IEC Code and Rogers four ratios for transformer fault diagnosis", *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA*, IEEE, 2016.
- [8] I. B. M. Taha, S. S. M. Ghoneim, and A. Hoballah, "Optimal ratio limits of rogers' four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 222–230, 2020, doi: 10.1109/tdi.2019.008395.
- [9] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, Issue 3, pp. 338–353, 1965.
- [10] A. Abu-Siada and S. Hmood, "A new fuzzy logic approach to identify power transformer criticality using dissolved gas-in-oil analysis", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 401–408, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.017.
- [11] H. Ma *et al.*, "Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method", *2005 International Power Engineering Conference, Singapore*, IEEE, 2005, doi: 10.1109/ipecc.2005.206897.
- [12] S. Hmood *et al.*, "Standardization of DGA interpretation techniques using fuzzy logic approach", *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia*, IEEE, 2012, doi: 10.1109/cmd.2012.6416305.
- [13] I. B. M. Taha *et al.*, "A Fuzzy Diagnostic System for Incipient Transformer Faults Based on DGA of the Insulating Transformer Oils", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 11, no. 3, p. 305, 2016, doi: 10.15866/iree.v11i3.8453.
- [14] IEEE C57. 104-2019, "IEEE guide for the interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers", *Institute of electrical electronics engineers*, 2019. doi: 10.1109/ieeestd.2019.8890040.
- [15] S. A. Wani *et al.*, "Smart Diagnosis of Incipient Faults Using Dissolved Gas Analysis-Based Fault Interpretation Matrix (FIM)", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 8, pp. 6977–6985, 2019, doi: 10.1007/s13369-019-03739-4.
- [16] M. Duval and A. Depabla, "Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 2, pp. 31–41, 2001, doi: 10.1109/57.917529.

PHỤ LỤC 1. 27 luật cập nhật của mô hình FL-IEC



PHỤ LỤC 2. 72 luật cập nhật của mô hình FL-RRM

