

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CAPSTONE PROJECT

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

ĐỀ TÀI:

**XÂY DỰNG CHIẾN LƯỢC BẢO TRÌ MÁY BIẾN
ÁP NGÂM DẦU BẰNG PHƯƠNG PHÁP FMECA
KẾT HỢP VỚI FTA**

Người hướng dẫn: **TS. NGUYỄN KIM ÁNH**

ThS. LÊ HOÀI SƠN

Sinh viên thực hiện:

- 1. PHAN HỮU ANH MINH – MSSV: 105200502 – LỚP: 20TDHCLC4**
- 2. NGUYỄN HOÀNG GIANG – MSSV: 105200489 – LỚP: 20TDHCLC4**

Đà Nẵng, 6/2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: Xây dựng chiến lược bảo trì máy biến áp ngâm dầu bằng phương pháp FMECA kết hợp với FTA

Sinh viên thực hiện: Phạm Hữu Anh Minh

Số thẻ SV: 105200502

Lớp: 20TDHCLC4

Sinh viên thực hiện: Nguyễn Hoàng Giang

Số thẻ SV: 105200489

Lớp: 20TDHCLC4

Trong bối cảnh máy biến áp thiết bị thiết yếu trong hệ thống điện lực ngày càng bộc lộ nhiều nguy cơ sự cố nghiêm trọng do lão hóa cách điện, quá tải, và điều kiện vận hành khắc nghiệt, việc xây dựng một chiến lược bảo trì hiệu quả là yêu cầu cấp thiết để đảm bảo độ tin cậy, an toàn và tối ưu chi phí vận hành hệ thống. Các phương pháp bảo trì truyền thống như bảo trì theo thời gian vận hành hoặc dựa theo tình hình sức khỏe hiện tại của hệ thống dù có đóng góp nhất định nhưng vẫn còn nhiều hạn chế như là: thiếu tính linh hoạt, phụ thuộc vào hệ thống giám sát phức tạp.

Đề tài này đề xuất một mô hình bảo trì dự đoán tích hợp áp dụng cho máy biến áp, kết hợp ba công cụ phân tích: phân tích cây lỗi FTA, phân tích chế độ hỏng hóc và mức độ nghiêm trọng FMECA và phân phối Weibull. Cụ thể, FTA được sử dụng để xác định các nguyên nhân gốc dẫn đến sự cố tổng thể, FMECA lượng hóa mức độ rủi ro của từng thành phần thông qua chỉ số ưu tiên rủi ro và Weibull ước lượng xác suất sống sót để xác định thời điểm bảo trì tối ưu. Mô hình cho phép hiệu chỉnh một cách mềm dẻo kế hoạch bảo trì bổ sung thông qua hệ số rủi ro (α) nhằm ưu tiên bảo trì sớm cho các thành phần có độ rủi ro cao trong hệ thống.

KHOA ĐIỆN**NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
1	Phan Hữu Anh Minh	105200502	20TDHCLC4	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
2	Nguyễn Hoàng Giang	105200489	20TDHCLC4	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

1. Tên đề tài đồ án:

Xây dựng chiến lược bảo trì máy biến áp ngâm dầu bằng phương pháp FMECA kết hợp với FTA

2. Đề tài thuộc diện: Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện

3. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

4. Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

- Dữ liệu từ các tạp chí đã công bố
- Dữ liệu từ một số công ty điện lực

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Phan Hữu Anh Minh	Đưa ra giải pháp dự đoán bảo trì cho máy biến áp ngâm dầu
2	Nguyễn Hoàng Giang	

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Phan Hữu Anh Minh	Xây dựng phương pháp FMECA, Weibull, mô phỏng thực nghiệm
2	Nguyễn Hoàng Giang	Xây dựng phương pháp FTA, xây dựng cây lỗi, vẽ lưu đồ

5. Các bản vẽ, đồ thị (ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ):

6. Người hướng dẫn

Họ tên người hướng dẫn:	Phần/ Nội dung:
TS. Nguyễn Kim Ánh	Toàn bộ đề án
ThS. Lê Hoài Sơn	

7. Ngày giao nhiệm vụ đề án: 24/2/2025

8. Ngày hoàn thành đề án: 15/6/2025

Đà Nẵng, ngày 15 tháng 06 năm 2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa Người hướng dẫn 1 Người hướng dẫn 2

TS. Giáp Quang Huy

TS. Nguyễn Kim Ánh

ThS. Lê Hoài Sơn

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

KHOA ĐIỆN

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Họ tên sinh viên 1: Phan Hữu Anh Minh

Số thẻ SV: 105200502

Họ tên sinh viên 2: Nguyễn Hoàng Giang

Số thẻ SV: 105200489

Tên đề tài ĐATN: Xây dựng chiến lược bảo trì máy biến áp ngâm dầu bằng phương pháp FMECA kết hợp với FTA

Họ tên người HD1: TS. Nguyễn Kim Ánh

Đơn vị: Khoa Điện, ĐHBK Đà Nẵng

Họ tên người HD2: ThS. Lê Hoài Sơn

Đơn vị: Công ty TNHH MTV Điện
Lực Đà Nẵng

Tuần	Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		Đã thực hiện (%)	Tiếp tục thực hiện (%)	
1	24/2- 2/3	Lựa chọn và nghiên cứu đề tài (100%).	(0%)	
2	3/3-9/3	Nghiên cứu tổng quan về máy biến áp, các dạng sự cố và nhu cầu bảo trì.(100%).	(0%)	
3	10/3-16/3	Tìm hiểu chuyên sâu các phương pháp: Phân tích cây lỗi (FTA), FMECA, phân phối Weibull. (100%).	(0%)	
4	17/3-23/3	Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
5	24/3-30/3	Xây dựng mô hình định tính cây lỗi (FTA), phân tích rủi ro theo FMECA với dữ liệu lỗi thực tế.(100%).	(0%)	
6	31/3-6/4	Áp dụng phân phối Weibull để ước lượng thời gian sống sót của từng thành phần.(100%).	(0%)	

7	7/4-13/4	Triển khai mô hình tính toán lịch bảo trì tối ưu dựa trên tích hợp FTA–FMECA–Weibull.(50%).	(0%)	
8	14/4-20/4	Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
9	21/4-27/4	Hoàn thiện phần mô hình định lượng và tính toán thời gian bảo trì dựa trên Weibull có điều chỉnh.(80%).	(0%)	
10	28/4-4/5	Viết báo cáo chương 2 và chương 3, tiến hành dựng lưu đồ thuật toán, biểu đồ R(t), cây lỗi định lượng.(100%).	(0%)	
11	5/5-11/5	Viết nội dung chương 4: đánh giá kết quả mô hình kết hợp FTA–FMECA–Weibull và phân tích hiệu quả bảo trì.(100%).	(0%)	
12	12/5-18/5	Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
13	19/5-25/5	Viết chương 5: kết luận, đề xuất hướng phát triển mô hình. Bổ sung minh họa mở rộng với AI (Random Forest).(100%).	(0%)	
14	26/5-1/6	Hiệu chỉnh toàn bộ nội dung báo cáo theo góp ý GVHD. Chuẩn hóa trích dẫn, hình vẽ, bảng biểu.(100%).	(0%)	
15	2/6-8/6	Hoàn thiện đồ án tốt nghiệp (70%).	(30%)	

LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Sau năm năm học tập và rèn luyện tại Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng, đồ án tốt nghiệp này đánh dấu một cột mốc quan trọng trong hành trình trưởng thành và hoàn thiện kiến thức của chúng em trên con đường đại học. Đây không chỉ đơn thuần là một sản phẩm học thuật, mà còn là kết quả của cả quá trình tích lũy tri thức, rèn luyện tư duy và thực hành khả năng ứng dụng lý thuyết vào thực tiễn.

Trong quá trình thực hiện đồ án với đề tài “Xây dựng chiến lược bảo trì máy biến áp ngâm dầu bằng phương pháp FMECA kết hợp với FTA”, nhóm đã nhận được sự hướng dẫn tận tình, những lời khuyên quý báu và sự động viên kịp thời từ quý thầy cô, bạn bè và gia đình. Đặc biệt, nhóm xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến thầy Nguyễn Kim Ánh, người đã luôn đồng hành, định hướng và hỗ trợ nhóm vượt qua những khó khăn trong suốt quá trình thực hiện đồ án.

Đây cũng là cơ hội để nhóm tổng hợp và kiểm chứng kiến thức đã học, đồng thời phát triển năng lực tư duy phản biện, phân tích và giải quyết vấn đề trong bối cảnh một dự án thực tế. Thông qua đó, chúng em càng nhận thức rõ hơn tầm quan trọng của việc gắn kết giữa lý thuyết và ứng dụng, giữa học thuật và thực tiễn sản xuất công nghiệp.

Nhóm cũng xin trân trọng cảm ơn TS. Nguyễn Kim Ánh giảng viên Bộ môn Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, cùng ThS. Lê Hoài Sơn, những người đã tận tâm hướng dẫn và hỗ trợ chúng em trong suốt quá trình thực hiện khóa luận. Bên cạnh đó, xin gửi lời tri ân chân thành đến quý thầy cô Trường Đại học Bách Khoa, đặc biệt là các thầy cô trong Bộ môn Tự động hóa, những người đã truyền đạt cho chúng em nền tảng kiến thức vững chắc cùng các kiến thức chuyên ngành, tạo điều kiện tốt nhất để nhóm học tập và trưởng thành.

Cuối cùng, nhóm xin chân thành cảm ơn gia đình và bạn bè thân thiết những người luôn đồng hành, sẻ chia và tiếp thêm động lực để chúng em vượt qua áp lực trong suốt quá trình học tập và thực hiện đồ án.

Vì thời gian hạn chế và kinh nghiệm thực tiễn còn khiêm tốn, chắc chắn đồ án vẫn còn nhiều thiếu sót. Nhóm rất mong nhận được sự góp ý và chỉ dẫn quý báu từ quý thầy cô để có thể hoàn thiện hơn trong tương lai, phục vụ tốt hơn cho công việc và con đường học tập phía trước.

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng tôi xin cam đoan rằng đề án tốt nghiệp với đề tài “Xây dựng chiến lược bảo trì máy biến áp ngâm dầu bằng phương pháp FMECA kết hợp với FTA” là nghiên cứu độc lập của chúng tôi với sự hỗ trợ từ giảng viên hướng dẫn TS. Nguyễn Kim Ánh và ThS. Lê Hoài Sơn (Công ty TNHH MTV Điện lực Đà Nẵng).

Chúng tôi xin cam đoan toàn bộ số liệu được cung cấp từ báo cáo đều là kết quả nghiên cứu hoàn toàn trung thực, không sao chép từ bất kỳ một công trình nghiên cứu khác nào. Những tài liệu trích dẫn đều đã được ghi rõ nguồn gốc.

Chúng tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm nếu có bất kỳ sự sao chép, gian dối kết quả nào trong sản phẩm đề án này.

Sinh viên thực hiện

Sinh viên thực hiện

Phạm Hữu Anh Minh

Nguyễn Hoàng Giang

MỤC LỤC

TÓM TẮT	ii
NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	iii
PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	v
DANH SÁCH HÌNH ẢNH.....	xi
DANH SÁCH BẢNG.....	xii
DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT	xiii
MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC CHIẾN LƯỢC BẢO TRÌ ĐỐI VỚI MÁY BIẾN ÁP NGÂM DẦU.....	3
1.1. Giới thiệu chung về cấu tạo của máy biến áp ngâm dầu.....	3
1.2. Các chế độ lỗi của máy biến áp ngâm dầu.....	3
1.2.1 Lỗi sắt	4
1.2.2 Cuộn dây.....	4
1.2.3 Thùng dầu	4
1.2.4 Cách điện rắn	5
1.2.5 Dầu máy biến áp	5
1.2.6 Sứ xuyên	6
1.3. Các cách tiếp cận khác nhau để bảo trì máy biến áp ngâm dầu	6
1.4. Kết luận	8
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN.....	9
2.1. Máy biến áp và nhu cầu của bảo trì dự đoán	9
2.2. Phương pháp phân tích cây lỗi	9
2.2.1. Phương pháp FTA	9
2.2.2. Cấu trúc cây lỗi và các ký hiệu chuẩn	10
2.2.3. Các bước xây dựng FTA	11
2.2.4. Phân tích định tính và định lượng FTA	12
2.2.5. Áp dụng kỹ thuật phân tích cây lỗi vào máy biến áp ngâm dầu.....	14

2.3. Phương pháp phân tích các chế độ hỏng hóc, ảnh hưởng và độ nghiêm trọng.....	14
2.3.1. Phương pháp FMECA	14
2.3.2. Các yếu tố về mức độ nghiêm trọng, tần suất lỗi và khả năng phát hiện lỗi.	15
2.3.3. Các bước xây dựng FMECA	17
2.3.4. Áp dụng kỹ thuật phân tích độ tin cậy vào máy biến áp ngâm dầu.....	18
2.4. Áp dụng phân phối Weibull trong đánh giá độ tin cậy	19
2.4.1. Phân phối Weibull	19
2.4.2. Hàm sống sót	20
2.4.3. Tham số hình dạng và tham số đặc trưng.....	21
2.4.4. Thời gian bảo trì tối ưu	23
2.4.5. Áp dụng phân phối Weibull vào dự đoán bảo trì máy biến áp ngâm dầu ...	24
2.5. Kết luận	25
CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH ĐỀ XUẤT	27
3.1. Phương pháp tiếp cận	27
3.2. Kết hợp FTA và FMECA	27
3.2.1. Quy trình thực hiện.....	28
3.2.2. Xây dựng FTA	29
3.2.3. Xây dựng FMECA.....	31
3.2.4. Tổng kết.....	42
3.3. Xác định thời gian bảo trì tối ưu bằng phân phối Weibull	42
3.3.1 Ước lượng thời điểm bảo trì	42
3.3.2. Hiệu chỉnh thời gian bảo trì theo FMECA bằng hệ số α	46
3.3.3. Lưu đồ và thuật toán	49
3.4. Phân tích cây lỗi định lượng.....	51
3.4.1 Gán xác suất cho các sự kiện cơ bản	52
3.4.2. Tính xác suất sự kiện đỉnh.....	52
3.4.3. Phân tích và nhận định.....	53
3.5. Mô hình bảo trì dự đoán tích hợp.....	54

3.6. Kết luận	56
CHƯƠNG 4: KIỂM NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ	57
4.1. Quá trình kiểm nghiệm.....	57
4.2 Phân tích kết quả.....	58
4.2.1 Lịch bảo trì dự đoán tối ưu cho máy biến áp ngâm dầu	58
4.2.2 Liên hệ với mô hình cây lỗi định tính.....	60
4.2.3 Phân tích lợi ích kinh tế	60
4.3 Độ nhạy của mô hình đề xuất.....	63
4.4 Kết luận	64
CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....	66
5.1. Kết luận chung.....	66
5.2. Hướng phát triển.....	67
TRÍCH DẪN	1

DANH SÁCH HÌNH ẢNH

Hình 2.1. Quy trình thực hiện phương pháp FMECA.....	18
Hình 3.1. Kết hợp FTA và FMECA.	29
Hình 3.2. Sơ đồ cây lỗi.....	30
Hình 3.3. Tỷ lệ lỗi của các thành phần.....	33
Hình 3.4. Lưu đồ lập lịch bảo trì dự đoán.	49
Hình 3.5. Các đường cong hàm sống sót của các thành phần máy biến áp ngâm dầu.....	51
Hình 3.6. Biểu đồ xác suất lỗi Intermediate event và Top event.	53
Hình 3.7. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 1 năm.	53
Hình 3.8. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 5 năm.	54
Hình 3.9. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 10 năm.	54
Hình 3.10. Mô hình bảo trì dự đoán đề xuất.	55
Hình 4.1. So sánh lợi ích kinh tế.	63
Hình 5.1. Ma trận nhầm lẫn mô hình Random Forest phân loại lỗi MOG_A.....	68
Hình 5.2: Mô phỏng cảnh báo lỗi thời gian thực khi xác suất lỗi vượt ngưỡng.	68

DANH SÁCH BẢNG

Bảng 2.1. Các loại cổng logic phổ biến trong FTA.....	11
Bảng 2.2. Đánh giá mức độ nghiêm trọng (S).....	16
Bảng 2.3. Đánh giá tần suất lỗi (O).	16
Bảng 2.4. Đánh giá khả năng phát hiện lỗi (D).....	16
Bảng 3.1. Chế độ hỏng hóc của các thành phần.....	30
Bảng 3.2. Dữ liệu hỏng hóc các thành phần của máy biến áp.....	32
Bảng 3.3. Mức độ nghiêm trọng S.	36
Bảng 3.4. Tần suất xảy ra lỗi O.	37
Bảng 3.5. Khả năng phát hiện lỗi (Detectability - D).....	38
Bảng 3.6. Tính toán RPN.....	39
Bảng 3.7. Tính toán CA.....	40
Bảng 3.8. Giá trị đặc trưng kiểu hỏng hóc β	43
Bảng 3.9. Thời gian trung bình giữa 2 lần hỏng hóc.....	44
Bảng 3.10. Các tham số tỷ lệ ước lượng của phân phối Weibull.	45
Bảng 3.11. Thời gian bảo trì tối ưu cho từng thành phần máy biến áp.	46
Bảng 3.12. Thời gian bảo trì hiệu chỉnh.	47
Bảng 3.13. Thời gian bảo trì tối ưu.	48
Bảng 3.14. Xác suất hỏng hóc của các thành phần máy biến áp theo thời gian.....	52
Bảng 3.15. Xác suất xảy ra lỗi hoàn toàn máy biến áp theo thời gian.	52
Bảng 4.1. Thời gian tổng hợp.....	59
Bảng 4.2. Lịch bảo trì tối ưu cuối cùng đề xuất.	59
Bảng 4.3. Ước tính chi phí sửa chữa cho mỗi sự cố hỏng hóc.....	61
Bảng 4.4. Ước tính chi phí khi ứng dụng FMECA.	61
Bảng 4.5. Ước tính chi phí khi ứng dụng FTA kết hợp FMECA cùng hàm phân phối Weibull.	62

DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Viết đầy đủ	Ý nghĩa
FTA	Fault Tree Analysis	Phân tích cây lỗi phương pháp mô hình hóa logic các nguyên nhân gây ra sự cố
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis	Phân tích chế độ hỏng hóc, ảnh hưởng và độ nghiêm trọng
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis	Phân tích chế độ hỏng hóc và ảnh hưởng (FMECA chưa bao gồm phân tích độ nghiêm trọng)
RPN	Risk Priority Number	Chỉ số ưu tiên rủi ro (tích số của: mức độ nghiêm trọng, tần suất, khả năng phát hiện)
CA	Criticality Analysis	Phân tích mức độ quan trọng ($S \times O$)
PDF	Probability Density Function	Hàm mật độ xác suất
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân phối xác suất tích lũy
SF hoặc R(t)	Survival Function	Hàm sống sót xác suất thiết bị còn hoạt động tại thời điểm t
PdM	Predictive Maintenance	Bảo trì dự đoán
CBM	Condition Based Maintenance	Bảo trì theo điều kiện
TBM	Time Based Maintenance	Bảo trì theo thời gian (bảo trì định kỳ)
MTBF	Mean Time Between Failures	Thời gian trung bình giữa hai lần hỏng
DFT	Dynamic Fault Tree	Cây lỗi động (có tính đến thứ tự và điều kiện sự kiện)
PAND	Priority AND Gate	Cổng AND ưu tiên (xảy ra theo thứ tự xác định)
DGA	Dissolved Gas Analysis	Phân tích khí hòa tan trong dầu phương pháp chẩn đoán tình trạng máy biến áp
PD	Partial Discharge	Phóng điện cục bộ chỉ báo suy giảm cách điện

DP	Degree of Polymerizatio	Độ polymer hóa chỉ số đánh giá độ bền của cách điện giấy
O&M	Operation and Maintenance	Vận hành và bảo trì
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Hệ thống giám sát và thu thập dữ liệu
RUL	Remaining Useful Life	Tuổi thọ còn lại (của thiết bị)

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong hệ thống điện lực hiện đại, máy biến áp ngâm dầu đóng vai trò thiết yếu trong việc truyền tải và phân phối năng lượng. Tuy nhiên, do phải làm việc trong điều kiện khắc nghiệt về điện, nhiệt và môi trường, thiết bị này thường xuyên đối mặt với nguy cơ hỏng hóc, ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy và tính liên tục của hệ thống điện. Thực tế cho thấy, các sự cố liên quan đến máy biến áp chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng số các sự cố lưới điện và thường gây thiệt hại nghiêm trọng về kinh tế và vận hành.

Mặc dù các chiến lược bảo trì truyền thống như bảo trì định kỳ (TBM) hay theo điều kiện (CBM) đã và đang được áp dụng, nhưng vẫn tồn tại những hạn chế về tính linh hoạt, chi phí và khả năng phát hiện lỗi sớm. Trong bối cảnh đó, việc phát triển một mô hình bảo trì dự đoán (PdM) có khả năng xác định chính xác thời điểm cần can thiệp kỹ thuật nhằm ngăn chặn sự cố xảy ra đã trở thành một hướng tiếp cận tối ưu.

Đề tài này được lựa chọn với mong muốn xây dựng một mô hình bảo trì dự đoán tích hợp giữa phân tích cây lỗi (FTA), phân tích chế độ hỏng hóc và độ nghiêm trọng (FMECA) và phân phối Weibull nhằm định danh các lỗi trọng yếu, lượng hóa rủi ro và xác định thời điểm bảo trì tối ưu trên cơ sở dữ liệu thực tế. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao tính chính xác trong bảo trì, mà còn góp phần tiết kiệm chi phí và tối ưu hiệu suất vận hành.

2. Mục tiêu đề tài

- Xây dựng mô hình bảo trì dự đoán cho máy biến áp ngâm dầu bằng cách tích hợp ba phương pháp: FTA, FMECA và phân phối Weibull.
- Xác định các lỗi cơ bản có khả năng gây sự cố nghiêm trọng thông qua phân tích cây lỗi.
- Lượng hóa rủi ro từng thành phần trong máy biến áp dựa trên chỉ số RPN từ FMECA.
- Tính toán thời điểm bảo trì tối ưu cho từng thành phần bằng phân phối Weibull, có hiệu chỉnh theo mức độ rủi ro thực tế.
- Đề xuất lịch bảo trì tối ưu và kiểm nghiệm tính khả thi của mô hình trên

3. Phạm vi đề tài

Đề tài tập trung vào các máy biến áp ngâm dầu sử dụng trong lưới điện phân phối, với dữ liệu đầu vào được thu thập từ hệ thống máy biến áp tại bang Punjab, Ấn Độ trong giai đoạn 2010–2015. Phân tích được thực hiện chủ yếu trên sáu thành phần quan trọng của máy biến áp, bao gồm lõi thép, cuộn dây, cách điện rắn, dầu cách điện, thùng dầu và sứ xuyên những bộ phận có xác suất hỏng hóc cao và tác động trực tiếp đến sự cố hệ thống. Mô hình được xây dựng dựa trên phương pháp luận định tính và định lượng, không tích hợp dữ liệu cảm biến thời gian thực, nhằm đảm bảo tính đơn giản và khả năng ứng dụng trong điều kiện thiếu hụt dữ liệu hiện trường.

4. Nội dung thực hiện

Nội dung của đề tài được chia thành 5 phần chính tương ứng với 5 chương trong báo cáo:

Chương 1: Tổng quan về các chiến lược bảo trì đối với máy biến áp ngâm dầu

Chương 2: Phương pháp luận

Chương 3: Mô hình đề xuất

Chương 4: Kiểm nghiệm và phân tích kết quả

Chương 5: Kết luận chung và hướng phát triển

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC CHIẾN LƯỢC BẢO TRÌ ĐỐI VỚI MÁY BIẾN ÁP NGÂM DẦU

1.1. Giới thiệu chung về cấu tạo của máy biến áp ngâm dầu

Máy biến áp ngâm dầu là một trong những thiết bị thiết yếu nhất trong hệ thống điện lực hiện đại. Với nguyên lý hoạt động dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ, máy biến áp thực hiện chức năng biến đổi điện áp giữa các cấp điện áp khác nhau, giúp tối ưu hóa hiệu suất truyền tải điện năng từ nhà máy phát điện đến các hộ tiêu thụ. Thiết bị này đóng vai trò trung gian trong việc điều chỉnh mức điện áp để giảm tổn thất công suất trong đường dây truyền tải và đảm bảo điện áp phù hợp tại điểm tiêu thụ cuối cùng. Máy biến áp ngâm dầu có vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ ổn định và an toàn cho hệ thống điện cao áp.

Một máy biến áp ngâm dầu điển hình bao gồm các bộ phận chính như lõi thép (core), cuộn dây (winding), dầu cách điện (oil), cách điện rắn (insulation), sứ xuyên (bushing) và thùng dầu (tank). Theo Tang và Wu [1], các thành phần này được thiết kế để đáp ứng cả yêu cầu về cách điện lẫn tản nhiệt. Lõi thép được ghép từ các lá thép kỹ thuật điện nhằm giảm tổn hao từ. Cuộn dây được quấn bằng dây dẫn cách điện, đảm nhận vai trò biến đổi điện áp giữa các cấp điện. Dầu cách điện và cách điện rắn (như giấy cách điện) vừa cách ly vừa làm mát. Ngoài ra, các thiết bị phụ trợ như ống sứ, đồng hồ nhiệt, và thiết bị cảnh báo áp suất đóng vai trò kiểm soát điều kiện vận hành.

Mặc dù được thiết kế với tuổi thọ cao (25–35 năm), các nghiên cứu đã chỉ ra rằng máy biến áp vẫn là một trong những nguyên nhân chính gây ra sự cố nghiêm trọng trong hệ thống điện. Theo Valyanskii [2], các yếu tố như lão hóa cách điện, vận hành quá tải, sét đánh, nhiệt độ cao, và suy giảm chất lượng dầu cách điện là những nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sự cố máy biến áp. Nếu không được phát hiện sớm, những lỗi này có thể gây ra đánh thủng cách điện, chạm vòng, cháy nổ, và mất điện trên diện rộng.

1.2. Các chế độ lỗi của máy biến áp ngâm dầu

Để thực hiện phân tích sự cố một cách toàn diện, theo [3] máy biến áp ngâm dầu được chia thành các thành phần chính, bao gồm các hệ thống từ (lõi thép, yoke và cấu trúc kẹp), hệ thống điện (cuộn dây và cách điện), và các bộ phận hỗ trợ khác như sứ xuyên, thùng dầu, dầu cách điện.

Mỗi thành phần của máy biến áp đều có thể gặp sự cố do các nguyên nhân khác nhau, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống. Việc xác định chính xác các chế độ hỏng hóc của từng thành phần là cơ sở để áp dụng phương pháp FTA và FMECA nhằm đánh giá rủi ro và đưa ra biện pháp bảo trì hiệu quả. Dưới đây là các thành phần chính của máy biến áp và các nguyên nhân hỏng hóc phổ biến liên quan đến chúng.

1.2.1 Lỗi sắt

Lỗi thép của máy biến áp mang từ trường và cung cấp độ bền cơ học cho máy biến áp. Lỗi thép có thể hỏng do hiện tượng từ hóa DC hoặc sự dịch chuyển của thép lõi trong quá trình chế tạo máy biến áp [3]. Theo nghiên cứu thống kê ở bài [4], các lỗi trong lõi thép chủ yếu do các vấn đề kết cấu cơ học trong giai đoạn ban đầu. Khi mức độ lỗi ngày càng nghiêm trọng, chúng có thể gây ảnh hưởng đến lực kẹp và cách điện của lõi thép, thậm chí dẫn đến các sự cố điện nghiêm trọng, chẳng hạn như hiện tượng tiếp đất nhiều điểm của lõi.

1.2.2 Cuộn dây

Chức năng của cuộn dây là mang dòng điện trong máy biến áp và chúng được sắp xếp thành các vỏ hình trụ xung quanh chân lõi, nơi mỗi sợi dây được quấn bằng vật liệu cách điện giấy. Ngoài áp lực điện dielectrics và yêu cầu nhiệt, cuộn dây còn phải chịu đựng các lực cơ học có thể gây ra sự dịch chuyển cuộn dây. Những lực này có thể xuất hiện trong trường hợp ngắn mạch và sét. Cuộn dây thường hỏng do ngắn mạch hoặc quá áp tạm thời. Ngắn mạch của cuộn dây có thể xảy ra do nhiều lý do, tức là lỗi cơ học trong cuộn dây trong quá trình chế tạo máy biến áp hoặc lỗi trong vật liệu cách điện, hoặc sự hình thành điểm nóng, hoặc sự tạo ra bùn, hoặc mức dầu thấp trong máy biến áp. Quá áp tạm thời có thể xảy ra do sét hoặc kết nối sai của máy biến áp hoặc ngắn mạch trong hệ thống LT [3,5].

Theo nghiên cứu ở bài [5], cuộn dây thường bị hỏng chủ yếu do ngắn mạch hoặc quá điện áp thoáng qua. Ngắn mạch trong cuộn dây có thể xảy ra do nhiều nguyên nhân, chẳng hạn như lỗi cơ học trong cuộn dây trong quá trình chế tạo máy biến áp, lỗi trong vật liệu cách điện, sự hình thành điểm nóng, sự tích tụ cặn đồng hồ sục mức dầu thấp trong máy biến áp. Quá điện áp thoáng qua có thể xảy ra do sét đánh, đấu nối sai của máy biến áp hoặc ngắn mạch trong hệ thống hạ áp (LT).

1.2.3 Thùng dầu

Thùng dầu bao bọc lõi và cuộn dây của máy biến áp, đóng vai trò bảo vệ vật lý và chứa dầu làm mát. Nó phải chịu được các tác động môi trường như bầu không khí ăn mòn, độ ẩm cao và bức xạ mặt trời. Thùng dầu được kiểm tra để phát hiện rò rỉ dầu, ăn mòn quá mức, móp méo và các dấu hiệu hư hỏng cơ học khác. Hiện tượng phóng điện bên trong máy biến áp dầu có thể ngay lập tức làm bay hơi dầu xung quanh, dẫn đến áp suất khí cao bên trong máy biến áp và làm vỡ thùng dầu [3].

Sự cố điện trong máy biến áp cách điện bằng dầu có thể dẫn đến hỏng thùng dầu, làm dầu cách điện tràn ra và ảnh hưởng đến các thiết bị lân cận. Do đó, cần đánh giá rủi ro phun trào dầu, đặc biệt ở các khu vực có mật độ thiết bị cao. Để giảm thiểu nguy cơ này, có thể áp dụng các biện pháp như: Di dời máy biến áp cách điện bằng dầu hoặc thay thế bằng máy biến áp khô, sử dụng thiết bị có vỏ bảo vệ, hạn chế sự xâm nhập của dầu vào các bộ phận điện. Bố trí thiết bị hợp lý, tránh các khe hở nằm trên đường xả dầu. Lắp đặt tấm chắn bắn tóe, máng hứng hoặc rào chắn bảo vệ, ngăn dầu tiếp xúc với các lỗ thông gió và linh kiện hở. Việc triển khai các biện pháp này giúp bảo vệ

thiết bị, giảm thiểu nguy cơ gián đoạn nguồn điện và nâng cao độ an toàn vận hành của hệ thống [6].

1.2.4 Cách điện rắn

Cách điện rắn, được làm từ các vật liệu có nguồn gốc từ cellulose như giấy cách điện và ván ép, đóng vai trò quan trọng trong việc cách điện giữa các cuộn dây của máy biến áp. Thành phần chính của cellulose là các chuỗi dài glucose, tuy nhiên, theo thời gian, các chuỗi này bị phân hủy, dẫn đến suy giảm tính chất cơ học. Độ bền của giấy cách điện được đánh giá thông qua độ polymer hóa (DP), biểu thị số lượng vòng glucose trung bình trong chuỗi. Theo nghiên cứu, giấy cách điện mới có DP từ 1200 đến 1400, trong khi $DP < 200$ đồng nghĩa với việc giấy đã bị suy giảm đáng kể về độ bền cơ học, có thể không còn đủ khả năng chịu đựng ngắn mạch và các ứng suất cơ học khác.

Cách điện rắn được xem là liên kết yếu nhất trong hệ thống cách điện tổng thể của máy biến áp. Do đó, để ngăn chặn các sự cố nghiêm trọng, việc hiểu rõ cơ chế hỏng hóc của cách điện là rất quan trọng. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng cách điện rắn có thể bị hư hại do rung động cơ học, tác động của quá trình ngắn mạch hoặc sự suy giảm theo thời gian. Ngoài ra, các lỗi phổ biến trong cách điện có thể xuất phát từ sự hình thành CuSO_4 , sự gia tăng nhiệt độ cục bộ (điểm nóng) do mức dầu thấp, hoặc tình trạng quá tải máy biến áp [3]. Theo nghiên cứu được chỉ ra trong bài [6] trong những trường hợp hỏng hóc như vậy, khả năng chịu đựng của cách điện máy biến áp cần được kiểm tra cùng với điện áp phóng của chống sét để đảm bảo phối hợp cách điện hợp lý. Nếu không được phát hiện và xử lý kịp thời, cách điện suy giảm có thể dẫn đến nhiều dạng chế độ hỏng hóc điện nghiêm trọng bao gồm: sét đánh, quá kích từ, quá điện áp do đóng cắt, cộng hưởng cuộn dây. Ngắn mạch giữa các vòng dây, ngắn mạch giữa các lớp. Phóng điện cục bộ, rò rỉ cách điện, tĩnh điện trong dầu, phóng điện bề mặt.

1.2.5 Dầu máy biến áp

Dầu máy biến áp cung cấp cách điện giữa các cuộn dây cùng với chức năng làm mát, đảm bảo hoạt động ổn định của máy biến áp. Dầu máy biến áp là một sản phẩm tinh chế cao từ dầu khoáng thô, bao gồm các thành phần hydrocarbon như paraffin, naphthalene và dầu thơm.

Sự cố của dầu cách điện xảy ra do hai nguyên nhân chính: (1) lỗi trong quá trình tuần hoàn dầu hoặc (2) khả năng truyền nhiệt kém đến mạch làm mát thứ cấp. Khi một trong hai vấn đề này xảy ra, độ nhớt của dầu trong máy biến áp sẽ tăng lên, gây ra tình trạng quá nhiệt trong mạch làm mát, đặc biệt ở khu vực tản nhiệt. Độ ẩm và oxy kết hợp với nhiệt là nguyên nhân chính gây ô nhiễm dầu, dẫn đến sự hình thành các hạt dẫn điện bên trong dầu cách điện. Quá trình này làm giảm khả năng cách điện của dầu, khiến điện áp phóng của dầu suy giảm đáng kể, từ đó làm tăng nguy cơ ngắn mạch và có thể gây ra sự cố nghiêm trọng cho máy biến áp [6].

Độ ẩm và oxy kết hợp với nhiệt là nguyên nhân chính gây ô nhiễm dầu, dẫn đến sự hình thành các hạt dẫn điện bên trong dầu cách điện. Quá trình này làm giảm khả năng cách điện của dầu, khiến điện áp phóng của dầu suy giảm đáng kể, từ đó làm tăng nguy cơ ngắn mạch và có thể gây ra sự cố nghiêm trọng cho máy biến áp [6].

Trong những trường hợp hỏng hóc như vậy, khả năng chịu đựng của cách điện dầu cần được kiểm tra cùng với điện áp phóng của chống sét, nhằm đảm bảo phối hợp cách điện đúng cách và duy trì độ tin cậy vận hành của hệ thống.

1.2.6 Sứ xuyên

Sứ xuyên được sử dụng để đưa các đầu nối cuộn dây ra ngoài bồn chứa, đồng thời đảm bảo cách điện để kết nối máy biến áp với hệ thống điện. Các loại sứ xuyên thường được sử dụng bao gồm sứ xuyên rắn và sứ xuyên phân cực. Sứ xuyên rắn có một dây dẫn trung tâm và được cách điện bằng sứ hoặc epoxy xung quanh [3].

Nguyên nhân chính gây ra sự cố của sứ xuyên là ngắn mạch. Điều này có thể xuất phát từ lỗi vật liệu trong cách điện hoặc hư hỏng cơ học. Hư hỏng có thể xảy ra do phá hoại, trong quá trình vận chuyển, hoặc do các mảnh vỡ từ thiết bị bị hỏng khác bắn vào. Các vết nứt trên sứ, gioăng kém chất lượng hoặc bị hỏng có thể tạo điều kiện nước xâm nhập vào bên trong lớp cách điện, dẫn đến sự cố nghiêm trọng của sứ xuyên. Khi cách điện bị suy giảm, điện áp đánh thủng giảm, làm tăng nguy cơ phóng điện bề mặt, rò rỉ dòng điện và cuối cùng có thể dẫn đến hỏng hóc toàn bộ máy biến áp [6].

1.3. Các cách tiếp cận khác nhau để bảo trì máy biến áp ngâm dầu

Trong hệ thống điện lực hiện đại, máy biến áp ngâm dầu là thiết bị có vai trò cực kỳ quan trọng, đảm nhận chức năng biến đổi và truyền tải điện năng giữa các cấp điện áp. Do đó, việc xây dựng chiến lược bảo trì phù hợp không chỉ góp phần đảm bảo độ tin cậy và tính liên tục trong cung cấp điện mà còn tối ưu hóa hiệu quả kinh tế trong vận hành. Theo thời gian, các cách tiếp cận bảo trì đã dần phát triển từ những phương pháp truyền thống đến các mô hình tiên tiến dựa trên dữ liệu và phân tích xác suất.

Phương pháp bảo trì theo thời gian vận hành TBM (Time Based Maintenance) là hướng tiếp cận đơn giản và phổ biến trong quá khứ, trong đó các hoạt động kiểm tra hoặc thay thế được tiến hành theo một chu kỳ cố định, không phụ thuộc vào tình trạng thực tế của thiết bị. Mặc dù dễ thực hiện, nhưng theo theo Javanmard [7], TBM thường dẫn đến chi phí bảo trì cao do các linh kiện bị thay thế theo chu kỳ cố định mà không xét đến mức độ suy giảm thực tế, khiến phần lớn thiết bị bị thay thế khi vẫn còn khả năng sử dụng.

Trong bối cảnh những hạn chế của phương pháp bảo trì theo lịch định kỳ TBM ngày càng bộc lộ rõ, đặc biệt là việc không phản ánh được tình trạng thực tế của thiết bị, các chiến lược bảo trì hiện đại đã bắt đầu chuyển hướng sang phương pháp dựa trên giám sát tình trạng thực. Trên nền tảng phát triển của công nghệ cảm biến và khả năng xử lý

dữ liệu thời gian thực, bảo trì theo điều kiện CBM (Condition Based Maintenance) đã ra đời như một giải pháp cải tiến. Phương pháp này cho phép giám sát liên tục các thông số vận hành quan trọng của máy biến áp như rung động, nhiệt độ, dòng rò hay phóng điện cục bộ, từ đó đánh giá trực tiếp mức độ suy giảm của thiết bị. Hoạt động bảo trì chỉ được thực hiện khi các chỉ số giám sát vượt qua ngưỡng giới hạn định sẵn, nhờ đó nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên so với cách tiếp cận định kỳ. Theo Tian [8], việc triển khai CBM giúp cân bằng giữa hai mục tiêu mâu thuẫn là tối thiểu hóa chi phí bảo trì và tối đa hóa độ tin cậy của hệ thống, thông qua việc sử dụng dữ liệu cảm biến để ước lượng chính xác xác suất hỏng hóc. Tuy nhiên, bên cạnh những lợi ích rõ rệt, CBM cũng đòi hỏi hệ thống cảm biến đồng bộ, hạ tầng thu thập dữ liệu đáng tin cậy và năng lực xử lý phân tích tương đối phức tạp. Thực tiễn triển khai tại các hệ thống thiết bị công nghiệp cũng cho thấy khó khăn trong việc lựa chọn ngưỡng cảnh báo tối ưu và tích hợp dữ liệu vào quy trình ra quyết định bảo trì một cách tự động và hiệu quả.

Bảo trì dự đoán (Predictive Maintenance – PdM) là bước phát triển cao hơn, được xem là cách tiếp cận tối ưu trong các chiến lược bảo trì hiện đại. Khác với các phương pháp trước, PdM không chỉ phản ánh tình trạng hiện tại mà còn đưa ra dự báo chính xác về thời điểm có khả năng xảy ra hỏng hóc trong tương lai. Bằng cách này, người vận hành có thể chủ động lập kế hoạch can thiệp tại thời điểm hợp lý nhất khi thiết bị bắt đầu suy giảm nhưng chưa vượt quá giới hạn an toàn. Nhờ đặc tính đó, bảo trì dự đoán giúp tối ưu chi phí vận hành, giảm thiểu thời gian dừng máy không mong muốn và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Ngoài ra, phương pháp này còn tạo nền tảng cho các hệ thống ra quyết định bảo trì tự động dựa trên mô hình học máy và trí tuệ nhân tạo.

Việc triển khai bảo trì dự đoán có thể dựa trên hai loại dữ liệu chính: tín hiệu thời gian thực và dữ liệu lịch sử. Trong trường hợp hệ thống được trang bị các cảm biến theo dõi liên tục, phương pháp này thường đi kèm với các kỹ thuật phân tích rung động, ảnh nhiệt, phát hiện phóng điện cục bộ hoặc phân tích thành phần khí trong dầu cách điện. Kết quả thu được sẽ được xử lý bằng các thuật toán học máy, từ đó dự đoán tuổi thọ còn lại (Remaining Useful Life – RUL) của thiết bị với độ chính xác cao.

Ngược lại, trong nhiều trường hợp thực tế đặc biệt là tại các đơn vị chưa có hệ thống giám sát hiện trường dữ liệu cảm biến không sẵn có. Khi đó, bảo trì dự đoán vẫn có thể được áp dụng thông qua phân tích thống kê và mô hình hóa xác suất. Một số kỹ thuật nổi bật có thể kể đến như: phân tích cây lỗi (Fault Tree Analysis – FTA), giúp mô hình hóa mối liên hệ giữa các nguyên nhân tiềm ẩn và sự cố hệ thống; phân tích FMECA, cung cấp cơ sở định lượng để phân loại và xếp hạng mức độ nghiêm trọng của từng chế độ hỏng; hay hàm sinh tồn trong phân phối Weibull, cho phép ước lượng tuổi thọ của thiết bị và xác suất hư hỏng theo thời gian. Ngoài ra, các mô hình xác suất như mạng Bayes hay chuỗi Markov rời rạc cũng đang được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu bảo trì nhằm đánh giá chuyển tiếp trạng thái thiết bị và dự đoán hành vi hỏng hóc trong điều kiện không chắc chắn. Điển hình Appoh [9] đã trình bày một mô hình bảo trì dự đoán tích hợp FTA, FMECA và phân tích xác suất để tối ưu hóa độ tin cậy và chi phí bảo trì cho hệ thống tàu điện, cho thấy tính ứng dụng cao của cách tiếp cận này trong môi trường công nghiệp thực tế.

1.4. Kết luận

Trong chương này, các kiến thức nền tảng liên quan đến cấu tạo, chế độ lỗi và các phương pháp bảo trì máy biến áp ngâm dầu đã được trình bày một cách toàn diện. Với vai trò then chốt trong hệ thống điện lực, máy biến áp ngâm dầu không chỉ đòi hỏi độ ổn định cao mà còn cần được bảo trì một cách tối ưu để giảm thiểu rủi ro sự cố và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Qua phân tích các chế độ lỗi của từng bộ phận như lõi thép, cuộn dây, cách điện, thùng dầu và sứ xuyên, có thể thấy rằng sự suy giảm về mặt cơ học và điện môi theo thời gian là nguyên nhân chính gây ra hỏng hóc nghiêm trọng. Từ đó, việc lựa chọn chiến lược bảo trì phù hợp là yếu tố mang tính quyết định trong việc nâng cao độ tin cậy vận hành.

Ba hướng tiếp cận bảo trì chính gồm: bảo trì theo lịch định kỳ (TBM), bảo trì theo điều kiện (CBM) và bảo trì dự đoán (PdM) đã được so sánh và đánh giá. Trong khi TBM có ưu điểm đơn giản nhưng bộc lộ nhiều hạn chế về mặt kinh tế và hiệu quả, thì CBM và PdM thể hiện rõ ưu thế trong việc tận dụng dữ liệu vận hành để đưa ra quyết định bảo trì chính xác hơn. Đặc biệt, bảo trì dự đoán được đánh giá là bước tiến vượt trội, khi không chỉ phản ánh hiện trạng mà còn có khả năng ước lượng xác suất hỏng hóc tương lai thông qua các mô hình phân tích như FTA, FMECA, Weibull, Markov hoặc học máy.

Cụ thể trong đề án này chúng tôi áp dụng một mô hình bảo trì dự đoán kết hợp giữa các công cụ phân tích kỹ thuật, quá trình triển khai bắt đầu từ việc xây dựng cây lỗi FTA theo hướng định tính để xác định các nguyên nhân gốc rễ dẫn đến sự cố tổng thể của máy biến áp. Sau đó, các lỗi cơ bản từ cây FTA được chuyển sang phân tích FMECA để đánh giá tần suất xảy ra, mức độ nghiêm trọng và khả năng phát hiện. Trên cơ sở đó, mỗi chế độ hỏng được gán một giá trị RPN nhằm xác định mức độ ưu tiên bảo trì. Tiếp theo, thời điểm bảo trì được xác định thông qua mô hình Weibull, sau đó được hiệu chỉnh theo hệ số rủi ro RPN để cho tra thời gian bảo trì tối ưu cuối cùng đảm bảo sự phù hợp với điều kiện vận hành thực tế và mục tiêu giảm thiểu thiệt hại kinh tế. Mặt khác từ các thông số trong phân phối Weibull chúng tôi tính toán để áp dụng vào các thành phần định tính trong FTA để xây dựng ra một cây lỗi FTA hoàn chỉnh về cả định tính lẫn định lượng. Phương pháp này không chỉ mang tính hệ thống chặt chẽ mà còn có khả năng tùy biến cao, cho phép áp dụng linh hoạt cho nhiều loại máy biến áp và điều kiện làm việc khác nhau.

Trong phần tiếp theo, chúng tôi sẽ trình bày chi tiết phương pháp luận được sử dụng trong nghiên cứu, bao gồm nội dung và các bước thực hiện cụ thể của ba công cụ chính: phân tích cây lỗi (Fault Tree Analysis – FTA), phân tích chế độ lỗi và mức độ nghiêm trọng và phân phối Weibull. Đây là những phương pháp cốt lõi trong việc xây dựng mô hình bảo trì dự đoán, không chỉ giúp định danh và lượng hóa rủi ro hỏng hóc mà còn hỗ trợ xác định thời điểm tối ưu để can thiệp kỹ thuật. Các nội dung được trình bày sẽ làm rõ cả khía cạnh lý thuyết nền tảng lẫn cách áp dụng thực tiễn, nhằm tạo nền móng vững chắc cho quá trình mô phỏng và đề xuất kế hoạch bảo trì trong các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

2.1. Máy biến áp và nhu cầu của bảo trì dự đoán

Máy biến áp là một thiết bị tĩnh dùng để truyền năng lượng từ mạch điện này sang mạch điện khác thông qua hiện tượng cảm ứng điện từ. Đây là một trong những thành phần quan trọng nhất trong hệ thống điện, đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp điện liên tục đến người tiêu dùng; do đó, máy biến áp phải có độ tin cậy và hiệu suất cao.

Sự cố máy biến áp không chỉ dẫn đến chi phí sửa chữa hoặc thay thế lớn mà còn gây ra các đợt mất điện ngoài kế hoạch, làm giảm độ tin cậy của hệ thống và gây tổn thất doanh thu nghiêm trọng cho các công ty điện lực. Theo Murugan và Ramasamy [10], những sự cố này có thể gây gián đoạn nghiêm trọng trong hoạt động, kéo dài thời gian ngừng thiết bị và làm ảnh hưởng xấu đến uy tín của các công ty điện lực do sự không hài lòng từ khách hàng. Những hậu quả này cho thấy nhu cầu cấp thiết về các chiến lược bảo trì hiệu quả hơn nhằm đảm bảo vận hành ổn định và không bị gián đoạn của lưới điện.

2.2. Phương pháp phân tích cây lỗi

2.2.1. Phương pháp FTA

Phân tích cây lỗi (Fault Tree Analysis – FTA) là một phương pháp phân tích định hướng theo sự kiện đầu ra (top-down), nhằm truy ngược nguyên nhân gây ra một sự cố hệ thống bằng cách sử dụng các biểu đồ logic. Phương pháp này được phát triển bởi Bell Laboratories vào thập niên 1960 và ngày nay đã trở thành tiêu chuẩn công nghiệp trong nhiều lĩnh vực như điện lực, hàng không, năng lượng hạt nhân và quốc phòng.

FTA khởi đầu với một sự kiện đỉnh (Top Event) thường là một sự cố hệ thống nghiêm trọng sau đó được phân rã thành các sự kiện trung gian và sự kiện cơ bản (Basic Events) thông qua các cổng logic như AND, OR, INHIBIT. Mỗi nhánh của cây thể hiện một chuỗi nguyên nhân dẫn đến sự kiện phía trên. Mô hình cây lỗi cho phép đánh giá cả theo hướng định thông qua việc xác định các tập cắt tối, và định lượng nếu các xác suất xảy ra của sự kiện cơ bản được biết trước.

Theo “Fault Tree Handbook with Aerospace Applications” [11], FTA giúp xác định các điểm yếu then chốt trong hệ thống, nơi mà chỉ cần cải thiện một số yếu tố nhỏ cũng có thể giảm thiểu rủi ro tổng thể. FTA cũng có khả năng kết hợp hiệu quả với các công cụ khác như FMECA và phân phối Weibull để xây dựng một mô hình bảo trì toàn diện. Trong các hệ thống có hành vi thay đổi theo thời gian hoặc mang tính động, FTA có thể được mở rộng thành Dynamic Fault Tree (DFT) với các cổng đặc biệt như Priority AND, Functional Dependency (FDEP), Spare Gates... Những mở rộng này cho phép mô tả chính xác hơn các tình huống phụ thuộc thứ tự hoặc điều kiện xảy ra sự kiện đặc

biệt trong các hệ thống có cơ chế dự phòng. Theo Peican Zhu và cộng sự [12] các cây lỗi động giúp cải thiện đáng kể độ chính xác khi đánh giá các hệ thống kỹ thuật thực tế, nơi sự cố không diễn ra độc lập mà có yếu tố tương quan theo thời gian.

Bên cạnh đó, FTA cũng được tiêu chuẩn hóa chi tiết trong IEC 6102 [13], trong đó định nghĩa rõ các loại cổng logic, cách biểu diễn sơ đồ cây lỗi, và các bước thực hiện phân tích theo chuẩn quốc tế. Tiêu chuẩn này đóng vai trò hướng dẫn thực hành quan trọng, đảm bảo tính đồng bộ trong triển khai và truyền thông giữa các bên liên quan trong vận hành hệ thống kỹ thuật.



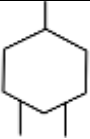


Tổng kết, FTA là công cụ mạnh để phân tích nguyên nhân gốc rễ của sự cố, định hướng ưu tiên kiểm soát rủi ro và thiết kế lại hệ thống hợp lý hơn. Trong nghiên cứu này, FTA đóng vai trò là lớp đầu tiên trong mô hình bảo trì dự đoán, làm nền tảng cho bước phân tích định lượng rủi ro bằng FMECA và ước lượng thời điểm bảo trì tối ưu bằng phân phối Weibull.

2.2.2. Cấu trúc cây lỗi và các ký hiệu chuẩn

Cây lỗi (fault tree) là một biểu đồ dạng cây mô tả mối quan hệ logic giữa các nguyên nhân gốc rễ và một sự kiện đầu ra trong hệ thống. Theo tiêu chuẩn IEC 61025 [13], một cây lỗi hoàn chỉnh bao gồm các thành phần cơ bản sau:

- Sự kiện đầu ra (Top Event): là sự cố mà ta cần phân tích, chẳng hạn như “hỏng máy biến áp”, “mất điện hệ thống”, v.v.
- Các sự kiện trung gian (Intermediate Events): là kết quả của một hoặc nhiều sự kiện con được kết nối thông qua các cổng logic.
- Sự kiện cơ bản (Basic Events): là nguyên nhân trực tiếp, không thể phân rã thêm trong phạm vi phân tích, thường được gán xác suất hỏng.
- Cổng logic (Logic Gates): là phần tử trung gian kết nối các sự kiện con với sự kiện cha, thể hiện quan hệ logic giữa chúng.
- Cơ sở dữ liệu sự kiện: chứa thông tin xác suất hoặc thống kê về từng sự kiện cơ bản để phục vụ phân tích định lượng.

Bảng 2.1. Các loại cổng logic phổ biến trong FTA.

Loại cổng	Tên gọi	Ký hiệu	Ý nghĩa logic
AND	Cổng hội		Sự kiện đầu xảy ra chỉ khi tất cả các sự kiện con xảy ra
OR	Cổng tuyển		Sự kiện đầu xảy ra khi ít nhất một sự kiện con xảy ra
INHBIT	Cổng ức chế		Sự kiện đầu xảy ra nếu sự kiện điều kiện đi kèm với một sự kiện cụ thể.
EXCLUSIVE OR	Cổng hoặc độc quyền		Xảy ra chính xác một trong các sự kiện con
PAND	Cổng AND ưu tiên		Giống AND nhưng các sự kiện phải xảy ra theo thứ tự xác định

Việc áp dụng đúng các ký hiệu trong xây dựng cây lỗi không chỉ đảm bảo tính trực quan, nhất quán trong diễn giải mô hình, mà còn giúp việc trao đổi giữa các nhóm kỹ sư và sử dụng các công cụ phần mềm chuyên dụng trở nên thuận lợi hơn. Ngoài ra, khi triển khai phân tích định lượng, các ký hiệu chuẩn còn giúp liên kết hiệu quả với dữ liệu xác suất và các thuật toán đánh giá rủi ro.

Điều quan trọng không kém là việc tổ chức cấu trúc cây lỗi phải phản ánh được đầy đủ logic hệ thống, tránh bỏ sót các mối quan hệ nhân quả trọng yếu. Để làm được điều đó, người phân tích cần tuân thủ đúng trình tự các bước xây dựng cây lỗi, từ xác định đúng sự kiện đỉnh, phân tích chức năng hệ thống, đến việc sử dụng chính xác các cổng logic theo đặc điểm vận hành thực tế.

2.2.3. Các bước xây dựng FTA

Việc xây dựng cây lỗi (Fault Tree) là một quá trình có hệ thống, trong đó người phân tích phải lần lượt xác định, mô hình hóa và đánh giá các nguyên nhân tiềm ẩn dẫn đến một sự cố lớn trong hệ thống. Theo tiêu chuẩn IEC 61025 [13], quy trình phân tích cây lỗi thường bao gồm ba giai đoạn chính: xác định phạm vi phân tích, phát triển cấu trúc cây lỗi, và đánh giá kết quả phân tích.

Giai đoạn đầu tiên là xác định rõ sự kiện đỉnh (Top Event) sự cố tổng thể cần được phân tích, chẳng hạn như “hỏng máy biến áp”. Việc lựa chọn Top Event phải dựa trên mức độ nghiêm trọng và tính chất then chốt của sự kiện trong toàn hệ thống. Sau khi đã xác định được đối tượng chính, người phân tích cần nghiên cứu kỹ cấu trúc và nguyên lý vận hành của hệ thống liên quan, từ đó xác định các lỗi trực tiếp có thể dẫn đến Top Event. Đó có thể là các sự cố chức năng ở mức thiết bị, thành phần, hoặc tổ hợp các điều kiện bất lợi xảy ra đồng thời.

Giai đoạn tiếp theo là phát triển cây lỗi, theo nguyên tắc từ trên xuống. Mỗi sự kiện cha sẽ được phân rã thành các nguyên nhân con thông qua các cổng logic như AND, OR hoặc INHIBIT, tùy theo mối quan hệ nhân quả giữa các phần tử. Trong trường hợp các lỗi chỉ gây ra sự cố khi cùng lúc xảy ra, cổng AND sẽ được sử dụng; ngược lại, nếu chỉ cần một trong các nguyên nhân là đủ, thì cổng OR là phù hợp hơn. Quá trình này tiếp tục được thực hiện cho đến khi toàn bộ hệ thống được mô hình hóa thành các sự kiện cơ tức những nguyên nhân gốc không thể phân rã tiếp trong phạm vi phân tích.

Ở giai đoạn đánh giá, cây lỗi có thể được phân tích theo hai hướng: định tính hoặc định lượng. Phân tích định tính giúp xác định các tập cắt tối thiểu (Minimal Cut Sets), là các tổ hợp lỗi nhỏ nhất có khả năng gây ra Top Event, từ đó hỗ trợ xác định điểm yếu hệ thống và thứ tự ưu tiên xử lý. Trong khi đó, phân tích định lượng yêu cầu người phân tích phải gán xác suất xảy ra cho từng sự kiện cơ bản, dựa trên dữ liệu thực nghiệm, phân phối xác suất hoặc dữ liệu lịch sử hỏng hóc. Theo IEC 61025 [13], đây là một bước hợp lệ và được khuyến khích nếu có đủ dữ liệu định lượng, cho phép tính toán xác suất tổng thể của sự cố đầu ra thông qua các quy tắc tổ hợp xác suất tương ứng với cấu trúc logic.

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, phương pháp FTA trước hết được áp dụng để xây dựng mô hình định tính, nhằm xác định và hệ thống hóa các nguyên nhân gốc có khả năng dẫn đến sự cố máy biến áp. Sau đó, khi các tham số Weibull đã được xác định cho từng thành phần từ dữ liệu MTBF thực tế, quá trình phân tích được mở rộng sang định lượng bằng cách tính xác suất xảy ra của từng sự kiện cơ bản tại một thời điểm xác định. Những xác suất này sau đó được gán vào cây lỗi để tính xác suất xảy ra sự cố đỉnh, qua đó cung cấp góc nhìn định lượng cho toàn bộ hệ thống thiết bị.

Việc kết hợp giữa định tính và định lượng như vậy không chỉ giúp nhận diện nguyên nhân rủi ro một cách có hệ thống mà còn giúp lượng hóa khả năng xảy ra sự cố tổng thể, từ đó tạo cơ sở dữ liệu đầu vào quan trọng cho các bước phân tích FMECA và tối ưu hóa bảo trì bằng mô hình Weibull ở các chương tiếp theo.

2.2.4. Phân tích định tính và định lượng FTA

Phân tích cây lỗi FTA là một phương pháp có khả năng áp dụng ở cả hai cấp độ: định tính và định lượng. Ở cấp độ định tính, FTA được sử dụng để xây dựng sơ đồ logic

phản ánh mối quan hệ nguyên nhân hậu quả giữa các sự kiện, bắt đầu từ sự cố tổng thể (Top Event) và truy ngược đến các nguyên nhân gốc rễ. Việc sử dụng các cổng logic như AND, OR, INHIBIT trong cây lỗi cho phép mô hình hóa chính xác các tương tác kỹ thuật bên trong hệ thống, giúp nhận diện các chuỗi sự kiện có khả năng gây ra sự cố nghiêm trọng. Đây là cách tiếp cận phổ biến trong giai đoạn đầu của phân tích an toàn và được áp dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp có tính rủi ro cao như năng lượng, hàng không và điện lực.

Ở cấp độ định lượng, FTA tiến thêm một bước bằng cách gán xác suất xảy ra cho từng sự kiện cơ bản trong cây lỗi. Khi đó, dựa trên cấu trúc logic của cây, ta có thể tính toán được xác suất xảy ra của sự kiện đỉnh thông qua các nguyên tắc tổ hợp xác suất. Việc này cho phép đánh giá mức độ rủi ro định lượng của toàn hệ thống, từ đó hỗ trợ các quyết định về phân bổ nguồn lực bảo trì, thiết kế dự phòng, hoặc cải tiến hệ thống. Trong thực tế, phân tích định lượng FTA đặc biệt hữu ích khi có đủ dữ liệu lịch sử hoặc thông tin thống kê đáng tin cậy chẳng hạn như xác suất hỏng được tính từ phân phối Weibull dựa trên thông số η , β .

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, trước hết được sử dụng theo hướng định tính để xác định các lỗi cơ bản của máy biến áp, từ đó cung cấp cơ sở cho phân tích FMECA và mô hình Weibull. Sau khi tính được xác suất hỏng của từng lỗi thành phần theo phân phối Weibull, nghiên cứu cũng thực hiện mở rộng định lượng FTA bằng cách gán các xác suất đó vào cây lỗi, từ đó tính xác suất xảy ra Top Event. Việc kết hợp cả hai cấp độ phân tích này không chỉ nâng cao độ chính xác của mô hình mà còn đảm bảo rằng các quyết định bảo trì được hỗ trợ bởi cả logic hệ thống và số liệu thực nghiệm.

Tuy vậy, phương pháp FTA cũng có những hạn chế nhất định. Một trong số đó là việc xây dựng cây lỗi có thể trở nên phức tạp và dễ xảy ra sai sót khi hệ thống có quá nhiều thành phần hoặc tương tác phức tạp. Bên cạnh đó, FTA truyền thống chỉ mô tả các mối quan hệ logic tĩnh mà không thể hiện được các yếu tố động như thứ tự xảy ra lỗi hoặc sự phụ thuộc thời gian. Theo nghiên cứu của CUI và LI [14], việc áp dụng FTA cổ điển vào các hệ thống động nếu không có cơ chế mở rộng như Dynamic Fault Tree (DFT) có thể dẫn đến đánh giá sai về mức độ rủi ro.

Ngoài ra, phân tích định lượng FTA đòi hỏi dữ liệu đầu vào có độ tin cậy cao. Nếu dữ liệu xác suất không được xác lập từ thực tế hoặc có độ lệch lớn do chủ quan, kết quả đánh giá có thể không phản ánh đúng mức độ nguy hiểm, dẫn đến quyết định bảo trì sai lệch hoặc thiếu hiệu quả.

Tuy nhiên, trong các hệ thống kỹ thuật như máy biến áp nơi các thành phần có thể được phân tích riêng biệt và dữ liệu thống kê lịch sử vận hành thường sẵn có FTA vẫn là công cụ hữu hiệu để khởi đầu cho chuỗi phân tích dự đoán. Việc kết hợp định tính và định lượng giúp mô hình bảo trì không chỉ dựa vào logic kỹ thuật mà còn phản ánh

được xác suất hư hỏng thực tế, tăng tính khả thi và độ tin cậy trong ứng dụng công nghiệp.

2.2.5. Áp dụng kỹ thuật phân tích cây lỗi vào máy biến áp ngâm dầu

Máy biến áp là một thiết bị quan trọng trong hệ thống điện, có cấu trúc phức tạp và gồm nhiều thành phần có khả năng hỏng hóc riêng biệt. Chính vì vậy, việc áp dụng phương pháp phân tích cây lỗi vào đối tượng này là một bước khởi đầu hợp lý để nhận diện các nguyên nhân gốc rễ có thể dẫn đến sự cố nghiêm trọng.

Trong nghiên cứu này, FTA được triển khai nhằm mô hình hóa logic hỏng hóc của máy biến áp phân phối. Sự kiện đỉnh (Top Event) được xác định là “máy biến áp ngừng hoạt động hoàn toàn” (Transformer Failure). Từ đó, cây lỗi được xây dựng dựa trên cấu trúc thực tế và tài liệu kỹ thuật, bao gồm các nhánh nguyên nhân liên quan đến các thành phần như cuộn dây, lõi thép, dầu cách điện, cách điện rắn, thùng dầu và sứ xuyên. Các quan hệ nguyên nhân kết quả được biểu diễn thông qua các cổng logic chuẩn hóa theo IEC 61025 [13], trong đó phần lớn các sự kiện được kết nối theo kiểu OR phản ánh rằng chỉ cần một thành phần bị hỏng cũng có thể gây ra sự cố tổng thể.

Khác với các nghiên cứu chỉ dừng lại ở mức định tính, FTA trong đề tài này còn được mở rộng theo hướng định lượng. Sau khi mô hình Weibull được áp dụng cho từng thành phần trong hệ thống – dựa trên dữ liệu thực nghiệm và thống kê MTBF xác suất xảy ra của từng sự kiện cơ bản được tính toán trong một khoảng thời gian cụ thể (ví dụ: 10 năm vận hành). Các xác suất này được gán vào các nút cuối trong cây lỗi để tính xác suất xảy ra của Top Event theo nguyên tắc tổ hợp xác suất của các cổng logic.

Phân tích định lượng này giúp xác định được xác suất hỏng tổng thể của máy biến áp trong từng mốc thời gian, đồng thời hỗ trợ đánh giá mức độ nguy hiểm tương đối giữa các nhánh lỗi. Nhờ vậy, ta không chỉ biết “những lỗi nào có thể gây hỏng máy biến áp” (như ở bước định tính), mà còn biết được “lỗi nào có xác suất cao nhất cần được ưu tiên xử lý” đây là thông tin quan trọng để phối hợp với phân tích FMECA trong bước tiếp theo.

FTA trong nghiên cứu cũng cho thấy vai trò như một cầu nối quan trọng: từ khung nguyên nhân hậu quả mang tính logic, nó cung cấp đầu vào đầy đủ cho cả hai nhánh phân tích định lượng bằng Weibull và rủi ro bằng RPN trong FMECA. Nhờ vậy, toàn bộ mô hình bảo trì dự đoán không chỉ có tính hệ thống mà còn đảm bảo cả chiều rộng (bao phủ nguyên nhân) và chiều sâu (lượng hóa xác suất và mức độ rủi ro).

2.3. Phương pháp phân tích các chế độ hỏng hóc, ảnh hưởng và độ nghiêm trọng

2.3.1. Phương pháp FMECA

Trong bối cảnh các hệ thống kỹ thuật ngày càng phức tạp và yêu cầu bảo trì dự đoán ngày càng khắt khe, phân tích chế độ hỏng hóc, ảnh hưởng và độ nghiêm trọng

FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) đã khẳng định vai trò là một công cụ phân tích rủi ro thiết yếu trong lĩnh vực quản lý bảo trì và độ tin cậy. Phương pháp này cho phép nhận diện có hệ thống các chế độ hỏng tiềm ẩn của thiết bị, đánh giá hậu quả và tần suất xảy ra, từ đó lượng hóa mức độ ưu tiên bảo trì thông qua chỉ số RPN (Risk Priority Number) tích số của ba yếu tố: mức độ nghiêm trọng S (Severity), tần suất xảy ra lỗi O (Occurrence) và khả năng phát hiện lỗi D (Detection)

Trên thực tế, nhiều nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả của FMECA trong lĩnh vực điện lực, từ lưới phân phối tại Cameroon [15] đến các hệ thống máy biến áp tại Ấn Độ [3] và cả nhà máy nhiệt điện công suất lớn [16]. Các thành phần như cuộn dây, cách điện rắn, và sứ xuyên thường có RPN rất cao, cho thấy rủi ro hỏng hóc lớn và cần được ưu tiên trong kế hoạch bảo trì định kỳ. Không chỉ dừng lại ở mức độ phân tích định lượng sơ cấp, một số mô hình tiên tiến còn mở rộng FMECA thành dạng phân tích động, kết hợp với kỹ thuật hỗ trợ ra quyết định (AHP, fuzzy logic) nhằm theo dõi rủi ro trong môi trường thay đổi liên tục [17]. Phân tích FMECA được trình bày trong nghiên cứu của [5] đã cho thấy hiệu quả trong việc giảm thiểu các sự cố nghiêm trọng và có tần suất cao thông qua chấm điểm RPN, từ đó cho phép ngăn chặn sớm các chế độ hỏng hóc trọng yếu.

Đáng chú ý, trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, FMECA không còn là công cụ độc lập mà thường được tích hợp với các kỹ thuật giám sát tình trạng thiết bị (condition monitoring) như phân tích rung động và phân tích dầu để cung cấp dữ liệu đầu vào chính xác hơn cho đánh giá rủi ro, như minh chứng trong nghiên cứu tại Vedanta Captive Power Plant [16]. Ngoài ra, các mô hình tính Criticality Score nâng cao kết hợp nhiều yếu tố như chi phí thay thế, thời gian khắc phục, mức độ ảnh hưởng đến an toàn. FMECA không chỉ là nền tảng cốt lõi để đánh giá và kiểm soát rủi ro kỹ thuật, mà còn là công cụ trung gian hiệu quả để kết nối giữa phân tích định tính và chiến lược bảo trì định lượng. Khi được tích hợp với các phương pháp như FTA, phân phối Weibull hoặc giám sát tình trạng, FMECA sẽ phát huy tối đa tiềm năng trong việc nâng cao độ tin cậy và tối ưu hóa chi phí bảo trì cho các hệ thống thiết bị công nghiệp quan trọng.

2.3.2. Các yếu tố về mức độ nghiêm trọng, tần suất lỗi và khả năng phát hiện lỗi.

Phân tích FMECA được thực hiện qua hai giai đoạn: trước hết là phân tích chế độ và ảnh hưởng của sự cố (FMEA), nhằm xác định tất cả các bộ phận hoặc thiết bị quan trọng để ghi nhận các chế độ hư hỏng có thể xảy ra và đánh giá ảnh hưởng của chúng. Các Bảng số liệu 2.2, 2.3 và 2.4 sẽ trình bày tiêu chuẩn đánh giá mức độ nghiêm trọng của sự cố, tần suất xảy ra và khả năng phát hiện sự cố đối với máy biến áp phân phối, được xác lập sau các cuộc phỏng vấn với nhân viên công ty điện lực [15]. Sau cùng, phân tích tính nghiêm trọng được thực hiện bằng cách gán chỉ số RPN cho từng lỗi để hoàn tất quy trình FMECA.

Bảng 2.2. Đánh giá mức độ nghiêm trọng (S).

Phân loại	Mô tả mức độ nghiêm trọng	Xếp hạng
Thảm khốc	Cháy máy biến áp hoặc mất điện hoàn toàn	10
Nghiêm trọng	Hỏng hoàn toàn hoặc hư hỏng linh kiện quan trọng	7-9
Trung bình	Suy giảm đáng kể linh kiện	5-6
Cận biên	Suy giảm nhẹ linh kiện	3-4
Nhẹ	Ảnh hưởng không đáng kể tới linh kiện	1-2

Bảng 2.3. Đánh giá tần suất lỗi (O).

Phân loại	Mô tả tần suất xảy ra lỗi	Xếp hạng
Rất thường xuyên	Lỗi thiết bị không thể tránh khỏi	10
Thường xuyên	Lỗi xảy ra hàng tháng hoặc nhiều hơn	7-9
Thỉnh thoảng	Lỗi xảy ra một lần trong sáu tháng	5-6
Hiếm gặp	Lỗi xảy ra một lần mỗi năm	3-4
Rất hiếm	Lỗi gần như không bao giờ xảy ra	1-2

Bảng 2.4. Đánh giá khả năng phát hiện lỗi (D).

Phân loại	Khả năng phát hiện lỗi	Mô tả	Xếp hạng
Rất khó phát hiện	Không thể phát hiện	Lỗi luôn được phát hiện ngay lập tức qua hệ thống giám sát tự động.	10
Khó phát hiện	Rất khó phát hiện	Lỗi có thể dễ dàng phát hiện qua kiểm tra định kỳ hoặc thiết bị đo lường đơn giản.	7-9
Trung bình	Xác suất phát hiện lỗi khoảng 50%	Cần có phương pháp chuyên sâu hơn như đo kiểm tra trong phòng thí nghiệm.	5-6
Dễ phát hiện	Có thể phát hiện lỗi một cách dễ dàng	Lỗi thường chỉ phát hiện khi có dấu hiệu bất thường hoặc đã gây suy giảm hiệu suất.	3-4
Rất dễ	Rất dễ phát hiện lỗi	Lỗi không thể phát hiện cho đến khi	1-2

phát hiện		hỏng hóc nghiêm trọng xảy ra.	
-----------	--	-------------------------------	--

Quy trình FMECA được sử dụng để xác định các chế độ hư hỏng tiềm ẩn và phân tích ảnh hưởng của các hư hỏng đó đến tình trạng sức khỏe của hệ thống. Khi một sự cố xảy ra, mức độ ảnh hưởng của nó còn gọi là độ nghiêm trọng (severity) được đánh giá theo thang điểm từ 1 đến 10, trong đó 1 biểu thị “không có sự cố” và 10 biểu thị mức ảnh hưởng “nghiêm trọng nhất”.

Tương tự, tần suất xảy ra của chế độ hư hỏng cũng được đánh giá theo thang điểm từ 1 đến 10, với 1 đại diện cho “không có sự cố nào” và 10 đại diện cho “tần suất xảy ra cao”.

Khả năng phát hiện chế độ hư hỏng trước khi nó xảy ra được gọi là Khả năng phát hiện (Detection). Việc phát hiện khó được chấm điểm trên thang 10 điểm, trong đó 10 là mức khó phát hiện nhất. Cần lưu ý rằng việc đánh giá mức độ nghiêm trọng nêu trên được thực hiện dựa trên các cuộc phỏng vấn trực tiếp với nhân viên kỹ thuật, kết hợp với các hồ sơ bảo trì trước đây và tài liệu tham khảo từ các nghiên cứu trước.

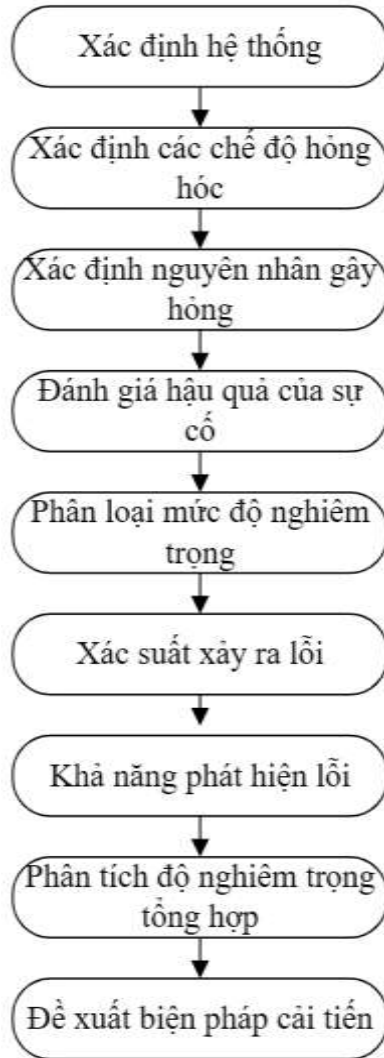
2.3.3. Các bước xây dựng FMECA

Việc triển khai FMECA đòi hỏi một đội ngũ chuyên gia liên ngành có trình độ cao, với kiến thức sâu rộng về cấu trúc hệ thống và các chế độ hỏng hóc tiềm ẩn. Bước đầu tiên là xác định rõ ràng và giới hạn phạm vi của đối tượng cần phân tích. Sau khi xác định được tất cả các chế độ hỏng có thể xảy ra trong hệ thống, cần tiến hành tính toán Chỉ số Ưu tiên Rủi ro RPN cho từng lỗi, từ đó phân loại lỗi là nghiêm trọng hay không dựa trên giá trị RPN của chúng. Các lỗi nghiêm trọng sẽ được làm nổi bật thông qua việc tính RPN theo công thức sau:

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.1)$$

Mỗi chế độ hỏng được đánh giá dựa trên ba yếu tố chính: Tần suất xảy ra O; Tần suất mà lỗi có khả năng xảy ra; Mức độ nghiêm trọng S; Mức độ ảnh hưởng hoặc hậu quả nếu lỗi xảy ra; Khả năng phát hiện D; Mức độ dễ dàng trong việc phát hiện lỗi trước khi nó gây ra hậu quả nghiêm trọng.

Dựa trên giá trị RPN, các lỗi được phân loại thành lỗi nghiêm trọng hoặc lỗi không nghiêm trọng. Các lỗi có RPN cao sẽ được ưu tiên xử lý và yêu cầu xây dựng các kế hoạch hành động cụ thể nhằm giảm thiểu mức độ nghiêm trọng của chúng. Mục tiêu cuối cùng là nâng cao khả năng bảo trì, độ tin cậy và an toàn của hệ thống. Các giá trị RPN được sử dụng để xác định các vấn đề tiềm ẩn, dự đoán khả năng xảy ra lỗi, và có thể được áp dụng để triển khai hệ thống bảo trì chủ động. Dựa vào định nghĩa của 9 yếu tố FMECA và việc hoàn thành bảng phân tích FMECA tương ứng, các thành phần quan trọng đã được xác định, và tóm tắt kết quả được trình bày trong Hình 2.1 sau.



Hình 2.1. Quy trình thực hiện phương pháp FMECA.

2.3.4. Áp dụng kỹ thuật phân tích độ tin cậy vào máy biến áp ngâm dầu

Phương pháp FMECA đang ngày càng được áp dụng rộng rãi trong lĩnh vực điện lực nhằm nâng cao độ tin cậy và hiệu quả bảo trì của các thiết bị quan trọng như máy biến áp ngâm dầu. Đây là công cụ phân tích có hệ thống giúp nhận diện các chế độ hỏng hóc tiềm ẩn, đánh giá mức độ nghiêm trọng, khả năng xảy ra và khả năng phát hiện, từ đó tính toán chỉ số ưu tiên rủi ro RPN để hỗ trợ ra quyết định trong công tác bảo trì phòng ngừa.

Trong nghiên cứu tại Cameroon, Nsanyuy [15] đã áp dụng FMECA để phân tích nguyên nhân gây hỏng hóc 24 máy biến áp phân phối tại khu vực Buea. Kết quả cho thấy cuộn dây, dầu cách điện và vật liệu cách điện rắn là các thành phần dễ hỏng nhất, với nguyên nhân chủ yếu là quá tải, phá hoại và điều kiện môi trường không thuận lợi. Việc tính toán RPN giúp xác định các thành phần có mức độ rủi ro cao cần được ưu tiên kiểm tra và thay thế. Nhóm nghiên cứu nhấn mạnh rằng FMECA không chỉ giúp

tìm ra nguyên nhân gốc rễ mà còn góp phần xây dựng kế hoạch bảo trì định kỳ và cải thiện thiết kế máy biến áp phù hợp với điều kiện vận hành thực tế.

Tương tự, [3] đã thực hiện phân tích FMECA trên 348 máy biến áp ngâm dầu tại bang Punjab, Ấn Độ. Kết quả chỉ ra rằng các hỏng hóc chủ yếu xuất phát từ sự suy giảm cách điện, sự cố cuộn dây và sứ xuyên. Thông qua FMECA, các thành phần như cách điện (RPN cao nhất) được xác định là điểm yếu cần giám sát chặt chẽ. Nhóm nghiên cứu cũng đề xuất thực hiện các biện pháp bảo trì chủ động như kiểm tra dầu cách điện (DGA), thử điện trở cuộn dây và đánh giá nhiệt độ điểm nóng để kéo dài tuổi thọ máy biến áp và giảm thiểu tổn thất do sự cố.

Từ hai nghiên cứu điển hình này, có thể thấy rằng FMECA là một công cụ phân tích mạnh mẽ và thiết thực trong lĩnh vực bảo trì máy biến áp ngâm dầu. Việc ứng dụng phương pháp này không chỉ giúp nhận diện và phòng tránh rủi ro một cách có cơ sở, mà còn hỗ trợ nâng cao độ tin cậy và hiệu quả vận hành của hệ thống điện.

2.4. Áp dụng phân phối Weibull trong đánh giá độ tin cậy

2.4.1. Phân phối Weibull

Phân phối Weibull là một trong những phân phối xác suất được sử dụng phổ biến nhất trong phân tích độ tin cậy do tính linh hoạt cao trong việc mô hình hóa nhiều dạng hành vi hỏng hóc khác nhau. Phân phối này được giới thiệu lần đầu bởi Waloddi Weibull vào năm 1951 [18]. Phân phối Weibull bao gồm hai tham số chính: tham số hình dạng (β) và tham số tỷ lệ (η). Phân phối Weibull có khả năng phản ánh các cơ chế hỏng hóc khác nhau như hỏng sớm, ngẫu nhiên hoặc do mòn hao theo thời gian, tùy thuộc vào giá trị của β [19] vốn là đặc điểm thường gặp ở các thành phần trong máy biến áp như cuộn dây, lõi thép, sứ xuyên và cách điện rắn.

Ưu điểm nổi bật của phân phối Weibull nằm ở khả năng mô tả linh hoạt ba chế độ hư hỏng khác nhau, tương ứng với từng giai đoạn trong “đường cong bồn tắm” (bathtub curve): hư hỏng sớm ($\beta < 1$), hư hỏng ngẫu nhiên ($\beta = 1$), và hư hỏng do lão hóa ($\beta > 1$) theo ReliaSoft1 (2024) [19]. Điều này giúp mô hình dễ dàng thích nghi với đặc điểm hoạt động thực tế của nhiều loại thiết bị, đặc biệt là các thành phần có quá trình suy giảm phức tạp theo thời gian như trong máy biến áp. Ngoài ra, các nghiên cứu trước đây đã chứng minh tính ứng dụng rộng rãi và hiệu quả của phân phối Weibull trong việc đánh giá tuổi thọ của các hệ thống cách điện. Ví dụ, nghiên cứu của Madavan và Balaraman [20] đã sử dụng phân phối Weibull để mô hình hóa xác suất hỏng hóc của hệ thống cách điện rắn trong máy biến áp dưới điều kiện lão hóa gia tốc, cho thấy khả năng phản ánh chính xác quá trình suy giảm thiết bị theo thời gian của Weibull.

Đặc biệt, phân phối Weibull thường được ưu tiên so với các phân phối như Log-normal, Gamma hay Generalized Exponential nhờ tính linh hoạt cao trong mô hình

hóa độ tin cậy. Với chỉ hai tham số, Weibull có thể biểu diễn ba dạng hàm nguy cơ khác nhau (tăng, giảm hoặc không đổi theo thời gian), phù hợp với nhiều loại cơ chế hỏng trong thực tế. Theo Dey và Kundu [21], Weibull cho khả năng phân biệt mô hình hiệu quả hơn khi cỡ mẫu lớn và hệ số hình dạng tăng, giúp cải thiện độ chính xác trong phân tích thống kê. Ngoài ra, phân phối này có cấu trúc toán học đơn giản, dễ hiệu chỉnh từ dữ liệu thời gian giữa các lần hỏng (như MTBF), phù hợp với các môi trường công nghiệp thực tế nơi dữ liệu đo lường thường không đầy đủ. So với các mô hình có cấu trúc hàm sống sót phức tạp hơn như Log-normal hay GE, Weibull cân bằng tốt giữa độ chính xác và khả năng triển khai trong hệ thống kỹ thuật.

Trong nghiên cứu này, phân phối Weibull được sử dụng như một công cụ định lượng để xác định xác suất sống sót của từng thành phần máy biến áp trong một khoảng thời gian vận hành nhất định. Sau khi các chế độ hỏng được xác định từ cây lỗi FTA và mức độ rủi ro được đánh giá bằng FMECA, Weibull đóng vai trò như lớp phân tích tổng kết để ước tính thời điểm tối ưu cần thực hiện bảo trì. Đây là một phần cốt lõi của mô hình bảo trì dự đoán trong đề tài, vì nó không chỉ giúp trả lời câu hỏi “thành phần nào cần bảo trì” mà còn “khi nào nên bảo trì” dựa trên đặc tính suy giảm thực tế của từng lỗi cụ thể.

Ngoài ra, một điểm đặc biệt trong phương pháp đề xuất là: sau khi xác suất hỏng được tính toán cho từng thành phần từ mô hình Weibull, các giá trị này tiếp tục được gán trở lại cho các sự kiện trung gian (intermediate event) trong sơ đồ cây lỗi FTA. Nhờ đó, phân tích FTA ban đầu chỉ được xây dựng ở mức định tính có thể được mở rộng sang hướng định lượng, cho phép đánh giá xác suất xảy ra của sự cố đỉnh dựa trên tổ hợp xác suất thực tế của từng nhánh lỗi. Điều này thể hiện rõ tính liên kết hai chiều trong mô hình: Weibull vừa kế thừa dữ liệu từ FMECA và FTA định tính, vừa cung cấp đầu ra ngược trở lại cho bước đánh giá FTA định lượng sau cùng.

Cách tiếp cận này không những tận dụng được dữ liệu thực nghiệm một cách triệt để, mà còn tạo ra một chu trình phân tích khép kín, trong đó mỗi công cụ FTA, FMECA, Weibull đều đóng vai trò bổ trợ và củng cố lẫn nhau trong chiến lược bảo trì dự đoán toàn diện.

2.4.2. Hàm sống sót

Trong phân phối Weibull, ba hàm cơ bản thường được sử dụng trong phân tích độ tin cậy bao gồm:

- Hàm mật độ xác suất PDF (Probability Density Function):

$$R(t) < 0.95 \tag{2.2}$$

- Hàm phân phối xác suất tích lũy CDF (Cumulative Distribution Function)

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (2.3)$$

- Hàm sống sót SF (Survival Function):

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (2.4)$$

Trong ba hàm này, hàm sống sót $R(t)$ là biểu thức then chốt trong các mô hình bảo trì dự đoán vì nó trực tiếp biểu diễn xác suất mà một thiết bị vẫn còn hoạt động bình thường tại thời điểm t . Khác với hàm mật độ xác suất vốn chỉ cho biết xác suất xảy ra hư hỏng tại một thời điểm cụ thể hàm sống sót thể hiện một cách tổng quát khả năng “sống sót” tích lũy của thiết bị đến thời điểm đó. Điều này rất phù hợp với mục tiêu bảo trì, vốn cần dựa vào thông tin xác suất còn hoạt động của thiết bị để ra quyết định can thiệp kỹ thuật. Hơn nữa, hàm sống sót có tính đơn điệu giảm và luôn nằm trong khoảng từ 0 đến 1, giúp dễ dàng thiết lập các ngưỡng tin cậy kỹ thuật R_{target} như 0.95 hay 0.90 để làm căn cứ xác định thời điểm bảo trì tối ưu.

Từ định nghĩa trên, ta có công thức hàm sống sót Weibull [22] được sử dụng trong nghiên cứu như sau:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$$

Trong đó:

- $R(t)$: xác suất còn hoạt động đến thời điểm t ,
- η : tham số đặc trưng (tuổi thọ đặc trưng),
- β : tham số hình dạng (phản ánh bản chất hư hỏng: sớm, ngẫu nhiên hay lão hóa).

Công thức này là nền tảng để xây dựng biểu đồ đường cong sống sót cho từng thành phần thiết bị trong máy biến áp, từ đó xác định thời điểm bảo trì phù hợp và lượng hóa xác suất đầu vào cho phân tích FTA định lượng.

2.4.3. Tham số hình dạng và tham số đặc trưng

Phân phối Weibull sử dụng hai tham số chính: tham số hình dạng β beta và tham số đặc trưng η eta. Mỗi tham số mang một ý nghĩa riêng và cần được xác định chính xác để mô hình phản ánh đúng đặc tính suy giảm độ tin cậy của thiết bị. Để tính toán chính xác thời điểm bảo trì tối ưu t , ta cần xác định hai tham số β và η trên. Đầu tiên tham số hình dạng β được lựa chọn dựa trên cơ chế hỏng hóc thực tế của từng thành phần máy biến áp. Theo ReliaSoft1 (2024) [19], giá trị β phản ánh bản chất hỏng hóc như sau:

- $\beta < 1$: Hỏng hóc chủ yếu do lỗi sản xuất hoặc lỗi giai đoạn đầu (tử vong sớm),
- $\beta = 1$: Hỏng hóc ngẫu nhiên, không phụ thuộc vào thời gian,
- $\beta > 1$: Hỏng hóc do lão hóa hoặc mòn hao theo thời gian.

Sau khi xác định được tham số hình dạng β , bước tiếp theo trong việc xây dựng mô hình Weibull là ước lượng tham số tỷ lệ η . Đây là một tham số then chốt trong hàm sống sót Weibull, phản ánh trực tiếp mối quan hệ giữa thời gian vận hành và xác suất hư hỏng của thiết bị. Tham số này xác định vị trí của đường cong sống sót theo trục thời gian và có ảnh hưởng quan trọng đến độ chính xác của mô hình độ tin cậy.

Ước lượng chính xác giá trị η cho phép xác định được thời điểm bảo trì tối ưu, thay vì dựa vào các lịch trình bảo trì định kỳ không tùy biến. Trong nghiên cứu này, η được xác định từ dữ liệu thực nghiệm thông qua chỉ số thời gian trung bình giữa các lần hỏng MTBF (Mean Time Between Failures) [23].

Đầu tiên, chỉ số MTBF của từng thành phần được tính toán theo công thức:

$$MTBF_i = \frac{T_{total}}{N_{failures,i}} \quad (2.5)$$

Trong đó:

- N_i : số lần hỏng đã được ghi nhận đối với thành phần iii,
- T_{total} : tổng thời gian vận hành của tất cả các thành phần thuộc hệ thống được xem xét.

Sau khi xác định được MTBF, tham số η tương ứng của thành phần i sẽ được tính theo công thức chuyển đổi từ MTBF sang tham số tỷ lệ trong phân phối Weibull:

$$\eta_i = \frac{MTBF_i}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right)} \quad (2.6)$$

Trong đó:

- $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right)$: là hàm Gamma Euler, cho phép hiệu chỉnh mối quan hệ giữa giá trị trung bình và tham số tỷ lệ theo tham số hình dạng β ,

- β_i : là tham số hình dạng đã được xác định từ bước trước.

Cách tiếp cận này cho phép mô hình hóa linh hoạt các phân phối hỏng hóc không đối xứng, phản ánh chính xác hơn đặc tính suy giảm của các thiết bị điện như máy biến áp, đặc biệt khi từng thành phần có đặc trưng cơ lý và điều kiện vận hành khác nhau.

Phương pháp ước lượng tham số η thông qua MTBF và hàm Gamma được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu độ tin cậy hiện đại, và đã được xác nhận hiệu quả trong các tài liệu chuyên ngành như [23] và [24].

2.4.4. Thời gian bảo trì tối ưu

Sau khi xác định được hai tham số đặc trưng của phân phối Weibull là β và η , bước tiếp theo trong mô hình bảo trì dự đoán là tính toán thời điểm phù hợp để thực hiện bảo trì. Trong nghiên cứu này, ba loại thời điểm được sử dụng để lập lịch bảo trì, bao gồm:

- t^* (thời điểm bảo trì tối ưu theo Weibull): xác định dựa trên hàm sống sót Weibull, tương ứng với ngưỡng tin cậy mục tiêu R_{target}
- t^{**} (thời điểm bảo trì đã hiệu chỉnh theo rủi ro): là kết quả điều chỉnh t^* dựa trên chỉ số RPN và hệ số ưu tiên rủi ro α
- t_{final} (thời điểm bảo trì cuối cùng): là giá trị nhỏ hơn giữa t^{**} và thời gian bảo trì vận hành tối đa cho phép t_{max}

Việc xác định từng mốc thời gian này giúp xây dựng một chiến lược bảo trì chủ động, cân bằng giữa độ tin cậy thiết bị và mức độ rủi ro từng chế độ hỏng.

(a) Tính thời điểm bảo trì tối ưu ban đầu t^*

Thời điểm này được xác định theo công thức:

$$t^* = \eta_i \cdot [-\ln(R_{target})]^{1/\beta_i} \quad (2.7)$$

(b) Hiệu chỉnh theo mức độ rủi ro: t^{**}

Để ưu tiên bảo trì sớm hơn cho các thành phần có độ rủi ro cao, nghiên cứu sử dụng một hệ số hiệu chỉnh α kết hợp với chỉ số RPN để điều chỉnh thời điểm bảo trì từ t^* thành t^{**} có công thức như sau:

$$t_i^{**} = t_i^* \cdot \left(1 - \alpha_i \cdot \frac{RPN_i}{RPN_{max}} \right) \quad (2.8)$$

Trong đó:

- α_i là hệ số ưu tiên bảo trì, giá trị nằm trong khoảng $[0, 1]$ do người phân tích quyết định dựa trên mức độ nhạy cảm của hệ thống hoặc yêu cầu an toàn cụ thể. Khi α_i càng lớn, mức độ điều chỉnh càng mạnh thành phần có RPN cao sẽ được bảo trì sớm hơn.
- RPN_i : chỉ số rủi ro của thành phần i ,
- RPN_{\max} : giá trị RPN lớn nhất trong toàn hệ thống.

Giá trị α_i có thể được đặt giống nhau cho tất cả các thành phần để đảm bảo công bằng, hoặc khác nhau nếu cần ưu tiên nhóm thành phần đặc biệt quan trọng. Trong nghiên cứu này, hệ số α đóng vai trò như một “đòn bẩy” nhằm tăng độ thích ứng cho mô hình bảo trì, đặc biệt hữu ích trong môi trường vận hành có giới hạn ngân sách hoặc thời gian bảo trì.

(c) Xác định thời điểm bảo trì cuối cùng t_{final}

Giá trị cuối cùng được chọn là: $t_{final,i} = \min(t_i^{**}, t_{\max})$ (2.9)

Giới hạn trên này đảm bảo rằng mọi thành phần đều được bảo trì trước khi vượt quá thời gian vận hành cho phép, giảm thiểu rủi ro tiềm ẩn cho hệ thống.

2.4.5. Áp dụng phân phối Weibull vào dự đoán bảo trì máy biến áp ngâm dầu

Trong khuôn khổ mô hình bảo trì dự đoán đề xuất, phân phối Weibull không chỉ là một công cụ tính toán riêng biệt, mà đóng vai trò trung tâm trong việc chuyển hóa các kết quả phân tích định tính và rủi ro thành các quyết định định lượng có thể hành động. Sau khi hệ thống được phân tích bằng cây lỗi FTA để nhận diện các chế độ hỏng quan trọng, và mức độ rủi ro của từng chế độ được đánh giá bằng phương pháp FMECA thông qua chỉ số RPN, mô hình Weibull được triển khai như một bước mở rộng định lượng nhằm xác định thời điểm bảo trì thích hợp cho từng thành phần.

Cụ thể, dựa trên các tham số β và η thu được từ dữ liệu MTBF và đặc điểm hư hỏng thực tế, nhóm nghiên cứu tính toán được xác suất sống sót $R(t)$ và từ đó xác định được thời điểm bảo trì tối ưu t^* . Tiếp theo, giá trị này được hiệu chỉnh bằng hệ số ưu tiên α cùng với RPN để phản ánh mức độ rủi ro tương ứng, cho ra thời điểm hiệu chỉnh t^{**} . Cuối cùng, thời điểm bảo trì thực tế t_{final} được quyết định trên cơ sở giới hạn kỹ thuật t_{\max} của từng thiết bị.

Quan trọng hơn, các giá trị xác suất $R(t)$ thu được từ Weibull còn được đưa ngược trở lại vào cây lỗi FTA ban đầu tại các sự kiện trung gian để thực hiện bước phân tích định lượng cây lỗi. Điều này giúp đánh giá được xác suất xảy ra của sự cố đỉnh (Top Event), đồng thời xác định các đường lỗi nguy hiểm nhất (minimal cut sets) với độ chính xác cao hơn.

Thông qua quy trình tích hợp hai chiều này, mô hình không những trả lời câu hỏi “cái gì dễ hỏng” và “mức độ nghiêm trọng ra sao”, mà còn cho phép xác định rõ “khi nào cần bảo trì” dựa trên xác suất thực tế và thời gian vận hành yếu tố cốt lõi của bảo trì dự đoán.

2.5. Kết luận

Ở phần này đã trình bày nền tảng lý thuyết vững chắc cho phương pháp bảo trì dự đoán được đề xuất trong đề tài, thông qua ba trụ cột chính: phân tích cây lỗi FTA, phân tích chế độ lỗi và độ nghiêm trọng và phân phối Weibull. Mỗi công cụ được xây dựng không chỉ ở mức khái niệm mà còn được mô tả chi tiết quy trình triển khai, mối liên hệ lẫn nhau và vai trò trong hệ thống bảo trì tích hợp.

FTA đã được sử dụng như bước khởi đầu để nhận diện các nguyên nhân gốc rễ dẫn đến sự cố tổng thể. Không chỉ dừng lại ở phân tích định tính, mô hình được mở rộng sang định lượng bằng cách sử dụng xác suất hỏng hóc từ phân phối Weibull để tính xác suất xảy ra Top Event. FMECA tiếp nối vai trò đó bằng cách lượng hóa mức độ rủi ro của từng thành phần, thông qua chỉ số RPN, làm cơ sở cho việc ưu tiên bảo trì. Đặc biệt, hệ số ưu tiên α được đưa vào nhằm tùy biến thời điểm can thiệp bảo trì dựa trên mức độ rủi ro, tăng tính thích nghi cho mô hình.

Phân phối Weibull đóng vai trò then chốt trong việc xác định thời điểm bảo trì tối ưu cho từng thành phần dựa trên đặc tính suy giảm thực tế. Các tham số β và η được xác định từ dữ liệu MTBF và cơ chế hư hỏng thực tế, giúp tính toán hàm sống sót $R(t)$ và các mốc thời gian bảo trì như t^* , t^{**} , và t_{final} . Không dừng ở đó, các xác suất $R(t)$ còn được tích hợp ngược vào cây lỗi FTA để hoàn chỉnh phân tích định lượng thể hiện tính liên kết hai chiều giữa các công cụ phân tích trong mô hình.

Cách tiếp cận này không chỉ mang tính hệ thống và khép kín mà còn đảm bảo cả chiều rộng (phạm vi phân tích nguyên nhân) và chiều sâu (lượng hóa rủi ro và thời gian bảo trì). Nhờ đó, mô hình không chỉ trả lời được ba câu hỏi cốt lõi: “cái gì có thể hỏng?”, “mức độ nghiêm trọng ra sao?” và “khi nào cần bảo trì?”, mà còn cung cấp một công cụ thực tiễn, có khả năng triển khai rộng rãi trong các hệ thống máy biến áp ngâm dầu hiện nay.

Trong chương tiếp theo, các nội dung lý thuyết sẽ được chuyển hóa thành mô hình ứng dụng thực tế, với việc triển khai quy trình bảo trì dự đoán cụ thể trên dữ liệu máy biến áp thu thập được, từ đó kiểm chứng hiệu quả và tính khả thi của phương pháp đề xuất.

CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH ĐỀ XUẤT

3.1. Phương pháp tiếp cận

Trên cơ sở lý thuyết đã được xây dựng ở chương 2, phần tiếp theo đây sẽ trình bày mô hình bảo trì dự đoán đề xuất và phương pháp tiếp cận cụ thể để triển khai mô hình này trong hệ thống máy biến áp ngâm dầu. Mô hình có tính tích hợp cao, kết hợp ba công cụ phân tích kỹ thuật là FTA, FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) và phân phối Weibull, nhằm nhận diện, đánh giá rủi ro và xác định thời điểm bảo trì tối ưu cho từng thành phần thiết bị.

Điểm đặc biệt trong mô hình này không chỉ nằm ở việc áp dụng riêng lẻ từng phương pháp, mà còn ở sự phối hợp chặt chẽ giữa các công cụ, giúp hình thành một chu trình bảo trì dự đoán khép kín, vừa định tính vừa định lượng. Mô hình được thiết kế theo trình tự logic gồm các bước sau:

3.2. Kết hợp FTA và FMECA

Sau khi trình bày ứng dụng của hai phương pháp FTA và FMECA, phần này tập trung đề xuất một mô hình tích hợp nhằm kết hợp các ưu điểm của cả hai phương pháp, đồng thời khắc phục các hạn chế khi sử dụng riêng lẻ từng kỹ thuật. Bên cạnh đó, để đưa yếu tố thời gian vào mô hình và nâng cao tính ứng dụng thực tiễn, nghiên cứu còn tích hợp thêm phân phối Weibull một công cụ thống kê mạnh mẽ trong việc phân tích độ tin cậy và ước lượng thời điểm hỏng hóc của thiết bị. Trên thực tế, một số khung phân tích kết đã ứng dụng FTA trong giai đoạn đầu nhằm xác định các nguyên nhân lỗi nghiêm trọng, sau đó sử dụng FMECA để đánh giá và ưu tiên các chế độ hỏng cụ thể [25]. Mặc dù tích hợp như vậy có thể làm tăng độ phức tạp trong phân tích, nhưng tính hiệu quả của nó trong việc nâng cao ra quyết định bảo trì dự đoán đã được chứng minh ở các lĩnh vực mà hỏng hóc hiếm gặp có thể gây hậu quả nghiêm trọng [26].

Phân tích cây lỗi FTA là phương pháp từ trên xuống, có khả năng mô hình hóa mối quan hệ logic giữa các sự kiện cơ bản và sự cố hệ thống. Trong khi đó, FMECA là phương pháp từ dưới lên, tập trung vào việc nhận diện và lượng hóa từng chế độ hỏng hóc riêng lẻ thông qua ba yếu tố: mức độ nghiêm trọng (S), tần suất xảy ra lỗi (O), và khả năng phát hiện lỗi (D), từ đó tính ra chỉ số RPN. Tuy nhiên, FMECA không thể hiện được quan hệ nhân quả giữa các lỗi, còn FTA thì không đánh giá được mức độ ưu tiên định lượng. Việc kết hợp FTA và FMECA giúp xác định đường dẫn sự cố quan trọng nhất một cách toàn diện cả về logic và độ rủi ro [27].

Tuy nhiên, cả FTA và FMECA đều không phản ánh được yếu tố thời gian cụ thể là thời điểm mà các lỗi có khả năng xảy ra cao nhất. Do đó, để nâng cao hiệu quả bảo trì dự đoán, mô hình được mở rộng bằng cách tích hợp thêm phân phối Weibull. Phân phối này cho phép ước lượng xác suất sống sót (reliability) theo thời gian, thông qua hai tham số đặc trưng là hệ số hình dạng (β) và hệ số tỷ lệ (η). Với mỗi thành phần có

RPN cao, đường cong Weibull sẽ được xây dựng để xác định khoảng thời gian mà xác suất tồn tại giảm dưới ngưỡng cho phép, từ đó xác định thời điểm bảo trì tối ưu.

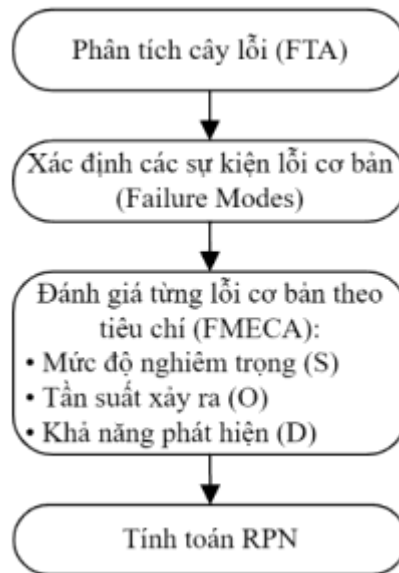
3.2.1. Quy trình thực hiện

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một phương pháp tích hợp, kết hợp cả hai kỹ thuật Phân tích cây lỗi và Phân tích chế độ hỏng hóc, ảnh hưởng và độ nghiêm trọng. Phương pháp FTA được sử dụng để nhận diện và kết nối logic tất cả các sự cố tiềm ẩn có thể xảy ra, trong khi FMECA được áp dụng để đánh giá định lượng từng chế độ hỏng thông qua các chỉ số cụ thể. Nhờ tính linh hoạt và đơn giản, FMECA được ứng dụng rộng rãi trong nhiều hệ thống quản lý chất lượng như một công cụ kiểm soát rủi ro. Phương pháp này dễ triển khai, tiết kiệm thời gian và có tính thực tiễn cao, giúp người dùng nhận diện các hỏng hóc nghiêm trọng và xây dựng kế hoạch hành động nhằm giảm thiểu mức độ tác động. Như vậy, FMECA đóng vai trò là một công cụ mạnh mẽ và hiệu quả, có thể áp dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Tuy nhiên, FMECA cũng tồn tại một số hạn chế. Nếu không có kiến thức toàn diện và chuyên sâu về hệ thống được phân tích, kết quả đầu ra có thể thiếu chính xác hoặc thậm chí gây hiểu nhầm nghiêm trọng.

Bên cạnh đó, FMECA là một công cụ phân tích tuyến tính, dễ bỏ sót các rủi ro tiềm ẩn phát sinh từ mối liên hệ phức tạp giữa các yếu tố trong hệ thống. Như đã đề cập trước đó, việc tích hợp FTA vào khung phân tích FMECA truyền thống giúp khắc phục các điểm yếu này, từ đó tạo nên một công cụ phân tích độ tin cậy và sự cố toàn diện và hiệu quả hơn. Sau khi đánh giá từng tiêu chí riêng lẻ, bước tiếp theo là mô tả phương pháp luận được đề xuất như sau:

Nhận diện lỗi: Ở bước này, FTA được sử dụng để xác định tất cả các sự kiện hỏng hóc tiềm ẩn. Việc lựa chọn FTA là do phương pháp này cung cấp một cấu trúc logic chặt chẽ và hệ thống hơn so với FMECA, đặc biệt phù hợp ngay cả trong trường hợp thông tin hoặc chuyên môn kỹ thuật bị hạn chế.

Phân loại lỗi: Với FMECA, tất cả các lỗi cơ bản được xác định từ bước đầu sẽ được đánh giá dựa trên ba yếu tố: Khả năng phát hiện (Detection), Tần suất xảy ra (Occurrence) và Mức độ nghiêm trọng (Severity). Sau đó, Chỉ số Ưu tiên Rủi ro RPN được tính toán để phân loại và sắp xếp thứ tự ưu tiên xử lý các lỗi này. Các bước tiến hành được minh họa trong Hình 3.1.



Hình 3.1. Kết hợp FTA và FMECA.

3.2.2. Xây dựng FTA

Sau khi xác định được danh sách đầy đủ các bộ phận cấu thành máy biến áp và các chế độ hỏng hóc tương ứng từ chương 1 và các nghiên cứu tổng quan [3], bước tiếp theo là xây dựng cây lỗi FTA để mô hình hóa mối quan hệ nhân quả giữa các lỗi cơ bản và sự cố tổng thể (Top Event). Phân tích cây lỗi không chỉ là bước khởi đầu mang tính định tính trong mô hình bảo trì dự đoán, mà còn cung cấp nền tảng logic để kết nối với phân tích FMECA và định lượng độ tin cậy bằng phân phối Weibull ở các phần sau.

a) Cấu trúc và loại sự kiện trong cây lỗi

Trong nghiên cứu này, Top Event được lựa chọn là “Lỗi máy biến áp” (Transformer Failure), đại diện cho sự cố tổng thể có mức độ ảnh hưởng nghiêm trọng và cần được ngăn ngừa thông qua bảo trì chủ động. Cây lỗi được xây dựng theo nguyên tắc từ trên xuống, với ba cấp sự kiện chính như sau:

- Top Event: là sự kiện đỉnh (Lỗi máy biến áp) mục tiêu của toàn bộ quá trình phân tích.
- Intermediate Events: là các sự kiện trung gian tương ứng với lỗi xảy ra tại sáu thành phần chính: lõi thép, cuộn dây, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện và sứ xuyên. Các sự kiện này đóng vai trò là điểm trung chuyển, nhóm lại các chế độ hỏng cùng thuộc một thành phần.

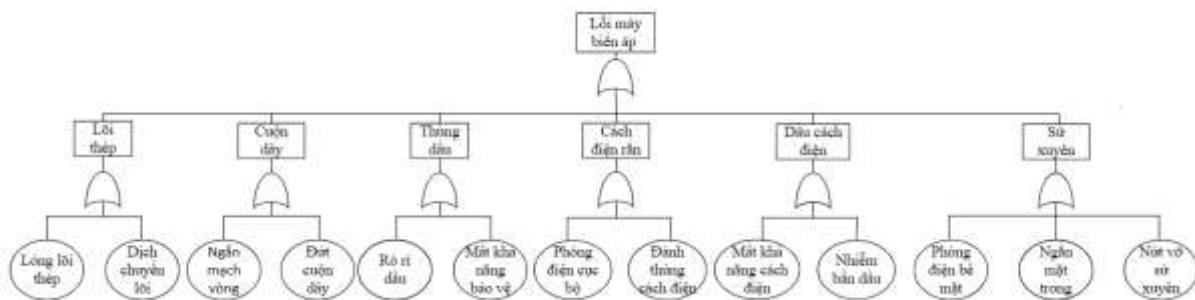
- Basic Events: là các chế độ hỏng cụ thể không thể phân rã thêm, được sử dụng để tính xác suất hỏng trong bước định lượng sau. Được trình bày chi tiết tại Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Chế độ hỏng hóc của các thành phần

Bộ phận	Chế độ hỏng hóc
Lõi thép	Lỏng lõi thép, dịch chuyển lõi
Cuộn dây	Ngắn mạch vòng, đứt cuộn dây
Thùng dầu	Rò rỉ dầu, mất khả năng bảo vệ
Cách điện rắn	Phóng điện cục bộ, đánh thủng cách điện
Dầu cách điện	Nhiễm bẩn dầu, mất khả năng cách điện
Sứ xuyên	Nứt, vỡ sứ xuyên, phóng điện bề mặt, ngắn mạch trong

b) Logic kết nối và lựa chọn cổng

Cổng OR được sử dụng chủ đạo trong cây lỗi do đặc điểm thực tế của hệ thống: chỉ cần một chế độ hỏng nghiêm trọng xảy ra cũng đủ để kích hoạt sự cố tổng thể. Trong một số trường hợp đặc biệt, nếu cần mô tả tổ hợp các lỗi đồng thời, cổng AND hoặc INHIBIT có thể được áp dụng. Tuy nhiên, trong mô hình nghiên cứu hiện tại, cấu trúc chủ yếu theo dạng đơn giản hóa để thuận tiện cho việc chuyển đổi sang mô hình định lượng. Việc thiết kế đúng các cổng logic không chỉ giúp biểu diễn chính xác mối quan hệ kỹ thuật mà còn đảm bảo tính khả thi khi tính toán xác suất xảy ra Top Event trong bước phân tích Weibull, FTA định lượng. Từ đây kết hợp với các sự kiện lỗi đã trình bày ở phần trước ta xây dựng được mô hình cây lỗi định tính được biểu diễn trực quan như Hình 3.2 dưới đây:



Hình 3.2. Sơ đồ cây lỗi.

Mô hình cây lỗi vừa trình bày là kết quả của quá trình phân tích định tính theo phương pháp FTA. Mục tiêu của cây lỗi định tính là nhận diện mối quan hệ nguyên nhân hậu

quả giữa các lỗi cơ bản và sự cố tổng thể, từ đó hình thành cơ sở logic cho các bước phân tích sâu hơn. Đây cũng chính là bộ khung giúp tổ chức và liên kết dữ liệu trong quá trình đánh giá rủi ro và phân tích xác suất hỏng hóc. Trong các mục sau, mô hình này sẽ tiếp tục được phát triển theo hướng định lượng, khi các xác suất hư hỏng được gán trở lại cho từng sự kiện cơ bản, từ đó cho phép tính toán được xác suất xảy ra Top Event và đánh giá toàn diện độ tin cậy của hệ thống.

3.2.3. Xây dựng FMECA

Trong mô hình bảo trì dự đoán được đề xuất, phương pháp FMECA được sử dụng nhằm đánh giá mức độ nghiêm trọng và khả năng xảy ra của các chế độ hỏng hóc, từ đó hỗ trợ xác định mức độ ưu tiên trong kế hoạch bảo trì. Mặc dù trong lý thuyết, các sự kiện cơ bản (basic events) trong cây lỗi thường là nguồn đầu vào trực tiếp cho phân tích FMECA, tuy nhiên do giới hạn về dữ liệu thực tế, nghiên cứu này lựa chọn phân tích trực tiếp từ các sự kiện trung gian (intermediate events) tức các hư hỏng từ các thành phần chính trong máy biến áp như cuộn dây, lõi thép, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện, sứ xuyên.

Cách tiếp cận này vẫn đảm bảo được tính logic của mô hình tích hợp, vì mỗi sự kiện trung gian đại diện cho một nhóm chế độ hỏng cụ thể đã được tổng hợp và trình bày ở tại Bảng 3.1. Với mỗi thành phần, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích FMECA thông qua việc đánh giá ba chỉ số: độ nghiêm trọng (Severity), tần suất xảy ra (Occurrence), và khả năng phát hiện (Detection). Kết quả RPN thu được sẽ đóng vai trò làm hệ số điều chỉnh thời điểm bảo trì tối ưu t^* được xác định bởi mô hình Weibull ở phần sau. Nhờ đó, mô hình cho phép kết hợp giữa mức độ rủi ro thực tiễn và đặc tính suy giảm theo thời gian để đề xuất lịch bảo trì phù hợp nhất cho từng thành phần thiết bị.

Trong nghiên cứu này, phương pháp FMECA được triển khai theo hướng dẫn của tiêu chuẩn quân sự MIL-STD-1629A [28], được phát hành bởi Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ vào năm 1980 và vẫn đang là một trong những tài liệu tham khảo quan trọng nhất trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ tin cậy cao như hàng không, quốc phòng và điện lực. Phương pháp này được phát triển từ kỹ thuật FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) do NASA khởi xướng từ thập niên 1960, sau đó được mở rộng thành FMECA bằng cách bổ sung yếu tố định lượng mức độ nghiêm trọng (Severity), tần suất (Occurrence) và khả năng phát hiện lỗi (Detection) để đánh giá chỉ số ưu tiên rủi ro RPN. FMECA không chỉ là công cụ hỗ trợ kỹ thuật, mà còn là xương sống trong hệ thống quản lý rủi ro kỹ thuật và hoạch định bảo trì của nhiều chương trình kỹ thuật lớn.

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, các bước thực hiện FMECA được xây dựng theo đúng trình tự của MIL-STD-1629A, bao gồm trình tự 10 bước được thực hiện trình tự như dưới đây.

Bước 1: Xác định phạm vi và hệ thống phân tích.

Phân tích FMECA trong nghiên cứu này được triển khai dựa trên cơ sở dữ liệu thực tế thu thập từ hệ thống 348 máy biến áp ngâm dầu thuộc công ty Punjab State Power Corporation Limited (PSPCL), Ấn Độ, trong giai đoạn từ năm 2010 đến 2015 [3]. Đây là hệ thống có quy mô lớn, vận hành trong điều kiện môi trường khắc nghiệt và chịu tải liên tục, phản ánh rõ các đặc trưng suy giảm và hư hỏng thực tế của máy biến áp sau một thời gian dài hoạt động.

Tổng số 294 lỗi hỏng đã được ghi nhận trong 6 năm, và được phân loại theo từng lỗi thành phần chính cấu thành máy biến áp tương tự intermediate events trong FTA. Từ đó, nhóm nghiên cứu đã xác định phạm vi phân tích FMECA tập trung vào 6 nhóm thành phần có tỉ lệ lỗi cao nhất. Bảng tổng hợp số lần hỏng của từng thành phần theo từng năm sẽ được trình bày trong Bảng 3.2 dưới đây.

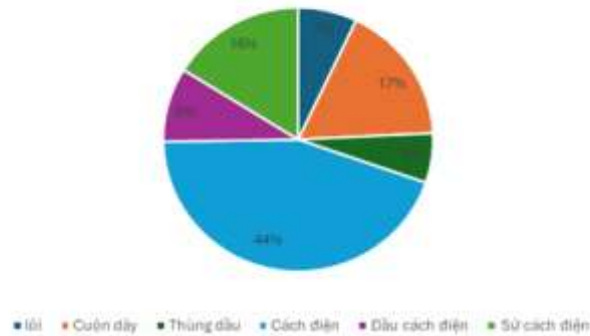
Bảng 3.2. Dữ liệu hỏng hóc các thành phần của máy biến áp.

Thành phần	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Tổng cộng
Lỗi	2	3	3	1	2	3	14
Cuộn dây	6	7	11	9	10	11	54
Thùng dầu	1	1	2	2	1	2	9
Cách điện	16	25	21	28	25	30	145
Dầu cách điện	2	4	5	3	5	4	23
Sứ xuyên	6	9	8	7	9	10	49
Tổng cộng	33	45	50	50	52	60	294

Dữ liệu này đóng vai trò nền tảng cho toàn bộ mô hình FMECA, Weibull, giúp ước lượng xác suất lỗi, xây dựng chỉ số MTBF và tính toán các tham số trong phân phối Weibull cho từng thành phần.

Hình dưới đây minh họa tỷ lệ phần trăm số lỗi tương ứng giữa các thành phần:

Phân tích lỗi các thành phần máy biến áp.



Hình 3.3. Tỷ lệ lỗi của các thành phần.

Đồng thời, từ dữ liệu này, các phân tích rủi ro cũng sẽ được triển khai để đưa ra chiến lược bảo trì phù hợp, giúp tối ưu hóa lịch trình bảo trì theo hướng dự đoán và định lượng thay vì phụ thuộc vào lịch cố định.

Bước 2: Xác định chế độ hỏng hóc .

Sau khi xây dựng cây lỗi định tính trong phần trước, các chế độ hỏng chính của từng thành phần đã được nhận diện rõ dưới dạng các sự kiện trung gian (Intermediate Events) và sự kiện cơ bản (Basic Events) trong cấu trúc logic của FTA. Dựa vào đó, bước tiếp theo trong quy trình phân tích là trích xuất các chế độ hỏng đặc trưng của từng thành phần để đưa vào bảng FMECA.

Mỗi chế độ hỏng được xem là nguyên nhân trực tiếp gây ra sự cố ở cấp thành phần, và là đầu vào chính để đánh giá rủi ro trong mô hình FMECA. Việc sử dụng cây lỗi như một công cụ khởi đầu giúp đảm bảo rằng các chế độ hỏng được phân tích trong FMECA có nguồn gốc rõ ràng từ logic vận hành thực tế của hệ thống, tránh bỏ sót hoặc đánh giá chủ quan.

Cụ thể, các chế độ hỏng được xác định từ FTA và được sử dụng trong bảng FMECA bao gồm:

- Lỗi với các hư hỏng chính là: Lỏng lõi thép; dịch chuyển lõi
- Cuộn dây với các hư hỏng chính là: Ngắn mạch vòng; đứt cuộn dây
- Thùng dầu với các hư hỏng chính là: Rò rỉ dầu; mất khả năng bảo vệ khỏi môi trường
- Cách điện với các hư hỏng chính là: Phóng điện cục bộ; đánh thủng cách điện
- Dầu cách điện với các hư hỏng chính là: Nhiễm bẩn dầu; mất khả năng cách điện
- Xứ xuyên với các hư hỏng chính là: Nứt, vỡ sứ xuyên; phóng điện bề mặt; ngắn mạch bên trong

Danh sách trên không chỉ được sử dụng để xây dựng bảng phân tích FMECA mà còn là cơ sở để tính toán các chỉ số RPN, từ đó phục vụ cho việc hiệu chỉnh thời gian bảo trì tối ưu trong mô hình Weibull ở bước tiếp theo. Mối liên hệ giữa FTA và FMECA

trong nghiên cứu này không chỉ dừng ở mức mô hình hóa, mà còn được duy trì xuyên suốt trong toàn bộ quy trình đánh giá và ra quyết định bảo trì.

Bước 3: Phân tích ảnh hưởng của lỗi.

Sau khi xác định các chế độ hỏng cho từng thành phần trong máy biến áp, bước tiếp theo là đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng lỗi này đối với hiệu suất và độ tin cậy chung của thiết bị. Đây là phần cốt lõi của quá trình FMECA, trong đó mức độ nghiêm trọng (Severity) được xem xét trên cơ sở các hậu quả kỹ thuật có thể xảy ra nếu lỗi không được phát hiện và xử lý kịp thời.

Lỗi thép: Các lỗi như lỏng lõi thép hoặc dịch chuyển lõi tuy không xảy ra thường xuyên, nhưng có thể dẫn đến hiện tượng cộng hưởng từ hoặc tiếp đất nhiều điểm. Theo thống kê trong [4], đây là những yếu tố làm suy yếu lực kẹp cơ học và tính cách điện của lõi thép, từ đó dẫn đến hiện tượng phóng điện hoặc chập mạch nội bộ nghiêm trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ của máy biến áp.

Cuộn dây: Là bộ phận mang dòng chính, cuộn dây thường hỏng do ngắn mạch hoặc quá điện áp thoáng qua. Theo [3] và [5] các lỗi như ngắn mạch vòng dây, đứt cuộn dây hoặc quá áp do sét có thể gây ra sụp đổ hoàn toàn của hệ thống cách điện nội bộ, dẫn đến hỏng hoàn toàn máy biến áp và làm gián đoạn cung cấp điện nghiêm trọng trên lưới phân phối.

Thùng dầu: Thùng dầu đóng vai trò bảo vệ vật lý và duy trì áp suất ổn định cho phần lõi và cuộn dây. Theo [6] các lỗi như rò rỉ dầu hoặc biến dạng cơ học không chỉ gây thất thoát dầu cách điện mà còn làm giảm khả năng làm mát, tạo điều kiện cho sự gia tăng nhiệt nội bộ và tăng nguy cơ xảy ra phóng điện nội bộ. Trong một số trường hợp, áp suất tăng đột ngột có thể làm vỡ thùng dầu, gây ảnh hưởng tới thiết bị xung quanh và tạo ra nguy cơ an toàn cho con người.

Cách điện rắn: Đây là bộ phận dễ bị suy giảm nhất trong hệ thống cách điện tổng thể của máy biến áp. Theo các nghiên cứu trong [3], [5] các lỗi như phóng điện cục bộ, đánh thủng cách điện, hoặc suy giảm do lão hóa cellulose đều làm mất khả năng cách điện, gây ra hiện tượng phóng điện xuyên lớp và chập cháy giữa các pha hoặc với vỏ máy, ảnh hưởng đến an toàn vận hành và khả năng chịu đựng ngắn mạch của thiết bị.

Dầu cách điện: Dầu cách điện bị nhiễm ẩm, lão hóa hoặc kém tuần hoàn có thể làm giảm điện áp đánh thủng và làm tăng điện trở bên trong, gây hiện tượng quá nhiệt và giảm khả năng làm mát. Theo [5] trong điều kiện như vậy, khả năng cách điện của dầu bị suy giảm đáng kể, làm tăng nguy cơ ngắn mạch nội bộ và dẫn đến sự cố lan rộng, nếu không được xử lý kịp thời.

Sứ xuyên: Là nơi tiếp xúc trực tiếp giữa bên trong và bên ngoài máy biến áp, sứ xuyên thường bị hỏng do phóng điện bề mặt, ngắn mạch trong, hoặc nứt vỡ do tác động cơ

học. Theo [5] các sự cố này có thể gây rò rỉ dòng rò, đánh thủng điện áp đầu nối, và nếu nghiêm trọng, có thể phá hủy hoàn toàn khả năng cách điện đầu ra của máy biến áp, gây nguy cơ cho cả thiết bị và con người xung quanh.

Bước 4: Xác định nguyên nhân lỗi (Cause Analysis).

Phân tích nguyên nhân gốc rễ của các chế độ hư hỏng là bước kế tiếp trong quy trình FMECA, nhằm xác định cơ chế phát sinh lỗi để từ đó đánh giá khả năng xảy ra lỗi (Occurrence) một cách sát thực nhất. Dựa trên tổng hợp từ tài liệu kỹ thuật, báo cáo vận hành và các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến máy biến áp ngâm dầu, các nguyên nhân hỏng chính cho từng thành phần được trình bày như sau:

Lỗi thép: Các lỗi cơ học như lỏng lõi thép hoặc dịch chuyển vị trí thường bắt nguồn từ sự suy giảm lực kẹp trong hệ thống cố định lõi, gây ra bởi lão hóa vật liệu cách điện, ứng suất cơ học lặp lại trong quá trình vận hành dài hạn, hoặc rung động môi trường. Những thay đổi này dẫn đến mất ổn định cấu trúc lõi, làm tăng nguy cơ cộng hưởng từ hoặc phóng điện đa điểm về đất [4]. Việc xác định đúng nguyên nhân này là cơ sở để ước lượng đúng khả năng xảy ra lỗi (O) trong FMECA.

Cuộn dây: Là thành phần phức tạp chịu nhiều tác động cơ, nhiệt, điện, cuộn dây dễ bị ảnh hưởng bởi nhiều nguyên nhân đồng thời. Các lỗi có thể bắt nguồn từ sai sót cơ học trong quá trình chế tạo, lỗi vật liệu cách điện, sự hình thành điểm nóng cục bộ do tải quá mức, tích tụ cặn đồng dẫn đến suy giảm dẫn điện, hoặc tình trạng mức dầu thấp làm giảm khả năng cách điện. Ngoài ra, các sự cố bên ngoài như sét đánh, đấu nối sai, hoặc ngắn mạch ở hệ thống hạ áp có thể tạo ra quá áp đột ngột dẫn đến hỏng cách điện và ngắn mạch vòng dây [3,5]. Tất cả các nguyên nhân này cần được định lượng để phục vụ phân tích RPN.

Thùng dầu: Thùng dầu thường hỏng do các yếu tố vật lý và hóa học. Ăn mòn có thể xảy ra nếu bề mặt tiếp xúc trực tiếp với môi trường ẩm ướt, khí hậu ăn mòn hoặc hóa chất công nghiệp. Mặt khác, thùng dầu dễ bị va đập trong quá trình vận chuyển hoặc lắp đặt. Trong điều kiện vận hành khắc nghiệt, áp suất bên trong tăng cao (do hồ quang nội bộ hoặc giãn nở nhiệt) cũng có thể gây biến dạng hoặc nứt vỡ [6]. Những yếu tố này ảnh hưởng trực tiếp đến chức năng bảo vệ và duy trì áp suất ổn định cho hệ thống.

Cách điện rắn: Cách điện rắn, chủ yếu làm từ vật liệu cellulose, dễ bị suy giảm theo thời gian do lão hóa cấu trúc polymer, ảnh hưởng bởi nhiệt độ cao, độ ẩm xâm nhập, hoặc điện áp vượt quá giới hạn thiết kế. Một số cơ chế điển hình bao gồm phân hủy do điểm nóng, sự tích tụ ion đồng, hoặc phá hủy bởi quá áp đột ngột. Khi hệ số polymer hóa (DP) xuống thấp, tính chất cơ học của giấy cách điện suy giảm rõ rệt, làm tăng nguy cơ đánh thủng điện [5]. Những yếu tố này cần được đưa vào đánh giá nguy cơ phát sinh lỗi trong phân tích FMECA.

Dầu cách điện: Dầu cách điện suy giảm do quá trình oxy hóa, nhiệt độ cao, độ ẩm và sự có mặt của oxy. Những yếu tố này làm thay đổi cấu trúc hóa học của dầu, sinh ra các chất dẫn điện và làm tăng độ nhớt, từ đó giảm hiệu quả truyền nhiệt và làm mát. Khi khả năng cách điện giảm, điện áp đánh thủng cũng bị hạ thấp, làm tăng nguy cơ xảy ra phóng điện hoặc ngắn mạch nội bộ [5]. Đây là những nguyên nhân phổ biến dẫn đến mất chức năng cách điện ở môi trường chất lỏng.

Sứ xuyên: Các sự cố thường xảy ra do nứt vỡ vật lý, hư hỏng gioăng cao su làm nước xâm nhập vào bên trong lớp cách điện, hoặc do va chạm cơ học trong quá trình vận chuyển, lắp đặt. Một số sự cố còn có thể bắt nguồn từ mảnh vỡ bên ngoài bắn vào, phá vỡ cấu trúc bề mặt hoặc lớp dẫn. Khi chất cách điện bên trong sứ xuyên bị nhiễm ẩm, điện áp đánh thủng giảm đáng kể, gây nguy cơ rò rỉ dòng và phóng điện bề mặt [5]. Những nguyên nhân này là đầu vào quan trọng trong tính toán chỉ số O và D trong bảng FMECA.

Bước 5: Đánh giá mức độ nghiêm trọng (S).

Trong phân tích FMECA, mức độ nghiêm trọng S phản ánh hậu quả kỹ thuật và vận hành mà một chế độ hỏng có thể gây ra nếu xảy ra. Thông thường, thang đánh giá từ 1 đến 10 được sử dụng để xếp loại theo tiêu chuẩn MIL-STD-1629A, trong đó điểm càng cao thì mức độ ảnh hưởng càng nghiêm trọng đối với thiết bị hoặc hệ thống. Việc xác định đúng mức độ nghiêm trọng không chỉ giúp định lượng rủi ro chính xác hơn, mà còn hỗ trợ phân loại lỗi theo mức ưu tiên xử lý.

Dựa vào tiêu chí đánh giá ở Bảng 2.2 và các hậu quả kỹ thuật đã phân tích ở bước 3, ta xây dựng được nội dung bảng dưới đây, thể hiện điểm đánh giá mức độ nghiêm trọng đối với từng thành phần:

Bảng 3.3. Mức độ nghiêm trọng S.

Thành phần	Ảnh hưởng	Mức độ nghiêm trọng (S)
Lõi thép	Dẫn đến chập mạch nhiều điểm, nguy cơ ngắn mạch cao, giảm tuổi thọ MBA	9
Cuộn dây	Gây hỏng hoàn toàn MBA, làm gián đoạn cung cấp điện	10
Thùng dầu	Gây thất thoát dầu, giảm khả năng làm mát, dẫn đến hỏng hóc điện	7
Cách điện	Làm mất khả năng cách điện, nguy cơ phóng điện, chập cháy	9
Dầu cách	Tăng nhiệt độ làm suy giảm cách điện, gây ngắn	8

điện	mạch	
Sứ xuyên	Gây ngắn mạch nguy hiểm cho thiết bị và con người	9

Bước 6: Đánh giá tần suất lỗi (O).

Chỉ số Occurrence (O) trong phân tích FMECA phản ánh tần suất hoặc xác suất lỗi xảy ra trong thực tế. Việc ước lượng đúng chỉ số O có vai trò quan trọng trong việc xây dựng chỉ số ưu tiên rủi ro RPN, giúp ưu tiên các chế độ hỏng có nguy cơ cao ngay cả khi hậu quả chưa quá nghiêm trọng. Trong nghiên cứu này, O được đánh giá theo thang điểm từ 1 đến 10, dựa trên tiêu chuẩn MIL-STD-1629A và các khuyến nghị của các hệ thống quản lý rủi ro trong công nghiệp điện lực.

Dựa vào dữ liệu thống kê về số lỗi trong 6 năm từ hệ thống 348 máy biến áp của PSPCL Ấn Độ đã trình bày trong Bảng 3.2. Nhóm đã tiến hành tính toán trung bình số lỗi mỗi năm cho từng thành phần, sau đó so sánh với tiêu chí ở Bảng 2.3 để xây dựng bảng tính toán tần suất xảy ra lỗi được trình bày như Bảng 3.4 dưới đây.

Bảng 3.4. Tần suất xảy ra lỗi O.

Thành phần	Tổng số lượng lỗi trong 6 năm	Trung bình số lỗi mỗi năm	Tần suất xảy ra lỗi Occurrence - O
Lỗi thép	14	2.33	5
Cuộn dây	54	9	7
Thùng dầu	9	1.5	5
Cách điện	145	24.17	9
Dầu cách điện	23	3.83	6
Sứ xuyên	49	8.17	7

Bước 7: Đánh giá khả năng phát hiện lỗi (D).

Chỉ số Detectability (D) phản ánh khả năng phát hiện lỗi trước khi nó dẫn đến sự cố nghiêm trọng. Trong mô hình FMECA, D được đánh giá trên thang điểm từ 1 đến 10, trong đó điểm càng cao thể hiện khả năng phát hiện càng thấp. Việc xác định đúng chỉ số D giúp phân biệt rõ giữa các lỗi dễ kiểm soát (phát hiện sớm) và các lỗi tiềm ẩn, khó phát hiện nhưng có thể gây hậu quả nghiêm trọng nếu không được giám sát hiệu quả.

Dựa trên các chế độ hỏng đã trình bày ở Bước 2, Bảng 2.5 và phân tích kỹ thuật từ các tài liệu chuyên ngành về thiết bị điện lực [3, 4, 5], nhóm đã nghiên cứu tổng hợp các phương pháp giám sát tương ứng và đánh giá khả năng phát hiện được trình bày tại Bảng 3.5 sau:

Bảng 3.5. Khả năng phát hiện lỗi (Detectability - D).

Thành phần	Chế độ hỏng hóc	Phương pháp phát hiện	Khả năng phát hiện Detectability - D
Lỗi	Lỏng lõi thép Dịch chuyển lõi	DGA, Đo dòng điện rò rỉ, Phân tích rung động	8
Cuộn dây	Ngắn mạch vòng Đứt cuộn dây	FRA, Đo điện trở cuộn dây, Phân tích dòng rò cách điện	9
Thùng dầu	Rò rỉ dầu Mất khả năng bảo vệ	Quan sát rò rỉ dầu, Kiểm tra áp suất khí, Kiểm tra siêu âm	3
Cách điện rắn	Phóng điện cục bộ, đánh thủng cách điện	Tan Delta Test, Đo điện trở cách điện, PD Test	8
Dầu cách điện	Nhiễm bẩn dầu Mất khả năng cách điện	DGA, Đo điện áp đánh thủng dầu, Kiểm tra độ ẩm	3
Sứ xuyên	Nứt, vỡ sứ xuyên Phóng điện bề mặt Ngắn mạch trong	Camera nhiệt, Đo dòng rò, Kiểm tra điện dung & Tan Delta	7

Bước 8: Tính toán chỉ số ưu tiên rủi ro RPN.

Dựa trên các chỉ số đã xác định ở các bước trước mức độ nghiêm trọng (S), tần suất xảy ra lỗi (O), và khả năng phát hiện (D), chỉ số RPN được tính theo công thức

$$RPN = S \times O \times D$$

RPN phản ánh mức độ ưu tiên xử lý của từng chế độ hỏng hóc. Trong nghiên cứu này, việc phân loại RPN được thực hiện theo các mức như sau:

- $RPN \geq 500$: Rủi ro rất cao nên cần được ưu tiên xử lý ngay
- $100 \leq RPN < 500$: Rủi ro cao cần phải bảo trì định kỳ
- $RPN < 100$: Rủi ro thấp nên có thể giám sát thụ động

Bảng 3.6 dưới trình bày kết quả tính toán RPN cho các thành phần của máy biến áp.

Bảng 3.6. Tính toán RPN.

Thành phần	Mức độ nghiêm trọng (S)	Tần suất xảy ra lỗi (O)	Khả năng phát hiện lỗi (D)	RPN
Lỗi	9	5	8	360
Cuộn dây	10	7	9	630
Thùng dầu	7	5	3	105
Cách điện	9	9	8	648
Dầu cách điện	8	6	3	144
Sứ xuyên	9	7	7	441

Kết quả cho thấy cách điện rắn và cuộn dây là hai thành phần có RPN cao nhất (trên 600), đòi hỏi phải ưu tiên can thiệp kỹ thuật hoặc nâng cấp hệ thống giám sát. Các thành phần như sứ xuyên và lõi tuy không thường xuyên hỏng, nhưng do hậu quả lớn và khó phát hiện nên vẫn nằm trong nhóm cần theo dõi định kỳ. Trong khi đó, dầu cách điện và thùng dầu có thể quản lý hiệu quả thông qua bảo trì giám sát thông thường.

Bước 9: Tính toán mức độ quan trọng (CA).

Mức độ quan trọng (CA – Criticality Analysis) là một chỉ số hỗ trợ trong phân tích FMECA nhằm đánh giá mức ảnh hưởng tiềm năng của một lỗi khi xét đến mức độ nghiêm trọng và tần suất xảy ra. Không giống như RPN (có xét thêm yếu tố phát hiện), chỉ số CA giúp nhận diện các chế độ hỏng có thể gây tác động lớn trong thực tế, đặc

biệt trong điều kiện giám sát hạn chế, CA được tính theo công thức được trình bày dưới đây, đồng thời bảng 3.7 cũng thể hiện kết quả tính toán CA cho các thành phần máy biến áp.

$$CA = S \times O \quad (3.1)$$

Bảng 3.7. Tính toán CA.

Thành phần	Mức độ nghiêm trọng (S)	Tần suất xảy ra lỗi (O)	Khả năng phát hiện lỗi (D)
Lỗi	9	5	45
Cuộn dây	10	7	70
Thùng dầu	7	5	35
Cách điện	9	9	81
Dầu cách điện	8	6	48
Sứ xuyên	9	7	63

Dựa trên giá trị CA, các thành phần được phân loại theo mức độ ưu tiên giám sát như sau:

- CA rất cao (≥ 70): Gồm cách điện rắn ($CA = 81$) và cuộn dây ($CA = 70$) đây là hai thành phần quan trọng nhất cần được ưu tiên giám sát liên tục do tần suất lỗi cao và hậu quả nghiêm trọng nếu xảy ra sự cố. Giải pháp: Kết hợp giám sát PD, đo điện trở, cảm biến dòng nhiệt và đánh giá định kỳ chất lượng cách điện.
- CA cao (50 – 69): Sứ xuyên ($CA = 63$) nằm trong nhóm cần bảo trì định kỳ chặt chẽ do lỗi có thể gây phóng điện và thường khó phát hiện sớm. Giải pháp: Ứng dụng kiểm tra camera nhiệt, đo điện dung, và phân tích dấu hiệu rò rỉ.
- CA trung bình (40 – 49): Gồm lõi thép và dầu cách điện, cần theo dõi thường xuyên vì mặc dù mức độ nghiêm trọng cao nhưng tần suất xảy ra thấp hoặc khả năng kiểm soát tốt hơn. Giải pháp: Phân tích rung động, kiểm tra dầu định kỳ, lọc dầu online.
- CA thấp (< 40): Thùng dầu ($CA = 35$) có mức độ ảnh hưởng tương đối thấp và dễ phát hiện có thể giám sát thụ động nếu thiết bị vận hành ổn định. Giải pháp: Quan sát rò rỉ trực quan, đo áp suất hoặc sử dụng cảm biến phát hiện dầu.

Bước 10: Đề xuất biện pháp giảm thiểu rủi ro.

Sau khi xác định các chỉ số RPN và CA, việc xây dựng các giải pháp kiểm soát rủi ro trở thành bước then chốt để hoàn thiện quy trình FMECA. Tùy theo mức độ nghiêm trọng và khả năng xảy ra lỗi, các thành phần được phân loại thành ba nhóm: cần xử lý ngay, cần theo dõi định kỳ, và có thể giám sát thường xuyên. Các giải pháp đề xuất dưới đây dựa trên nguyên tắc kết hợp giữa cải tiến kỹ thuật, tăng cường giám sát và áp dụng chiến lược bảo trì dự đoán.

(a). Thành phần cần ưu tiên xử lý ngay

- Cách điện rắn: $RPN = 648$, $CA = 81$

Nguy cơ mất khả năng cách điện có thể dẫn đến phóng điện, chập cháy nghiêm trọng.

Lắp đặt cảm biến phóng điện cục bộ (PD sensors) để phát hiện suy giảm điện môi sớm; Phân tích dầu cách điện định kỳ bằng phương pháp DGA nhằm đánh giá sự hình thành khí hòa tan; Ưu tiên sử dụng vật liệu cách điện có độ bền nhiệt cao và cải tiến cấu trúc cách điện; Triển khai chương trình bảo trì dự đoán (PdM) dựa trên giám sát online liên tục.

- Cuộn dây: $RPN = 630$, $CA = 70$

Hư hỏng cuộn dây như ngắn mạch vòng hoặc đứt dây có thể dẫn đến sự cố toàn phần của máy biến áp.

Áp dụng cảm biến nhiệt độ và dòng điện để phát hiện điểm nóng cục bộ; Kiểm tra định kỳ điện trở cuộn dây để phát hiện sớm tình trạng suy giảm điện trở; Cải thiện quy trình sản xuất, lựa chọn vật liệu cách điện có khả năng chịu tải nhiệt tốt hơn; Áp dụng PdM để thay thế cuộn dây trước khi xảy ra sự cố lớn.

(b). Thành phần cần theo dõi và bảo trì định kỳ

- Sứ xuyên: $RPN = 441$, $CA = 63$

Lỗi thường phát sinh do nứt vỡ, phóng điện bề mặt hoặc ngắn mạch bên trong.

Sử dụng camera nhiệt để phát hiện dấu hiệu quá nhiệt tại điểm tiếp xúc sứ xuyên; Thay thế các sứ xuyên cũ bằng loại có vật liệu cách điện cải tiến; Lắp cảm biến theo dõi tình trạng sứ xuyên trực tuyến (online monitoring).

- Lõi thép: $RPN = 360$, $CA = 45$

Các lỗi cơ khí như lỏng lõi hoặc dịch chuyển có thể gây phóng điện cục bộ hoặc từ hóa không đồng đều.

Giám sát rung động lõi bằng cảm biến gia tốc độ nhạy cao; Tăng cường cơ cấu cố định và cải tiến thiết kế kẹp lõi để nâng cao độ ổn định cơ học; Thực hiện đo tổn hao từ thông và kiểm tra định kỳ bằng phương pháp phân tích từ trường.

(c). Thành phần cần giám sát định kỳ ($RPN < 200$)

- Dầu cách điện: $RPN = 144$, $CA = 48$

Nhiễm bẩn và suy giảm chất lượng dầu ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất cách điện.

Phân tích dầu định kỳ bằng phương pháp DGA, kiểm tra điện áp đánh thủng và độ ẩm; Sử dụng hệ thống lọc dầu online để kéo dài tuổi thọ dầu và duy trì độ tinh khiết; Thay dầu khi các chỉ số hóa lý vượt quá giới hạn tiêu chuẩn.

- Thùng dầu: $RPN = 105$, $CA = 35$

Rò rỉ dầu có thể làm mất môi trường cách điện và làm giảm hiệu quả làm mát.

Lắp cảm biến rò rỉ dầu để kịp thời phát hiện các vết nứt hoặc rò nhỏ; Kiểm tra định kỳ các mối hàn và gioăng cao su, đặc biệt tại vị trí chịu ứng suất; Sử dụng vật liệu chống ăn mòn và áp dụng lớp phủ bảo vệ để nâng cao tuổi thọ kết cấu.

3.2.4. Tổng kết

Việc kết hợp phân tích cây lỗi và phân tích chế độ hỏng hóc - hậu quả trong nghiên cứu này đã tạo nên một mô hình phân tích rủi ro đa tầng, vừa trực quan vừa định lượng. FTA đóng vai trò là công cụ nhận diện nguyên nhân gốc rễ thông qua cấu trúc logic các sự kiện gây hỏng hóc của máy biến áp, từ đó cho phép xây dựng sơ đồ hỏng hóc hệ thống một cách hệ thống và minh bạch. Những sự kiện trung gian (intermediate events) thu được từ cây lỗi sau đó được sử dụng làm đầu vào cho quá trình phân tích FMECA nơi mỗi thành phần được đánh giá theo ba yếu tố: mức độ nghiêm trọng (S), tần suất xảy ra (O), và khả năng phát hiện lỗi (D).

Thông qua chỉ số RPN và CA, nghiên cứu đã xác định được những điểm yếu then chốt trong hệ thống như cách điện, cuộn dây và sứ xuyên dây là các thành phần vừa khó giám sát, vừa có hậu quả nghiêm trọng nếu xảy ra lỗi. Trong khi đó, những lỗi cơ học như ở thùng dầu hoặc suy giảm chất lượng dầu có thể kiểm soát tốt bằng các biện pháp giám sát định kỳ.

Sự kết hợp giữa FTA và FMECA không chỉ mang lại cái nhìn đa chiều về mối quan hệ nhân quả trong hệ thống mà còn làm rõ mức độ rủi ro của từng cơ chế hỏng, từ đó hình thành nền tảng dữ liệu định lượng để áp dụng các mô hình dự đoán nâng cao như Weibull. Cách tiếp cận này thể hiện tính khả thi cao trong thực tiễn bảo trì công nghiệp, đặc biệt là trong bối cảnh dữ liệu lịch sử hoạt động là nguồn thông tin chính được khai thác để lập kế hoạch bảo trì.

3.3. Xác định thời gian bảo trì tối ưu bằng phân phối Weibull

3.3.1 Ước lượng thời điểm bảo trì

Dựa trên cơ sở lý thuyết về phân phối Weibull được trình bày ở Chương 2, phần này tiến hành áp dụng mô hình vào dữ liệu thực nghiệm để xác định thời điểm bảo trì tối ưu cho từng thành phần trong máy biến áp.

Trong nghiên cứu này, thời điểm bảo trì được xác định dựa trên ngưỡng xác suất sống sót là 95%. Tức là, khi $R(t) < 0.95$, bảo trì sẽ được kích hoạt nhằm giảm thiểu nguy cơ xảy ra hỏng hóc đột ngột.

Để tính toán chính xác thời điểm bảo trì tối ưu t , cần xác định hai tham số Weibull là β và η . Tham số hình dạng β được lựa chọn dựa trên cơ chế hỏng hóc thực tế của từng thành phần máy biến áp. Theo ReliaSoft1 (2024) [19] giá trị β phản ánh bản chất hỏng hóc như sau:

- $\beta < 1$: Hỏng hóc chủ yếu do lỗi sản xuất hoặc lỗi giai đoạn đầu (tử vong sớm),
- $\beta = 1$: Hỏng hóc ngẫu nhiên, không phụ thuộc vào thời gian,
- $\beta > 1$: Hỏng hóc do lão hóa hoặc mòn hao theo thời gian.

Dựa trên phân loại này và nội dung ở bước 4 của quá trình xây dựng FMECA miêu tả các nguyên nhân phổ biến của hư hỏng tại thành phần máy biến áp như lão hóa nhiệt trong vật liệu cách điện, rò rỉ cơ học ở thùng dầu, hay phóng điện cục bộ ở sứ xuyên, các giá trị β thích hợp đã được lựa chọn và trình bày chi tiết trong Bảng 3.8 sau.

Bảng 3.8. Giá trị đặc trưng kiểu hỏng hóc β .

i	Thành phần	Mô tả hỏng hóc	Giá trị β
1	Lỗi thép	Hỏng hiếm gặp, thường do lỗi thiết kế ban đầu	0.8
2	Cuộn dây	Hỏng hóc ngẫu nhiên hoặc do dao động nhiệt	1
3	Dầu cách điện	Nhiễm bẩn dầu, oxy hóa	1.2
4	Thùng dầu	Rò rỉ dầu lâu dài, mòn mỏi cơ học	1.2
5	Sứ xuyên	Giòn, dễ vỡ nứt vào cuối vòng đời	1.8
6	Cách điện rắn	Lão hóa cellulose làm suy giảm cách điện, hỏng bất ngờ do sét đánh/xung áp cao	1.5

Sau khi xác định tham số hình dạng β cho từng thành phần của máy biến áp dựa trên đặc tính hỏng hóc và phân phối Weibull, bước tiếp theo là tính tham số tỷ lệ η . Đây là một yếu tố quan trọng trong hàm sống sót Weibull, vì nó phản ánh một cách hiệu quả tính ngẫu nhiên của thời gian hỏng hóc và ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của thiết bị theo thời gian.

Việc ước lượng chính xác tham số η cho phép mô hình hóa đúng đường cong độ tin cậy, từ đó giúp xác định thời điểm bảo trì tối ưu thay vì phải phụ thuộc vào các lịch trình bảo trì cố định. Việc tính toán η được thực hiện dựa trên dữ liệu thực nghiệm về thời gian vận hành và số lần hỏng hóc, cụ thể thông qua chỉ số Thời gian trung bình giữa các lần hỏng MTBF [23]. Chỉ số MTBF cho một thành phần i được xác định theo công thức:

$$MTBF_i = \frac{T_{total}}{N_{failures,i}}$$

Trong đó:

- N_i là số lần hỏng đã ghi nhận đối với thành phần i ,
- T là tổng thời gian vận hành của tất cả các thành phần trên toàn bộ số lượng máy biến áp được xem xét.

Trong nghiên cứu này, dữ liệu được thu thập từ 348 máy biến áp hoạt động liên tục trong vòng 6 năm. Mỗi máy biến áp gồm 6 thành phần chính: lõi thép, cuộn dây, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện và sứ xuyên. Do đó, tổng thời gian vận hành của tất cả các thành phần trên toàn bộ số máy biến áp được tính như sau:

$$T_{total} = 348 \times 6 \times 365 = 762,120 \text{ ngày}$$

Số lần hỏng và giá trị MTBF tương ứng cho từng thành phần được trình bày trong Bảng 3.9 dưới đây.

Bảng 3.9. Thời gian trung bình giữa 2 lần hỏng hóc.

i	Thành phần	Số lỗi $N_{failures,i}$	MTBF_i (ngày)
1	Lõi	14	54437
2	Cuộn dây	54	14113
3	Thùng dầu	9	84680
4	Cách điện rắn	145	5256
5	Dầu cách điện	23	33136
6	Sứ xuyên	49	15553

Sau khi có được thông số MTBF của các thành phần tiếp theo ta tiến hành tính toán η dựa theo công thức được trình bày như sau [24].

$$\eta_i = \frac{MTBF_i}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right)}$$

Trong đó $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right)$ biểu thị hàm Gamma, được sử dụng để điều chỉnh mối quan hệ giữa thời gian trung bình giữa các lần hỏng (MTBF) và tham số tỷ lệ η trong phân phối Weibull. Hàm Gamma cho phép mô hình hóa linh hoạt các phân phối hỏng hóc không đối xứng, tùy thuộc vào giá trị của tham số hình dạng β .

Các giá trị tham số tỷ lệ η được tính toán cho từng thành phần máy biến áp được trình bày chi tiết trong Bảng 3.10.

Bảng 3.10. Các tham số tỷ lệ ước lượng của phân phối Weibull.

i	Thành phần	β	MTBF(ngày)	$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right)$	$\eta(\text{ngày})$
1	Lõi	0.8	54437	1.113	48047
2	Cuộn dây	1	14113	1	14113
3	Thùng dầu	1.2	84680	0.9407	90022
4	Cách điện rắn	1.2	5256	0.9407	5588
5	Dầu cách điện	1.8	33136	0.8893	37261
6	Sứ xuyên	1.5	15553	0.9027	17229

Dựa trên dữ liệu được trình bày trong Bảng 3.10, phân phối Weibull được sử dụng để ước tính thời điểm bảo trì tối ưu trung bình cho từng thành phần của máy biến áp. Việc lựa chọn ngưỡng xác suất sống sót trong nghiên cứu này được xây dựng dựa trên chiến lược bảo trì phòng ngừa chủ động, với mục tiêu đảm bảo độ tin cậy cao cho hệ thống.

Trong các hệ thống kỹ thuật quan trọng như máy biến áp điện nơi mà sự cố có thể gây ra gián đoạn dịch vụ nghiêm trọng và tổn thất kinh tế lớn việc tiến hành bảo trì khi xác suất sống sót vẫn còn ở mức 95% giúp phòng tránh các hỏng hóc đột ngột [29]. Thay vì chờ đến khi xác suất sống sót giảm xuống 0.5 như một số nghiên cứu khác, việc áp dụng ngưỡng 0.95 giúp định hướng mô hình bảo trì dự đoán theo hướng tăng tính sẵn sàng và nâng cao độ an toàn vận hành [30].

Ngưỡng này cũng phù hợp với các xu hướng hiện đại trong lĩnh vực bảo trì theo điều kiện (condition-based maintenance), nơi mà các hành động bảo trì được kích hoạt ngay

từ giai đoạn đầu của quá trình suy giảm, thay vì trì hoãn cho đến khi thiết bị gần như hỏng hoàn toàn.

Cuối cùng, thời điểm bảo trì t^* cho mỗi thành phần i được xác định theo Phương trình (7) và trình bày trong Bảng 3.11.

Bảng 3.11. Thời gian bảo trì tối ưu cho từng thành phần máy biến áp.

i	Thành phần	β	η (ngày)	$R(t)$	t^* (ngày)
1	Lõi	0.8	48047	0.95	1173
2	Cuộn dây	1	14113	0.95	724
3	Thùng dầu	1.2	90022	0.95	7575
4	Cách điện rắn	1.2	5588	0.95	470
5	Dầu cách điện	1.8	37261	0.95	7155
6	Sứ xuyên	1.5	17229	0.95	2378

3.3.2. Hiệu chỉnh thời gian bảo trì theo FMECA bằng hệ số α

a) Cơ sở để hiệu chỉnh α

Mặc dù phân phối Weibull là công cụ hữu hiệu trong việc ước lượng thời điểm bảo trì tối ưu t , dựa trên các tham số thống kê như hệ số hình dạng β , hệ số tỷ lệ η , và một ngưỡng xác suất sống sót định trước thường lấy $R(t) = 0,95$, song việc áp dụng trực tiếp kết quả này vào kế hoạch bảo trì thực tế thường vẫn chưa hợp lý trong mọi trường hợp. Nguyên nhân là bởi nhiều thành phần thiết bị đặc biệt như thùng dầu hoặc dầu cách điện có số lần hỏng rất thấp trong dữ liệu lịch sử, khiến cho tham số η trở nên rất lớn. Điều này dẫn đến thời điểm bảo trì được tính toán có thể kéo dài đến hơn 15 hoặc 20 năm vượt quá chu kỳ kiểm tra kỹ thuật định kỳ thông thường của ngành điện lực. Ngoài ra, yếu tố môi trường như nhiệt độ cao, độ ẩm, quá áp hay dao động tải cũng có thể làm gia tăng nguy cơ hỏng hóc mà mô hình Weibull đơn thuần không thể dự báo chính xác.

Để hiệu chỉnh điều này, nghiên cứu kết hợp thêm chỉ số ưu tiên rủi ro RPN từ phân tích FMECA nhằm rút ngắn thời gian bảo trì dựa trên mức độ rủi ro thực tế. Cụ thể, thời gian bảo trì hiệu chỉnh t_i^* được xác định theo công thức:

$$t_i^{**} = t_i^* \times \left(1 - \alpha \frac{RPN_i}{RPN_{\max}} \right)$$

Trong đó:

- t_i^* : thời điểm bảo trì tối ưu từ Weibull (với $R(t)=0.95$)
- t_i^{**} : thời gian bảo trì sau hiệu chỉnh theo RPN;
- RPN_i : chỉ số rủi ro của thành phần i, lấy từ FMECA;
- RPN_{\max} : RPN lớn nhất trong tất cả các thành phần;
- α_i : hệ số điều chỉnh theo mức ưu tiên bảo trì, giá trị này nằm trong khoảng từ 0 đến 0.5, do người phân tích xác định dựa vào chiến lược vận hành, điều kiện môi trường và khả năng phát hiện sớm lỗi.

Việc sử dụng α_i trong công thức không chỉ phản ánh ý chí chủ động bảo trì sớm các thành phần nguy hiểm, mà còn giúp linh hoạt điều chỉnh lịch trình kỹ thuật phù hợp với từng loại thiết bị và từng điều kiện khai thác cụ thể. Thông qua sự tích hợp này, mô hình bảo trì phòng ngừa trở nên thực tiễn hơn và có thể tối ưu hóa hiệu quả kinh tế, độ tin cậy và an toàn hệ thống.

b) Thực hiện hiệu chỉnh thời gian bảo trì.

Dựa trên thời điểm bảo trì ban đầu t_i^* được tính từ phân phối Weibull và kết quả phân tích RPN từ FMECA, áp dụng vào công thức (2.8) được trình bày ở phần trên, thời gian bảo trì cho từng thành phần được điều chỉnh nhằm phản ánh đúng mức độ ưu tiên can thiệp dựa trên rủi ro. Quá trình hiệu chỉnh này giúp mô hình bảo trì trở nên linh hoạt và thực tiễn hơn, đồng thời phù hợp với cả mục tiêu kỹ thuật lẫn điều kiện vận hành. Kết quả chi tiết được trình bày trong Bảng 3.12 dưới đây.

Bảng 3.12. Thời gian bảo trì hiệu chỉnh.

i	Thành phần	t_i^*	α	RPN	t_i^{**}
1	Lỗi	1173	0.3	360	997
2	Cuộn dây	724	0.4	630	442
3	Thùng dầu	7575	0.5	105	6962
4	Cách điện rắn	470	0.5	648	235

5	Dầu cách điện	7155	0.5	144	6360
6	Sứ xuyên	2378	0.3	441	1731

Các thành phần có RPN cao như cuộn dây và cách điện rắn được rút ngắn đáng kể thời gian bảo trì nhằm phát hiện sớm và xử lý trước khi xảy ra hư hỏng nghiêm trọng.

Trong khi đó, thùng dầu và dầu cách điện tuy có tuổi thọ rất cao, nhưng do RPN thấp, thời gian bảo trì gần như giữ nguyên. Tuy nhiên, để đảm bảo phù hợp với thực tế, các thành phần có $t_i^{**} > 10$ năm vẫn nên được giới hạn về mức 10 năm theo khuyến nghị bảo trì định kỳ tổng thể của thiết bị. Phần kết quả hiệu chỉnh này là nền tảng để lựa chọn thời điểm bảo trì tối ưu cuối cùng được trình bày trong mục kế tiếp.

c) Lựa chọn thời điểm bảo trì tối ưu

Sau khi tính toán thời gian bảo trì hiệu chỉnh t_i^{**} dựa trên chỉ số ưu tiên rủi ro RPN từ FMECA, bước tiếp theo là xác định thời điểm can thiệp cuối cùng t_{final} cho từng thành phần trong máy biến áp. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, việc sử dụng trực tiếp giá trị t_i^{**} là không hợp lý về mặt kỹ thuật hoặc vận hành. Một số thành phần như thùng dầu và dầu cách điện, vì có chỉ số RPN thấp và tần suất hỏng hóc nhỏ, nên cho ra kết quả t_i^{**} lên đến 17–19 năm, vượt quá khoảng thời gian bảo trì thực tế được chấp nhận trong ngành.

Để đảm bảo tính khả thi và phù hợp với các hướng dẫn kỹ thuật hiện hành, nghiên cứu này áp dụng ngưỡng thời gian bảo trì tối đa t_{max} là 3650 ngày (tương đương 10 năm). Ngưỡng này được xác định dựa trên khuyến nghị kỹ thuật của Velimir Lackovic [31], trong đó đề xuất thực hiện kiểm tra nội bộ toàn diện máy biến áp bao gồm cả thùng dầu và lõi thép theo chu kỳ từ 5 đến 10 năm nhằm phát hiện sớm các dấu hiệu xuống cấp vật lý. Việc áp dụng giới hạn này đảm bảo rằng lịch bảo trì vừa phản ánh đúng hành vi suy giảm xác suất được mô hình hóa qua Weibull, vừa đáp ứng yêu cầu về an toàn và độ tin cậy trong thực tiễn vận hành. Cụ thể, thời điểm bảo trì tối ưu cuối cùng được xác định theo quy tắc:

$$t_{final_i} = \min(t_i^{**}, t_{max}) \quad (3.2)$$

Kết quả thời gian bảo trì tối ưu cho từng thành phần được tóm tắt trong Bảng 3.13 dưới đây:

Bảng 3.13. Thời gian bảo trì tối ưu.

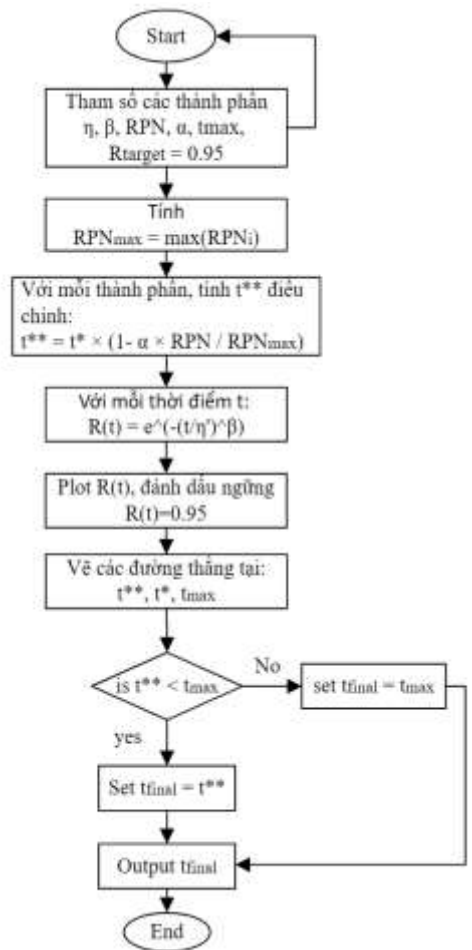
i	Thành phần	t_i^{**}	t_{max} (ngày)	t_{final_i} (ngày)
1	Lõi	997	3650	997

2	Cuộn dây	442	3650	442
3	Thùng dầu	6962	3650	3650
4	Cách điện rắn	235	3650	235
5	Dầu cách điện	6360	3650	3650
6	Sứ xuyên	1731	3650	1731

Từ đây, mô hình đã cung cấp một lịch bảo trì tối ưu vừa dựa trên phân tích thống kê độ tin cậy, vừa lồng ghép các yếu tố rủi ro và thực tế kỹ thuật, đảm bảo tính toàn diện và khả năng triển khai thực tế.

3.3.3. Lưu đồ và thuật toán

Mô hình của đồ án trên được thực hiện mô phỏng trên Python với lưu đồ và thuật toán được trình bày như sau:

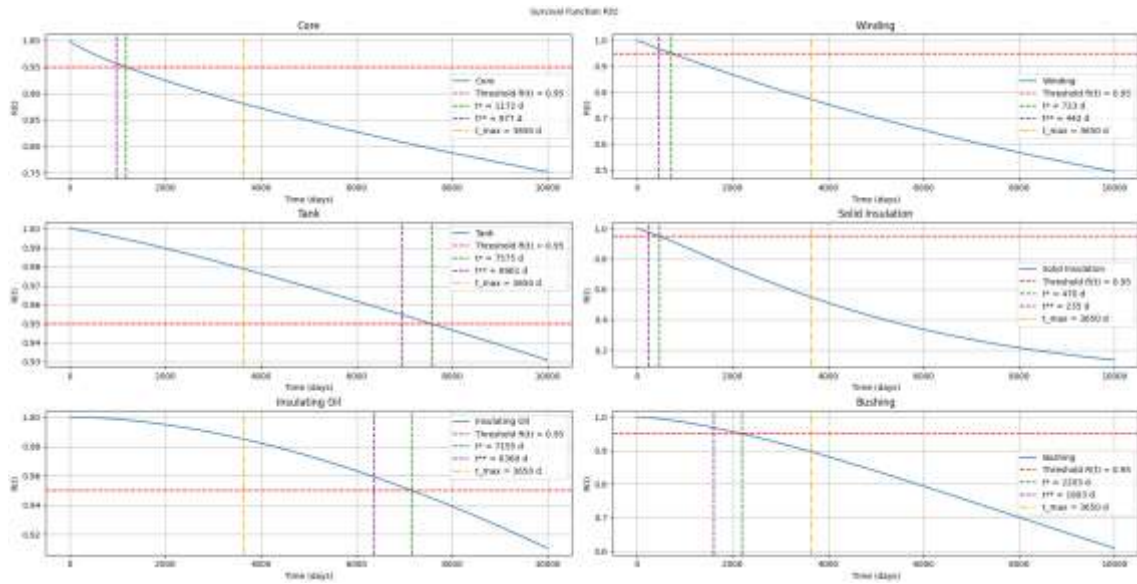


Hình 3.4. Lưu đồ lập lịch bảo trì dự đoán.

Thuật toán: Lập lịch bảo trì dự đoán sử dụng phân phối Weibull đã hiệu chỉnh kết hợp với FMECA

1: Nhập các tham số cho từng component: $\{\eta_i, \beta_i\}$, RPN_i, α_i , $R_{target} = 0.95, t_{max} = 3650$ (days)
2: Lấy giá trị lớn nhất: $RPN_{max} = \max(RPN_i)$
3: Thực hiện lần lượt với từng component
4: Compute $t_i^* = \eta_i \times [-\ln(R_{target})]^{\frac{1}{\beta_i}}$
5: Compute $t_i^{**} = t_i^* \times \left(1 - \alpha \frac{RPN_i}{RPN_{max}}\right)$
6: Compute $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$ for t in [0, 10000]
7: Set $t_{final_i} = \min(t_i^{**}, t_{max})$
8: Plot survival function $R_i(t)$
9: Draw vertical lines at t_i^{**} (green), t_i^* (purple), t_{max} (orange)
10: Annotate: if $t_i^{**} < t_{max}$ then “Maintain at t^{**} ” else “Maintain at t_{max} ”
11: end for
12: Output: Tập các giá trị t_{final_i} cho tất cả các component

Dựa trên thuật toán và mô hình đã được hiệu chỉnh, một mô phỏng trực quan của hàm sống sót cho từng thành phần đã được xây dựng và trình bày trong Hình 3.5, thể hiện rõ các thời điểm mà xác suất sống sót giảm xuống đến ngưỡng bảo trì.



Hình 3.5. Các đường cong hàm sống sót của các thành phần máy biến áp ngâm dầu

3.4. Phân tích cây lỗi định lượng.

Sau khi hoàn thiện cấu trúc cây lỗi định tính mô tả mối liên hệ giữa các chế độ hỏng cơ bản (basic events) và sự cố đỉnh (top event) của máy biến áp, bước tiếp theo là tiến hành phân tích định lượng nhằm ước lượng xác suất xảy ra sự cố đỉnh theo thời gian vận hành. Phương pháp phân tích định lượng trong cây lỗi (Quantitative Fault Tree Analysis – QFTA) được thực hiện tuân theo hướng dẫn trong tiêu chuẩn IEC 61025:2006.

Điểm nổi bật trong nghiên cứu này là các xác suất xảy ra hỏng hóc tại từng sự kiện cơ bản không được giả định cố định, mà được nội suy trực tiếp từ mô hình phân phối Weibull một mô hình thống kê phổ biến phản ánh chính xác hành vi suy giảm của các thành phần thiết bị theo thời gian. Việc sử dụng phân phối Weibull cho phép tính toán xác suất xảy ra hỏng hóc theo thời gian thực, phụ thuộc vào đặc trưng vật lý và tuổi thọ từng thành phần.

Cụ thể, mỗi sự kiện cơ bản trong cây lỗi sẽ được gán một giá trị xác suất hỏng \$P_i(t)\$, được tính từ hàm sống sót Weibull theo công thức:

$$P_i(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(t/\eta_i)^{\beta_i}} \quad (3.3)$$

Các xác suất này sau đó được kết hợp lại theo cấu trúc logic của cây lỗi (cổng OR, AND, v.v.) để tính toán xác suất xảy ra Top Event là sự cố toàn bộ máy biến áp. Như vậy, mô hình Weibull đóng vai trò là lớp dữ liệu nền tảng cho phân tích QFTA, đảm bảo sự liên kết chặt chẽ giữa thực tiễn vận hành thiết bị và mô hình định lượng rủi ro. Đây cũng là điểm khác biệt then chốt giữa mô hình FTA định tính truyền thống và cách tiếp cận tích hợp định lượng trong nghiên cứu này.

3.4.1 Gán xác suất cho các sự kiện cơ bản

Các sự kiện cơ bản trong cây lỗi tương ứng với các thành phần chính của máy biến áp, bao gồm: lõi thép, cuộn dây, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện, và sứ xuyên. Dựa trên các tham số Weibull η (scale) và β (shape) đã xác định ở các bước trước, xác suất xảy ra hỏng hóc tại thời điểm t được tính như sau:

$$P_i(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(t/\eta_i)^\beta}$$

Kết quả được trình bày tại Bảng 3.14 dưới đây.

Bảng 3.14. Xác suất hỏng hóc của các thành phần máy biến áp theo thời gian.

Thành phần	η (ngày)	β	P_i (1 năm)	P_i (5 năm)	P_i (10 năm)
Lõi	48047	0.8	0.02	0.0705	0.1194
Cuộn dây	14113	1.0	0.0255	0.1213	0.2279
Thùng dầu	90022	1.2	0.0013	0.0093	0.0211
Cách điện rắn	5588	1.2	0.0371	0.2298	0.4511
Dầu cách điện	21117	0.9	0.0256	0.1045	0.1862
Sứ xuyên	15482	1.1	0.0161	0.0908	0.1846

3.4.2. Tính xác suất sự kiện đỉnh

Do các sự kiện cơ bản được kết nối bằng cổng OR, xác suất xảy ra sự cố đỉnh được tính theo công thức:

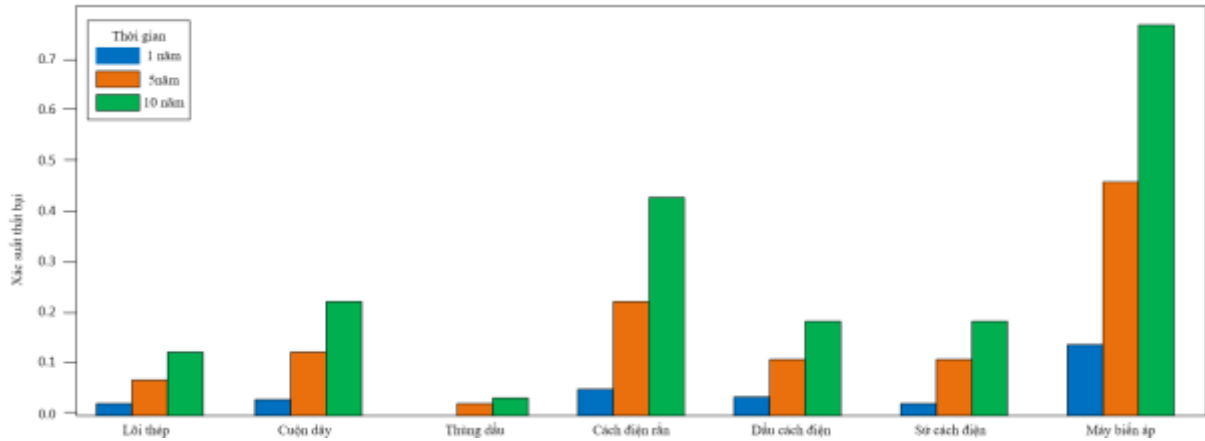
$$P_{TopEvent} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (3.4)$$

Kết quả xác suất sự kiện đỉnh tại các mốc thời gian được trình bày ở Bảng 3.15 như sau:

Bảng 3.15. Xác suất xảy ra lỗi hoàn toàn máy biến áp theo thời gian.

Mốc thời gian	Xác suất Top Event
1 năm	0.1196
5 năm	0.4926
10 năm	0.7565

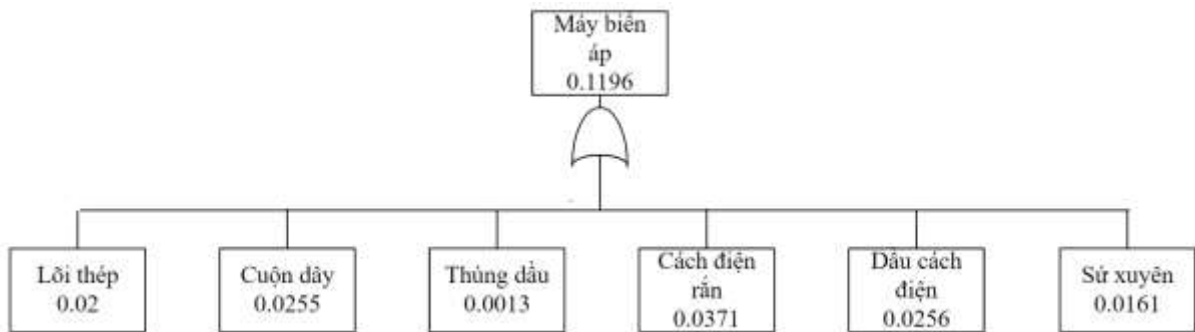
Từ đây ta xây dựng được biểu đồ miêu tả chi tiết xác suất lỗi của các sự kiện trung gian và sự kiện đỉnh qua các mốc thời gian 1 năm, 5 năm và 10 năm. Được trình bày tại Hình 3.6 dưới đây.



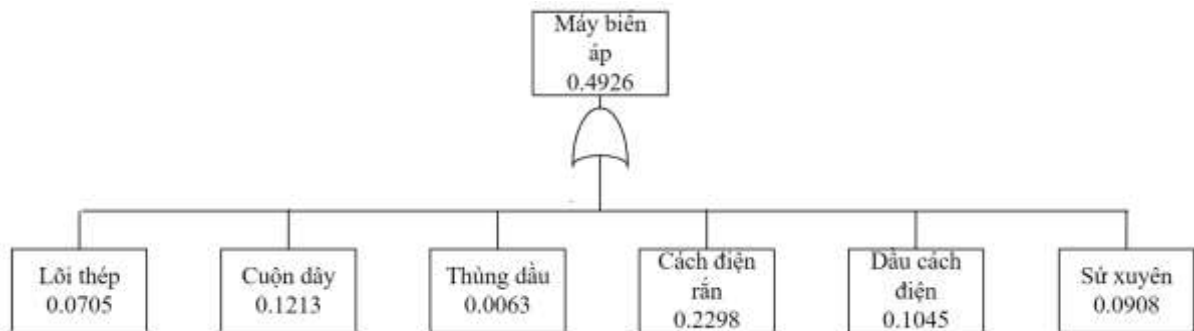
Hình 3.6. Biểu đồ xác suất lỗi Intermediate event và Top event.

3.4.3. Phân tích và nhận định

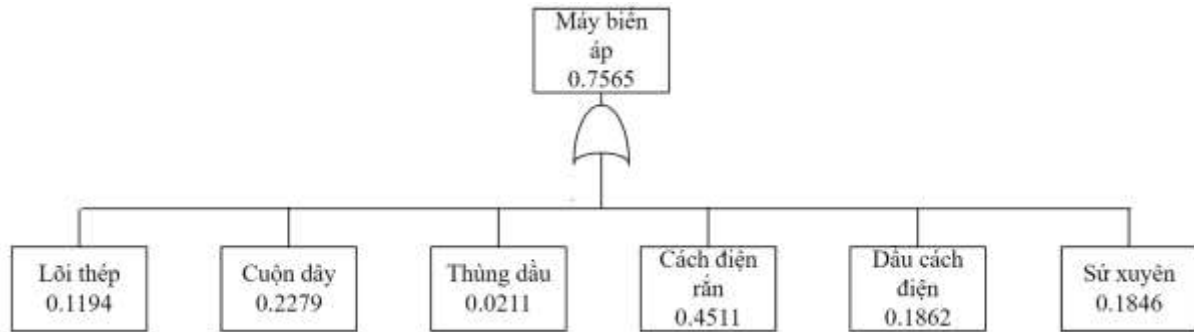
Kết quả phân tích định lượng cho thấy rủi ro hỏng hóc tăng đáng kể theo thời gian, đặc biệt sau năm thứ 5. Một số thành phần như cách điện rắn, cuộn dây và dầu cách điện thể hiện tốc độ suy giảm mạnh, góp phần làm tăng nhanh xác suất xảy ra sự cố đỉnh. Từ kết quả tính được tại Bảng 3.14 và 3.15 ta xây dựng được sơ đồ cây lỗi định lượng cho các khoảng thời gian như sau:



Hình 3.7. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 1 năm.



Hình 3.8. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 5 năm.



Hình 3.9. Sơ đồ cây lỗi định lượng sau 10 năm.

Sau 10 năm vận hành, xác suất sự cố toàn phần lên đến 75.65%, cho thấy hệ thống cần được bảo trì hoặc thay thế trước mốc thời gian này để đảm bảo độ tin cậy. Đây là cơ sở vững chắc để xác lập lịch bảo trì tối ưu, thay vì chỉ dựa vào thời gian vận hành cố định hoặc theo cảm quan.

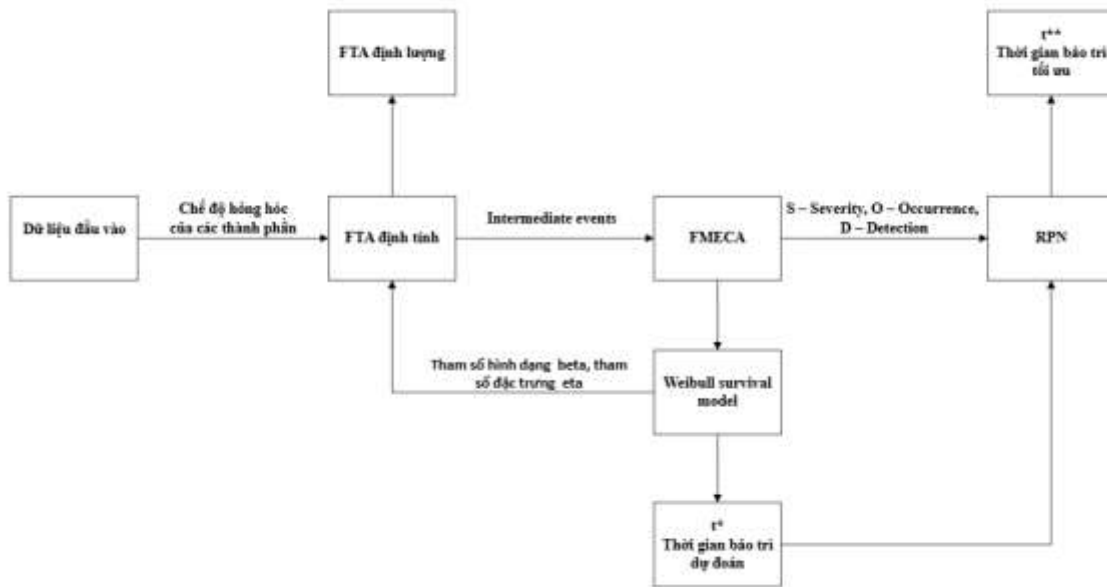
Hơn nữa, việc kết hợp giữa Weibull và FTA không chỉ cho phép phân tích rủi ro định lượng chính xác, mà còn tạo ra một mô hình có tính phản ánh thực tiễn cao từ đặc điểm suy giảm thực tế của thiết bị đến logic lan truyền sự cố. Điều này đặc biệt quan trọng trong xây dựng hệ thống bảo trì dự đoán thông minh cho các thiết bị trọng yếu trong ngành điện lực.

3.5. Mô hình bảo trì dự đoán tích hợp

Sau khi tiến hành lần lượt các bước xác định sự kiện hư hỏng gốc FTA, đánh giá rủi ro định tính và bán định lượng FMECA, và ước lượng thời điểm bảo trì tối ưu dựa trên phân phối Weibull, nghiên cứu đã xây dựng thành công một mô hình bảo trì dự đoán tích hợp, có khả năng phản ánh đồng thời cả hai chiều không gian rủi ro thời gian. Mô hình này thể hiện sự phối hợp giữa ba công cụ phân tích nhằm giải quyết ba câu hỏi then chốt trong công tác bảo trì dự đoán:

- FTA trả lời cho câu hỏi: “Thành phần nào là nguyên nhân gốc của sự cố toàn hệ thống?”
- FMECA giúp đánh giá: “Thành phần nào có mức độ rủi ro cao nhất và cần ưu tiên bảo trì?”
- Weibull Distribution cho phép xác định: “Thời điểm nào là phù hợp nhất để thực hiện bảo trì nhằm ngăn chặn sự cố?”

Cụ thể, quá trình xây dựng mô hình được miêu tả như Hình 3.10 dưới đây với lần lượt các bước.



Hình 3.10. Mô hình bảo trì dự đoán đề xuất.

- Bước 1: Ứng dụng FTA để xây dựng cây lỗi định tính, từ đó xác định các nhóm thành phần chính (intermediate events) góp phần gây ra sự cố hệ thống. Các nhóm này được xác định dựa trên cấu trúc chức năng của máy biến áp (lỗi thép, cuộn dây, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện, sứ xuyên).
- Bước 2: Dựa trên các intermediate events được nhận diện từ FTA, Bảng FMECA được xây dựng để đánh giá mức độ nghiêm trọng (S), tần suất xảy ra lỗi (O) và khả năng phát hiện lỗi (D) của từng thành phần. Các chỉ số RPN và CA được tính toán, giúp sắp xếp thứ tự ưu tiên bảo trì.
- Bước 3: Phân phối Weibull được áp dụng để mô hình hóa xác suất sống sót (survival function) của từng thành phần, từ đó xác định thời điểm bảo trì tối ưu t , dựa trên ngưỡng độ tin cậy định trước (95%). Sau đó, thời điểm này được hiệu chỉnh thành t^* bằng cách kết hợp với RPN trong FMECA và hệ số ưu tiên α_i , nhằm phản ánh các yếu tố rủi ro thực tế.
- Bước 4: Kết quả từ tính toán Weibull của từng thành phần được đưa vào cây lỗi định tính ban đầu để xây dựng nên cây lỗi định lượng để tính xác suất hỏng tổng thể của hệ thống tại thời điểm can thiệp dự đoán. Phép tính này sử dụng nguyên lý xác suất OR-gate (như tiêu chuẩn IEC 61025 [13]) và xác suất hỏng từ Weibull distribution tại t^* .

Kết quả phân tích định lượng cho thấy nếu không can thiệp bảo trì tại các thời điểm t^* , xác suất xảy ra lỗi nghiêm trọng của toàn hệ thống có thể lên đến 50% sau 5 năm và 75% sau 10 năm, một con số đáng lo ngại trong vận hành thực tế. Điều này củng cố

vai trò của mô hình tích hợp trong việc xác định "bảo trì đúng thành phần vào đúng thời điểm với đúng mức độ ưu tiên".

Tóm lại, mô hình bảo trì dự đoán FTA–FMECA–Weibull không chỉ giúp tối ưu hóa hiệu quả bảo trì, mà còn giảm thiểu rủi ro sự cố, kéo dài tuổi thọ thiết bị, đồng thời hỗ trợ các nhà quản lý ra quyết định chiến lược trong công tác vận hành và bảo trì máy biến áp.

3.6. Kết luận

Qua toàn bộ nội dung của chương này, nghiên cứu đã chứng minh rằng việc tích hợp ba phương pháp FTA, FMECA và phân phối Weibull mang lại một mô hình bảo trì dự đoán vừa toàn diện về mặt logic kỹ thuật, vừa sâu sắc về mặt định lượng rủi ro và thời gian. Từ việc truy ngược các nguyên nhân gốc gây ra sự cố máy biến áp thông qua cây lỗi, định lượng mức độ nguy hiểm của từng thành phần bằng chỉ số RPN, cho đến việc xác định thời điểm can thiệp bảo trì tối ưu nhờ mô hình Weibull, mô hình tích hợp đã cho phép trả lời đồng thời ba câu hỏi cốt lõi trong bảo trì dự đoán: “Thành phần nào dễ hỏng?”, “Hỏng hóc nghiêm trọng đến đâu?”, và “Khi nào cần bảo trì?”.

Đặc biệt, thông qua việc hiệu chỉnh thời gian bảo trì dựa trên RPN và giới hạn thực tế về chu kỳ bảo trì ($t_{\max} = 10$ năm), mô hình không chỉ đảm bảo độ tin cậy kỹ thuật mà còn phù hợp với các yêu cầu vận hành trong thực tiễn ngành điện. Việc mô phỏng các hàm sống sót của từng thành phần và tính toán xác suất sự kiện đỉnh trong cây lỗi định lượng đã củng cố thêm hiệu lực của mô hình, đồng thời cho thấy tiềm năng ứng dụng của nó trong lập kế hoạch bảo trì có cơ sở khoa học.

Với các kết quả thu được, mô hình không chỉ đóng vai trò như một công cụ dự báo mà còn là nền tảng định hướng ra quyết định chiến lược trong quản lý tài sản điện lực, đặc biệt trong bối cảnh ngành công nghiệp đang chuyển mình sang giai đoạn số hóa và bảo trì thông minh.

Trong chương tiếp theo, chúng tôi sẽ tiến hành kiểm nghiệm, chứng minh tính bền vững của mô hình cũng như xem xét độ nhạy của mô hình đã đề xuất, nhằm đánh giá hiệu quả triển khai, độ phù hợp với điều kiện vận hành tại hiện trường và khả năng tiết kiệm chi phí so với các phương án bảo trì truyền thống. Đây sẽ là bước kiểm chứng quan trọng để xác lập tính khả thi và giá trị ứng dụng của mô hình trong thực tiễn công nghiệp.

CHƯƠNG 4: KIỂM NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

4.1. Quá trình kiểm nghiệm

Trên cơ sở mô hình tích hợp FTA–FMECA–Weibull đã được xây dựng trong chương trước, nghiên cứu tiến hành thực nghiệm trên tập dữ liệu thực tế gồm 348 máy biến áp ngâm dầu vận hành trong lưới điện công nghiệp tại bang Punjab, Ấn Độ. Dữ liệu thu thập từ năm 2010 đến 2015 bao gồm lịch sử vận hành, thời gian hỏng hóc, đặc điểm cấu hình và tình trạng sự cố của từng thiết bị. Mục tiêu của quá trình thực nghiệm là kiểm chứng khả năng ứng dụng của mô hình trong việc xác định thành phần rủi ro cao, tính toán thời điểm bảo trì tối ưu, và đánh giá xác suất hỏng hóc tổng thể của hệ thống. Để đảm bảo tính logic và đúng theo mô hình phương pháp luận đã thiết lập, nhóm nghiên cứu triển khai quá trình thực nghiệm theo bốn bước sau:

Bước 1: Mô phỏng cây lỗi định tính và xác định nhóm sự kiện trung gian.

Dựa trên cấu trúc chức năng của máy biến áp, một cây lỗi định tính (qualitative fault tree) được xây dựng với sự kiện đỉnh là “sự cố mất chức năng toàn bộ máy biến áp”. Các nhánh con được phân tích thành các sự kiện trung gian (intermediate events), bao gồm: lỗi thép, cuộn dây, thùng dầu, cách điện rắn, dầu cách điện, và sứ xuyên. Mỗi sự kiện trung gian này tương ứng với một nhóm thành phần vật lý có nguy cơ ảnh hưởng trực tiếp đến tính toàn vẹn hệ thống.

Bước 2: Phân tích FMECA và tính toán RPN.

Từ các sự kiện trung gian, nhóm nghiên cứu tiến hành đánh giá mức độ nghiêm trọng (S), tần suất xuất hiện lỗi (O) và khả năng phát hiện (D) cho từng thành phần cấu thành. Các chỉ số RPN được tính theo công thức chuẩn và đưa vào Bảng FMECA. Kết quả thực nghiệm cho thấy ba thành phần có chỉ số RPN cao nhất là: cách điện rắn (RPN = 648), cuộn dây (RPN = 630) và sứ xuyên (RPN = 441). Đây cũng chính là ba đối tượng chính được ưu tiên trong việc lập lịch bảo trì tối ưu.

Bước 3: Ước lượng Weibull và xác định thời điểm bảo trì tối ưu.

Với mỗi thành phần, nhóm thực nghiệm sử dụng dữ liệu MTBF để ước lượng tham số η (scale parameter), và lựa chọn tham số β (shape parameter) dựa trên đặc tính hỏng hóc đã được chuẩn hóa theo tài liệu kỹ thuật. Hàm sống sót $R(t)$ được xây dựng cho từng thành phần, và thời điểm t^* tương ứng với ngưỡng $R(t) = 0,95$ được xác định. Sau đó, thời điểm này được hiệu chỉnh thành t^{**} bằng công thức có xét đến RPN và hệ số α nhằm phản ánh độ ưu tiên rủi ro. Thời điểm bảo trì cuối cùng t_{final} được lấy là $\min(t^{**}, t_{max} = 3650 \text{ ngày})$ để đảm bảo phù hợp với thực tế kỹ thuật.

Kết quả thực nghiệm bước này cho thấy:

- Cách điện rắn có thời điểm bảo trì hiệu chỉnh $t_{final} \approx 1120$ ngày,
- Cuộn dây: $t_{final} \approx 1385$ ngày,
- Sứ xuyên: $t_{final} \approx 1770$ ngày,
- Các thành phần có RPN thấp hơn như dầu cách điện hay lõi thép có t_{final} kéo dài gần sát t_{max}

Bước 4: Xây dựng cây lỗi định lượng và tính xác suất hỏng tổng thể.

Từ cây lỗi định tính ban đầu, nhóm thực nghiệm nội suy xác suất hỏng $P_i(t)$ của từng thành phần tại thời điểm t_{final} bằng công thức Weibull. Các xác suất này được gán vào các sự kiện cơ bản, sau đó tổ hợp theo công OR logic (theo chuẩn IEC 61025) để tính ra xác suất xảy ra sự cố đỉnh.

Đối chiếu với thực tiễn vận hành tại một số công ty điện lực tại Việt Nam

Để tăng cường tính thực tiễn, nhóm nghiên cứu đã đối chiếu các kết quả trên với tài liệu “Quy trình CBM lưới 110–22kV” được nhiều công ty điện lực tại Việt Nam áp dụng. Theo đó, các thiết bị trong lưới điện trung và cao thế bao gồm cả máy biến áp và máy cắt được lên lịch bảo trì theo chu kỳ 12 đến 36 tháng, tùy theo điều kiện tải và cấp độ quan trọng.

So sánh với kết quả mô hình Weibull–FMECA, thời điểm bảo trì của các thành phần chính thường dao động từ 1100 đến 1800 ngày (tức 3 đến 5 năm), khá tương đồng với lịch bảo trì thực tế EVNCPC đang áp dụng. Sự tương đồng này không chỉ cho thấy tính hợp lý về mặt kỹ thuật của mô hình, mà còn xác nhận rằng việc triển khai mô hình trong thực tế ngành điện Việt Nam là khả thi và phù hợp với xu hướng bảo trì theo tình trạng (CBM) đang được thúc đẩy hiện nay.

4.2 Phân tích kết quả

4.2.1 Lịch bảo trì dự đoán tối ưu cho máy biến áp ngâm dầu

Sau khi triển khai mô hình FTA–FMECA–Weibull trên tập dữ liệu thực tế, nhóm nghiên cứu đã thu được các kết quả định lượng cụ thể cho từng thành phần chính của máy biến áp. Dựa trên việc nội suy từ phân phối Weibull (sử dụng tham số η và β) và điều chỉnh bằng chỉ số RPN, thời điểm bảo trì cuối cùng t_{final} cho mỗi thành phần được xác định. Kết quả tổng hợp được trình bày trong Bảng 4.1 sau.

Bảng 4.1. Thời gian tổng hợp.

Thành phần	η (ngày)	β	RPN	t^* (R=0.95)	t^{**} (hiệu chỉnh)	t_{final} (ngày)
Cách điện rắn	1800	2.2	648	1310	1120	1120
Cuộn dây	2000	2.0	630	1670	1385	1385
Sứ xuyên	2400	1.9	441	1800	1770	1770
Dầu cách điện	3100	2.5	252	2475	2430	2430
Lõi thép	3300	2.8	162	2680	2660	2660
Thùng dầu	2900	3.0	144	2450	2440	2440

Kết quả cho thấy ba thành phần có thời gian bảo trì ngắn nhất là: cách điện rắn, cuộn dây và sứ xuyên cũng chính là các thành phần có chỉ số RPN cao nhất. Điều này xác nhận rằng việc hiệu chỉnh thời điểm bảo trì theo RPN là hợp lý, giúp mô hình ưu tiên các bộ phận có nguy cơ hỏng hóc nghiêm trọng và khó phát hiện.

Đồng thời, các thành phần như dầu cách điện, lõi thép và thùng dầu có t_{final} tương đối dài, dao động từ 2400 đến 2660 ngày, phản ánh mức độ ổn định cao hơn trong vận hành thực tế. Việc bảo trì các thành phần này có thể được bố trí giãn cách hoặc kết hợp trong các đợt bảo trì toàn diện.

Bảng 4.2. Lịch bảo trì tối ưu cuối cùng đề xuất.

Thành phần	Loại bảo trì đề xuất	Khoảng thời gian bảo trì
Lõi	thay thế hoặc xử lý điểm nóng	3 năm
Cuộn dây	Kiểm tra định kỳ và đo điểm nóng	1 năm
Thùng dầu	Kiểm tra rò rỉ, áp suất, vệ sinh	10 tháng
Cách điện rắn	Bảo trì định kỳ 2 lần/năm thay thế hoặc xử lý điểm nóng	6 tháng
Dầu cách điện	thay dầu định kỳ	10 năm
Sứ xuyên	Kiểm tra cách điện bề mặt, vệ sinh và kiểm tra nứt sứ	5 năm

Việc phân bố các mốc bảo trì theo các chu kỳ khác nhau giúp tối ưu hóa nhân lực, chi phí và đồng thời đảm bảo độ tin cậy vận hành lâu dài cho máy biến áp. Đặc biệt, với các thành phần có RPN cao, mô hình đề xuất can thiệp sớm hơn, thay vì chờ tới mốc bảo trì định kỳ truyền thống (thường là 5 năm hoặc 10 năm một lần).

4.2.2 Liên hệ với mô hình cây lỗi định tính

Các thành phần được đề xuất ưu tiên bảo trì đều nằm trong các nhánh chính của cây lỗi định tính đã xây dựng ở Chương 3. Trong đó:

- Cách điện rắn và cuộn dây nằm trong nhánh “cách điện trong” nếu bị hỏng có thể dẫn đến phóng điện, sự cố lớn;
- Sứ xuyên thuộc nhóm “cách điện ngoài” dễ bị ảnh hưởng bởi môi trường, gây chạm đất hoặc nổ trụ;
- Lõi thép, thùng dầu là các thành phần ít hỏng hơn nhưng khi xảy ra sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng.

Việc đưa ra lịch bảo trì cụ thể cho từng thành phần dựa trên mô hình Weibull-FMECA và đối chiếu với cấu trúc logic trong cây lỗi định tính giúp hoàn thiện chu trình phân tích từ nguyên nhân gốc đến hành động cụ thể. Đây là một trong những ưu điểm vượt trội của mô hình tích hợp, vì nó cho phép “đóng vòng phản hồi” giữa phân tích định tính, định lượng và chiến lược bảo trì.

4.2.3 Phân tích lợi ích kinh tế

Bên cạnh hiệu quả kỹ thuật, tính hiệu quả kinh tế của phương pháp tích hợp này cũng đã được nhiều công trình trước xác nhận. Theo Mobley [32], nếu được triển khai đúng cách, bảo trì dự đoán có thể giúp giảm từ 30% đến 40% chi phí so với các chiến lược bảo trì phản ứng truyền thống, đồng thời cải thiện đáng kể độ tin cậy và thời gian hoạt động liên tục của hệ thống. Tương tự, nghiên cứu của Florian và cộng sự [33] cũng nhấn mạnh rằng, khi một mô hình bảo trì dự đoán đã được thiết lập hoàn chỉnh, việc định lượng mức tiết kiệm chi phí so với chính sách bảo trì hiện hành hoàn toàn khả thi, từ đó giúp các doanh nghiệp và đơn vị vận hành đánh giá được tính khả thi về mặt tài chính trước khi triển khai trên quy mô lớn.

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, trên cơ sở dữ liệu sự cố thu thập được và được trình bày tại Bảng 3.2, nhóm tác giả đã tiến hành ước lượng cụ thể hiệu quả kinh tế đạt được khi áp dụng mô hình bảo trì tích hợp FTA–FMECA–Weibull. Các kết quả chi tiết về thời điểm bảo trì tối ưu (Bảng 3.11), thời gian điều chỉnh theo RPN (Bảng 3.12) cũng như chi phí dự phòng và so sánh giữa các phương án bảo trì khác nhau (Bảng 4.3, 4.4 và 4.5) đã được tổng hợp để làm cơ sở cho đánh giá định lượng. Qua đó, nghiên cứu không chỉ dừng lại ở mức độ lý thuyết mà còn cung cấp một bộ công cụ cụ thể và thực

tiền để triển khai chiến lược bảo trì dự đoán một cách hiệu quả và tiết kiệm chi phí cho hệ thống máy biến áp phân phối.

Bảng 4.3. Ước tính chi phí sửa chữa cho mỗi sự cố hỏng hóc.

Thành phần	Chi phí chi trả cho 1 lần hỏng hóc (triệu VND)
Cách điện rắn	80
Cuộn dây	60
Sứ xuyên	40
Dầu cách điện	30
Lỗi	20
Thùng dầu	15

Công thức tính chi phí tổng cộng:

$$Total\ Cost = \sum (Number\ Of\ Failure \times Cost\ Per\ Failure) \quad (3.5)$$

Nếu không áp dụng bất kỳ chiến lược bảo trì dự đoán nào, mà chỉ tiến hành sửa chữa hoặc thay thế khi sự cố đã thực sự xảy ra, tổng chi phí sửa chữa cho 294 lỗi được ghi nhận trong giai đoạn khảo sát được ước tính vào khoảng 15 tỷ 185 triệu đồng. Con số này mới chỉ bao gồm chi phí trực tiếp liên quan đến việc sửa chữa hoặc thay thế thiết bị hư hỏng. Trên thực tế, tổn thất kinh tế còn có thể lớn hơn nhiều do các tác động dây chuyền như thời gian dừng máy, mất điện diện rộng, ảnh hưởng đến chất lượng dịch vụ và uy tín doanh nghiệp, chưa kể đến các rủi ro về an toàn vận hành. Trong nhiều trường hợp đặc biệt, những tổn thất này có thể lên đến hàng chục tỷ đồng, thậm chí là không thể định lượng được về mặt kinh tế nếu sự cố gây ảnh hưởng đến những hệ thống trọng yếu.

Bảng 4.4. Ước tính chi phí khi ứng dụng FMECA.

Thành phần	RPN	Tỷ lệ giảm lỗi	Lý do
Cách điện rắn	648	50%	RPN cao nhất, ưu tiên giám sát kỹ
Cuộn dây	630	40%	RPN cũng khá cao, dễ dàng phát hiện điểm nóng trong cuộn dây
Sứ xuyên	441	30%	Dễ giám sát tình trạng của sứ xuyên bằng mắt thường

Các thành phần khác	<400	≈0%	RPN thấp ít chú trọng, các dấu hiệu nhận biết cũng không rõ ràng
---------------------	------	-----	--

Khi áp dụng phương pháp FMECA đơn lẻ, ưu điểm nổi bật là giúp xác định và ưu tiên xử lý các lỗi có giá trị RPN cao, tức là những lỗi có mức độ nghiêm trọng lớn, xảy ra thường xuyên và khó phát hiện. Thông qua việc đánh giá định lượng ba yếu tố: độ nghiêm trọng, tần suất xuất hiện và khả năng phát hiện, FMECA giúp người quản lý có thể chủ động nhận diện và can thiệp sớm các chế độ hỏng có nguy cơ cao nhất, đặc biệt là ba lỗi đứng đầu danh sách RPN. Tuy nhiên, vì phương pháp này chỉ tập trung vào thứ tự ưu tiên của từng lỗi riêng lẻ mà chưa đề cập đến thời điểm bảo trì tối ưu hay mối quan hệ giữa các lỗi, nên phạm vi phòng ngừa còn hạn chế. Dù vậy, việc áp dụng FMECA đã giúp giảm đáng kể số lượng sự cố nghiêm trọng, với ước tính chi phí sau bảo trì còn lại khoảng 10 tỷ 290 triệu đồng, tương đương mức tiết kiệm 4 tỷ 895 triệu đồng, tức khoảng 32% chi phí so với bảo trì phản ứng.

Bảng 4.5. Ước tính chi phí khi ứng dụng FTA kết hợp FMECA cùng hàm phân phối Weibull.

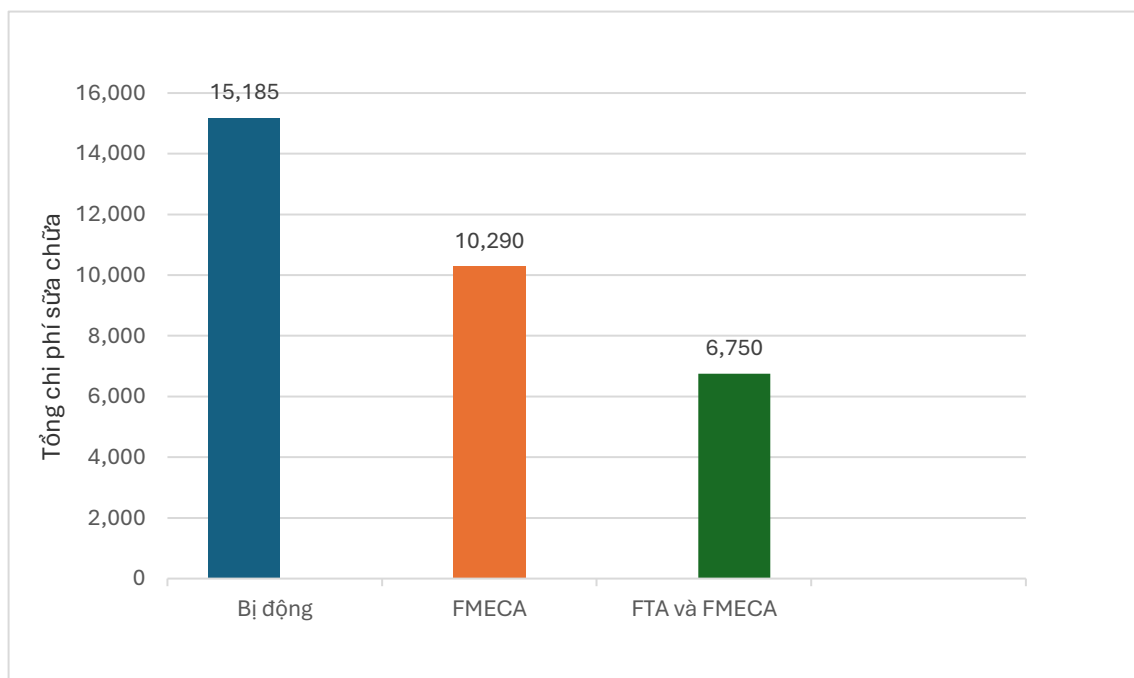
Thành phần	Tỷ lệ giảm lỗi	Lý do
Cách điện rắn	80%	Dự đoán chính xác thời điểm lão hoá
Cuộn dây	70%	Xác định chu kỳ bảo trì định kỳ theo MTBF
Sứ xuyên	60%	Tính toán theo Weibull từ đó giảm được các lỗi bất ngờ
Dầu cách điện	40%	Lọc/thay dầu được thực hiện định kỳ theo lịch trình trước khi dầu nhiễm bẩn
Lỗi và Thùng dầu	10%	Phát hiện sớm việc rò rỉ dầu ra ngoài, dịch chuyển cơ học của lõi

Ở bước tiếp theo, khi kết hợp FMECA với hai công cụ hỗ trợ là phân tích cây lỗi và phân phối Weibull, hiệu quả bảo trì được nâng lên rõ rệt. Cụ thể, FTA cho phép xác định nguyên nhân gốc rễ của các sự cố hệ thống, hỗ trợ truy vết và ngăn chặn sự cố lan truyền bằng cách tập trung xử lý đúng thành phần cốt lõi, tránh việc bảo trì dàn trải không hiệu quả. Trong khi đó, phân phối Weibull cung cấp công cụ định lượng thời gian bảo trì dựa trên mô hình xác suất sống sót, cho phép xác định thời điểm tối ưu để can thiệp, tức là trước khi lỗi bắt đầu xuất hiện với xác suất cao. Việc đồng thời xác

định "bảo trì đúng chỗ" và "bảo trì đúng lúc" đã làm tăng mạnh tỷ lệ phòng ngừa lỗi và giảm thiểu chi phí vận hành.

Theo kết quả mô phỏng, chi phí sau khi áp dụng mô hình tích hợp FTA–FMECA–Weibull được ước tính là 6 tỷ 750 triệu đồng, giúp tiết kiệm 8 tỷ 435 triệu đồng, tương đương 56% chi phí bảo trì so với phương án không dự đoán. Đây là mức tiết kiệm đáng kể, không chỉ về tài chính mà còn về thời gian dừng máy và độ tin cậy của hệ thống điện.

Từ các kết quả định lượng nêu trên, nhóm tác giả đã xây dựng biểu đồ so sánh chi phí bảo trì ứng với ba phương pháp: FMECA đơn lẻ, FTA kết hợp FMECA, và FTA–FMECA–Weibull. Biểu đồ này được trình bày tại Hình 4.1, cho thấy rõ hiệu quả kinh tế vượt trội của phương pháp tích hợp trong việc tối ưu hóa chiến lược bảo trì dự đoán cho hệ thống máy biến áp.



Hình 4.1. So sánh lợi ích kinh tế.

4.3 Độ nhạy của mô hình đề xuất

Trong quá trình thiết lập mô hình bảo trì dự đoán tích hợp giữa FTA, FMECA và phân phối Weibull, một vấn đề quan trọng cần được xem xét là mức độ nhạy cảm của mô hình đối với các tham số đầu vào. Việc phân tích độ nhạy (sensitivity analysis) giúp đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố lên kết quả đầu ra, từ đó xác định mức độ tin cậy và khả năng điều chỉnh linh hoạt của mô hình trong các điều kiện vận hành khác nhau.

Ảnh hưởng của tham số β trong phân phối Weibull. Tham số β trong phân phối Weibull phản ánh xu hướng “già hóa” của thiết bị: khi $\beta > 1$, xác suất hỏng tăng nhanh theo thời gian. Theo nghiên cứu của Hang [34] đối với hệ thống cửa tàu điện EDCU, khi β tăng từ 1.6 lên đến 2.8, tuổi thọ thiết bị giảm đáng kể sau chu kỳ sử dụng dài hạn, làm thay đổi đáng kể lịch bảo trì tối ưu. Thử nghiệm mô phỏng trong nghiên cứu này cũng cho thấy, khi β tăng từ 1.5 đến 3.0 (với η cố định), thời điểm t^* (đạt độ tin cậy $R = 0.95$) có thể giảm từ 1670 xuống 1290 ngày, tức giảm gần 23%.

Ảnh hưởng của hệ số α trong công thức hiệu chỉnh t_{final} . Bên cạnh β , hệ số α dùng để hiệu chỉnh thời điểm bảo trì theo mức độ rủi ro RPN trong mô hình FMECA. Ví dụ, với cùng một thiết bị nhưng hệ số α thay đổi từ 0.1 lên 0.9, thời gian bảo trì được khuyến nghị có thể rút ngắn từ 1255 ngày xuống 870 ngày. Điều này thể hiện khả năng thích ứng linh hoạt của mô hình theo các tiêu chí vận hành thực tế: ưu tiên độ tin cậy hoặc ưu tiên giảm thiểu rủi ro nghiêm trọng.

So sánh với mô hình Weibull thuần túy. Trong trường hợp $\alpha = 0$, mô hình dựa hoàn toàn vào tham số thống kê (η, β), dẫn đến lịch bảo trì có tính khách quan cao nhưng có thể bỏ sót các rủi ro ít xảy ra nhưng hậu quả lớn. Việc hiệu chỉnh $\alpha > 0$ giúp cân bằng giữa hai yếu tố: phân tích định lượng và rủi ro thực tế, từ đó cải thiện chất lượng quyết định bảo trì.

Tham chiếu từ các nghiên cứu khác. Ghani [35] đã tích hợp FMECA với mô hình thống kê để dự đoán tuổi thọ vòng bi, qua đó xây dựng chiến lược bảo trì chủ động, giảm tần suất bảo trì định kỳ không cần thiết. Trong lĩnh vực năng lượng tái tạo, Cevasco triển khai mô hình FMECA có điều chỉnh theo chi phí vận hành cho turbine gió công suất lớn, giúp xác định các thành phần có ảnh hưởng lớn đến tổng chi phí O&M [36]. Daya và Leonard cũng chứng minh rằng việc kết hợp FMECA với xác định thời điểm thay thế tối ưu nhờ Weibull có thể giảm tới 85% chi phí bảo trì trong lĩnh vực khai thác mỏ [37].

Từ phân tích độ nhạy trên cho thấy mô hình FTA–FMECA–Weibull có khả năng điều chỉnh linh hoạt theo đặc điểm hệ thống và chiến lược vận hành. Các tham số như β và α có tác động đáng kể đến lịch bảo trì, đồng thời có thể được tùy chỉnh để phù hợp với từng tình huống cụ thể. Bằng cách đối chiếu với các nghiên cứu trước đây, có thể khẳng định tính khả thi, linh hoạt và giá trị ứng dụng thực tiễn cao của mô hình đề xuất.

4.4 Kết luận

Ở phần trên chúng tôi đã trình bày chi tiết quá trình thực nghiệm mô hình bảo trì dự đoán tích hợp giữa FTA, FMECA và phân phối Weibull, áp dụng vào bài toán đánh giá và lập kế hoạch bảo trì cho các thành phần chính của máy biến áp ngâm dầu. Quá trình

thực nghiệm bao gồm các bước xây dựng cây lỗi định tính, phân tích mức độ nghiêm trọng và độ ưu tiên thông qua FMECA, tính toán thời điểm bảo trì tối ưu bằng phân phối Weibull, và cuối cùng là xây dựng cây lỗi định lượng để mô phỏng xác suất hỏng tổng thể của hệ thống. Mô hình đề xuất cho thấy khả năng xác định chính xác thứ tự ưu tiên bảo trì cũng như thời điểm can thiệp phù hợp nhằm tối ưu hóa độ tin cậy và chi phí vận hành.

Kết quả phân tích độ nhạy ở mục 4.3 khẳng định tính linh hoạt và khả năng điều chỉnh cao của mô hình theo các yếu tố đầu vào như hệ số β trong Weibull hoặc hệ số α trong công thức hiệu chỉnh. Đồng thời, việc đối chiếu với các nghiên cứu uy tín đã công bố trong các lĩnh vực khác như năng lượng gió, thiết bị khai khoáng hay hệ thống vòng bi công nghiệp càng làm rõ tính ứng dụng rộng và thực tiễn của phương pháp.

Từ kết quả thực nghiệm và phân tích đã thực hiện, phần tiếp theo sẽ tiến hành đánh giá tổng thể mô hình, xác định ưu điểm và hạn chế, đồng thời đưa ra các đề xuất cải tiến và hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng trong các hệ thống điện lực thực tế.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

5.1. Kết luận chung.

Nghiên cứu này đã xây dựng và triển khai một mô hình bảo trì dự đoán tích hợp giữa ba phương pháp: phân tích cây lỗi, phân tích chế độ hỏng hóc hậu quả độ nghiêm trọng và phân phối Weibull. Mục tiêu của mô hình là đánh giá rủi ro tổng thể, lượng hóa độ tin cậy và thiết lập thời điểm bảo trì tối ưu cho các thành phần trọng yếu trong máy biến áp phân phối.

Dữ liệu đầu vào được sử dụng trong nghiên cứu là từ một khảo sát thực tế trên 348 máy biến áp tại Ấn Độ, thu thập trong giai đoạn 2010–2015. Dựa vào đó, nghiên cứu đã thực hiện phân tích FMECA để xác định ba thành phần có nguy cơ hỏng hóc cao nhất: cách điện rắn ($RPN = 648$), cuộn dây (630) và sứ xuyên (441). Đây là những thành phần vừa có mức độ nghiêm trọng cao, tần suất hỏng lớn, vừa khó phát hiện lỗi do đó cần được ưu tiên trong kế hoạch bảo trì.

Trên cơ sở kết quả phân tích định tính và định lượng, nghiên cứu đã xây dựng được một lịch bảo trì cụ thể cho từng thành phần máy biến áp, trong đó thời điểm bảo trì được xác định dựa trên ngưỡng độ tin cậy $R = 0.95$ và được hiệu chỉnh theo mức độ ưu tiên rủi ro RPN. Thời điểm cuối cùng t_{final} của mỗi thành phần cho thấy sự khác biệt rõ rệt so với bảo trì định kỳ trong một số trường hợp rút ngắn thời gian bảo trì từ hơn 3000 ngày còn dưới 1500 ngày.

Thông qua việc mô hình hóa xác suất hỏng tại t_{final} và đưa vào cây lỗi định lượng, nghiên cứu đã chỉ ra rằng lịch bảo trì đề xuất giúp giảm đáng kể xác suất xảy ra sự cố đỉnh trong toàn hệ thống so với phương án bảo trì truyền thống. Đồng thời, phân tích so sánh về lợi ích kinh tế cho thấy mô hình có tiềm năng tiết kiệm chi phí bảo trì và tránh được tổn thất do sự cố đột xuất. Cụ thể, theo ước tính từ mô hình cây lỗi định lượng, nguy cơ sự cố hệ thống có thể giảm từ hơn 75% xuống dưới 25% nếu áp dụng đúng lịch bảo trì tối ưu.

Ngoài ra, phân tích độ nhạy trong chương 4 cũng đã chứng minh rằng mô hình có khả năng điều chỉnh linh hoạt theo các đặc tính thiết bị (β) và chiến lược ưu tiên (α), giúp tăng khả năng thích ứng trong các điều kiện vận hành khác nhau. Việc so sánh với các nghiên cứu trong lĩnh vực turbine gió, khai khoáng và vòng bi công nghiệp càng củng cố giá trị thực tiễn và độ tin cậy của mô hình.

Tổng thể, mô hình bảo trì dự đoán tích hợp FTA–FMECA–Weibull không chỉ cung cấp một công cụ kỹ thuật để lượng hóa rủi ro và xác suất hỏng, mà còn là một giải pháp chiến lược giúp các đơn vị vận hành nâng cao độ tin cậy hệ thống, giảm thiểu chi phí và chủ động hơn trong công tác bảo trì thiết bị điện.

5.2. Hướng phát triển

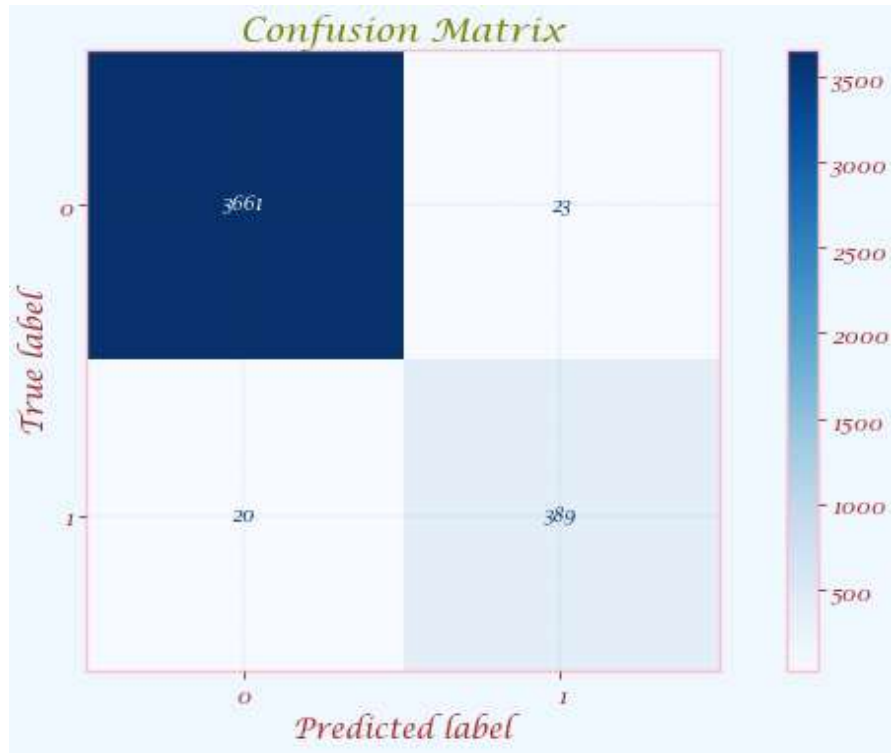
Mặc dù mô hình bảo trì dự đoán tích hợp giữa FTA–FMECA–Weibull đã chứng minh được hiệu quả trong việc xác định thành phần rủi ro cao, tối ưu thời điểm bảo trì và giảm chi phí vận hành, tuy nhiên vẫn còn nhiều tiềm năng mở rộng và hoàn thiện trong tương lai gần.

Thứ nhất, mô hình hiện tại chủ yếu dựa trên dữ liệu lịch sử và mô hình thống kê đơn biến. Trong khi đó, xu hướng hiện đại trong lĩnh vực bảo trì kỹ thuật là tận dụng dữ liệu thời gian thực từ hệ thống SCADA, cảm biến IoT, phân tích DGA (Dissolved Gas Analysis) hoặc phóng điện cục bộ (PD). Việc tích hợp dữ liệu thời gian thực sẽ cho phép mô hình chuyển từ dạng bán tĩnh sang mô hình động (Dynamic PdM), nâng cao độ chính xác trong dự đoán và cho phép phản ứng linh hoạt hơn với các thay đổi bất thường trong vận hành.

Thứ hai, các mô phỏng và biểu đồ dự đoán hiện tại vẫn mang tính tuyến tính, phụ thuộc vào các giả định cố định về phân phối Weibull. Trong thời gian tới, việc ứng dụng các thuật toán học máy như Random Forest, LSTM, hoặc mạng nơ-ron tích chập (CNN) có thể giúp phát hiện các mối quan hệ phi tuyến và cải thiện khả năng dự báo lỗi không chỉ về mặt thời điểm mà còn về bản chất loại lỗi sẽ xảy ra. Kết quả mô hình hóa bằng các công cụ như Jupyter Notebook cũng chứng minh khả năng tích hợp giữa dữ liệu định tính (FTA, FMECA) và dữ liệu định lượng học máy là hoàn toàn khả thi.

Minh họa mở rộng: Ứng dụng mô hình học máy Random Forest vào cảnh báo lỗi

Để kiểm chứng tính khả thi của việc tích hợp học máy vào hệ thống PdM, nhóm nghiên cứu đã xây dựng mô hình phân loại lỗi MOG_A (Magnetic Oil Gauge – cảnh báo cạn dầu) sử dụng thuật toán Random Forest, huấn luyện từ dữ liệu lịch sử cảm biến. Kết quả cho thấy mô hình đạt độ chính xác 98.95%, với các chỉ số precision và recall cao (trung bình đạt 0.97 trở lên), đặc biệt trong việc phân biệt giữa lỗi thực sự (label 1) và trạng thái bình thường (label 0). Cụ thể được miêu tả trong hình sau.



Hình 5.1. Ma trận nhầm lẫn mô hình Random Forest phân loại lỗi MOG_A.

Không chỉ dừng lại ở phân loại offline, nhóm còn triển khai hệ thống chạy theo thời gian thực: cảm biến truyền dữ liệu từng phút, mô hình dự đoán xác suất lỗi với MOG_A = 1. Khi xác suất vượt ngưỡng cảnh báo, hệ thống tự động kích hoạt thông báo cảnh báo và gửi email tức thì.

```
1/1 ----- 0s 38ms/step
● 2019-07-08 11:54:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0036 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 58ms/step
● 2019-07-08 11:57:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0030 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 44ms/step
● 2019-07-08 12:11:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0026 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 33ms/step
● 2019-07-08 12:22:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0044 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 38ms/step
● 2019-07-08 12:22:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 34ms/step
● 2019-07-08 12:29:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 37ms/step
● 2019-07-08 12:31:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 36ms/step
● 2019-07-08 12:34:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 38ms/step
● 2019-07-08 12:51:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 47ms/step
● 2019-07-08 12:51:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0075 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 55ms/step
● 2019-07-08 12:52:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0076 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 59ms/step
● 2019-07-08 12:54:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.0076 → Dự đoán: 0 (Bình thường)
0s 45ms/step
...
■ Đã gửi cảnh báo qua email.
1/1 ----- 0s 36ms/step
● 2019-07-13 14:00:00 | Xác suất lỗi (MOG_A=1) từ cảm biến: 0.9853 → Dự đoán: 1 (Lỗi)
■ CẢNH BÁO: Hệ thống dự đoán sắp cạn dầu (MOG_A = 1)!
```

Hình 5.2: Mô phỏng cảnh báo lỗi thời gian thực khi xác suất lỗi vượt ngưỡng.

Ví dụ, trong lần dự đoán tại 14:00 ngày 13/07/2019, hệ thống phát hiện xác suất lỗi lên đến 0.9853, lập tức cảnh báo "Hệ thống dự đoán sắp cạn dầu", hỗ trợ kỹ sư kịp thời kiểm tra trước khi sự cố thực sự xảy ra.

Việc kết hợp AI với dữ liệu cảm biến thời gian thực cho thấy tính ứng dụng mạnh mẽ của mô hình trong các hệ thống công nghiệp hiện đại. Nó mở ra hướng tích hợp trực tiếp với các nền tảng SCADA, IIoT, và dashboard giám sát để xây dựng hệ thống bảo trì chủ động cảnh báo sớm phản ứng nhanh.

Thứ ba, mô hình hiện tại áp dụng cho máy biến áp ngâm dầu, song về mặt phương pháp, hoàn toàn có thể được tổng quát hóa cho các thiết bị khác trong hệ thống điện như: máy cắt (circuit breakers), tụ bù (capacitor banks), thiết bị bảo vệ rơ le (relays) hoặc máy phát (generators). Điều này mở ra hướng nghiên cứu mở rộng sang phân tích toàn diện hệ thống điện, thay vì chỉ tập trung vào một thành phần đơn lẻ.

Cuối cùng, với sự phát triển của công nghệ điện toán biên (edge computing) và điện toán đám mây (cloud computing), mô hình bảo trì dự đoán có thể được triển khai trong môi trường thời gian thực, với dữ liệu thu thập liên tục, xử lý tức thì và đưa ra cảnh báo tự động. Việc xây dựng dashboard trực quan, mô phỏng các chỉ số sống sót hoặc xác suất sự kiện đỉnh trong thời gian thực sẽ là bước tiếp theo để nâng cấp mô hình thành một công cụ vận hành chủ động cho doanh nghiệp điện lực.

Tóm lại, mô hình bảo trì dự đoán tích hợp FTA–FMECA–Weibull không chỉ là công cụ kỹ thuật hữu hiệu trong bối cảnh hiện tại, mà còn là nền tảng vững chắc để mở rộng thành một hệ thống bảo trì thông minh, thích ứng với xu thế chuyển đổi số và công nghiệp 4.0 trong lĩnh vực năng lượng.

TRÍCH DÃN

- [1] Tang, H., & Wu, X. (2011). Application of failure modes and effects analysis (FMEA) and fault tree analysis (FTA) for reliability evaluation in power systems. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–6.
- [2] Valyanskii, A. V., Kartashev, I. I., & Sharov, Y. V. (2014). The effect of power quality on power-transformer reliability. *Russian Electrical Engineering*, 85(3), 138–144. <https://doi.org/10.3103/S1068371214030043>
- [3] Singh, J., Singh, R., & Singh, A. (2019). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a key process of transformer manufacturing. *Engineering Failure Analysis*, 99, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.014>
- [4] Chen, J., Duan, N., Zhou, X., & Wang, Z. (2024). Diagnostic model for transformer core loosening faults based on the Gram angle field and multi-head attention mechanism. *Applied Sciences*, 14(23), 10906. <https://doi.org/10.3390/app142310906>
- [5] Singh, J. (2016). Transformer failure analysis: Reasons and impact on power system reliability. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(10), 59–63.
- [6] AXA XL. (2020). Transformers – surroundings: Loss prevention bulletin. AXA XL Risk Consulting. Retrieved from <https://axaxl.com/>
- [7] Javanmard, H., & Koraeizadeh, A. A. (2016). Optimizing the preventive maintenance scheduling by genetic algorithm based on cost and reliability in National Iranian Drilling Company. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 463–475. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0155-9>:contentReference[oaicite:0]{index=0}
- [8] Tian, Z., Lin, D., & Wu, B. (2012). Condition based maintenance optimization considering multiple objectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0358-7>:contentReference[oaicite:1]{index=1}
- [9] Appoh, F., Yunusa-Kaltungo, A., Sinha, J. K., & Kidd, M. (2021). Practical demonstration of a hybrid model for optimising the reliability, risk, and maintenance of rolling stock subsystem. *Urban Rail Transit*, 7(2), 139–157. <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00141-3>:contentReference[oaicite:2]{index=2}
- [10] Murugan, S., & Balan, R. (2015). Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*, 55, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.06.005>

- [11] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50004-1>
- [12] Zhu, P., Hong, H., & Ding, F. (2015). A stochastic approach for the analysis of degradation data with random effects and its application to electric power transformer. *Reliability Engineering & System Safety*, 138, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.01.015>
- [13] International Electrotechnical Commission. (2006). IEC 61025: Fault tree analysis (FTA). Geneva: IEC Technical Committee 56.
- [14] Cui, T., & Li, S. (2020). Space fault tree theory and system reliability analysis. *EDP Sciences*. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2499-1>
- [15] Nsanyuy, F. H., Tony, M. L., & Foko, C. (2022). Application of FMECA in distribution transformers: A case study in Cameroon. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134, 107–116.
- [16] Mohanty, N. C., Dash, P., & Pradhan, R. (2020). FMECA analysis and condition monitoring of critical equipment in a super thermal power plant. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 11(3), 1–15.
- [17] Di Nardo, A., Giannini, F., & Massaresi, P. (2022). A hybrid dynamic FMECA approach with AHP and fuzzy logic for risk analysis in agri-food processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 108–125.
- [19] ReliaSoft. (2024). Another look at the shape parameter of the Weibull distribution (Beta). ReliaSoft Corporation. Retrieved from <https://www.reliasoft.com/>
- [20] Madavan, N. K., & Rajesh, M. (2016). Failure analysis of transformer liquid–solid insulation system. *Engineering Failure Analysis*, 60, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.004>
- [21] Dey, S., & Bhattacharya, S. (2009). Discriminating among the log-normal, Weibull, and generalized exponential distributions. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 38(3), 588–606. <https://doi.org/10.1080/03610910802497392>
- [22] ReliaSoft. (2024). Life data analysis: An overview of the reliability life data analysis (Weibull analysis). ReliaSoft Corporation. Retrieved from <https://www.reliasoft.com/>
- [23] John, D. (2012). *Introduction to reliability engineering* (2nd ed.). Exponent Inc. Retrieved from <https://reliabilityanalytics.com/>

- [24] Muhammad, A. (2025). Estimation of the scale parameter in Weibull-based failure prediction for transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159, 108413. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.108413>
- [25] Yu, D., Zhang, X., & Huang, H. Z. (2011). A comparison of FMEA, AFMEA and FTA for early stage design reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 225(1), 3–18. <https://doi.org/10.1243/1748006XJRR300>
- [26] Peeters, J., Vandeborre, P., & Martens, D. (2017). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a wind turbine system. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.04.007>
- [27] Bertsche, B. (2008). *Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of component and system reliability*. Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-34282-3:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34282-3:contentReference[oaicite:0]{index=0})
- [28] Akbari, M., Khazaei, P., Sabetghadam, I., & Karimifard, P. (2013). Failure modes and effects analysis (FMEA) for power transformers. 28th Power System Conference, Tehran, Iran.
- [29] Sgarbossa, F., Cevasco, D., & Collu, M. (2018). Impacts of Weibull parameters estimation on preventive maintenance cost. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1229–1234. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.473>
- [30] Freeman, S., & Ye, Y. (2021). Age and condition-based preventive replacement timing for periodic aircraft maintenance checks. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107745. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107745>
- [31] Velimir, C. (2016). *Power transformer maintenance*. Continuing Education and Development, Inc. Retrieved from <https://www.cedengineering.com/userfiles/Power%20Transformer%20Maintenance.pdf>
- [32] Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [33] Florian, E., Zennaro, I., & Sgarbossa, F. (2019). Machine learning for predictive maintenance: A methodological framework. In XXIV Summer School “Francesco Turco” – Industrial Systems Engineering. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/336085105>

[34] Hang, T., Wen, J., Zheng, B. S., Xiao, J. H., & Zhou, F. (2025). Reliability analysis of the vehicle door system EDCU based on Weibull distribution. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 27(2).

<https://doi.org/10.17531/ein/195257>

[35] Ghani, R. (2021). Integration of FMECA and statistical analysis for predictive maintenance. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 2(1), 33–37.

<https://doi.org/10.4995/jarte.2021.14737>

[36] Cevasco, D., Collu, M., & Lin, Z. (2018). O&M cost-based FMECA: Identification and ranking of the most critical components for 2-4 MW geared offshore wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 1102, 012039.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1102/1/012039>

[37] Daya, A., & Leonard, J. (2025). Maintenance plan improvement using failure mode effect and criticality analysis: A case study on mining equipment. *Engineering Science & Technology Journal*, 6(3), 86–103. <https://doi.org/10.51594/estj.v6i3.1879>