

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



TRẦN ĐỨC HẢI

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CẤU HÌNH HỆ THỐNG
GIÁM SÁT TỰ ĐỘNG CHO CẤP NGẦM TRUNG ÁP**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN

TRẦN ĐỨC HẢI

KỸ THUẬT ĐIỆN

2025

Hà Nội – 2025

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



TRẦN ĐỨC HẢI

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CẤU HÌNH HỆ THỐNG
GIÁM SÁT TỰ ĐỘNG CHO CẤP NGẦM TRUNG ÁP**

Ngành Kỹ thuật điện
Mã số 8520201

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN:
1. TS. HOÀNG MAI QUYỀN**

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân. Các thông tin trong đề án là do tôi tự thu thập, tìm hiểu, đúc kết và phân tích một cách trung thực, phù hợp với tình hình thực tế. Đề án đã tham khảo số liệu và tài liệu từ các nguồn sách, báo, tạp chí khoa học và các công trình nghiên cứu uy tín trong và ngoài nước.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Tác giả

Trần Đức Hải

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến Thầy hướng dẫn là TS. Hoàng Mai Quyền, Thầy đã luôn tận tâm hỗ trợ và hướng dẫn tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thiện đề án này. Sự chỉ dẫn và những đóng góp quý báu của Thầy là nền tảng quan trọng giúp tôi hoàn thành tốt nhiệm vụ của mình.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn Ban lãnh đạo cùng các cá nhân và đơn vị thuộc Khoa Điện - trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã nhiệt tình cố vấn, tạo điều kiện thuận lợi cũng như cung cấp thông tin và ý kiến chuyên môn trong suốt quá trình tôi học tập, nghiên cứu và triển khai đề án. Bên cạnh đó, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn tới các Thầy cô tại trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, những người đã trực tiếp giảng dạy, truyền đạt kiến thức và kinh nghiệm trong suốt thời gian tôi theo học.

Tôi cũng xin cảm ơn tập thể lãnh đạo và các chuyên viên chuyên trách của Trung tâm Đào tạo Sau đại học - trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ và tạo điều kiện tốt nhất để tôi hoàn thành các yêu cầu trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Trong quá trình hoàn thành, đề án chắc chắn không thể tránh khỏi những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được những ý kiến đóng góp và sự hướng dẫn từ các Thầy cô để có thể tiếp tục hoàn thiện và nâng cao chất lượng của đề án.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Tác giả

Trần Đức Hải

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT.....	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	ix
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1 - TỔNG QUAN	6
1.1. GIỚI THIỆU CHUNG	6
1.1.1. Khái niệm	6
1.1.2. Cấu tạo cáp ngầm trung áp.....	12
1.1.3. Ứng dụng.....	20
1.2. CÁC NGUYÊN NHÂN DẪN ĐẾN SỰ CỐ CỦA CÁP NGẦM VÀ MỐI NỖI CÁP NGẦM TRUNG ÁP	21
1.2.1. Dòng tải cao	22
1.2.2. Nhiệt độ	23
1.2.3. Phóng điện cục bộ	25
1.2.4. Sự lão hóa của vật liệu cách điện.....	27
1.3. CÁC GIẢI PHÁP GIÁM SÁT CÁP NGẦM TRUNG ÁP.....	29
1.3.1. Thế giới	29
1.3.2. Trong nước	33

1.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG	34
CHƯƠNG 2 - ĐỀ XUẤT CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT CẤP NGẦM TỰ ĐỘNG	36
2.1. CẤU TRÚC CHUNG CỦA HỆ THỐNG ĐỀ XUẤT	36
2.1.1. Các cảm biến	38
2.1.2. Nút thu thập, xử lý tín hiệu	51
2.1.3. Máy chủ	52
2.2. HOẠT ĐỘNG THU THẬP VÀ XỬ LÝ DỮ LIỆU	53
2.3. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN CẢNH BÁO SỰ CỐ CHO CẤP NGẦM	55
2.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG	57
CHƯƠNG 3 - MÔ PHỎNG SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ TRONG CÁCH ĐIỆN CẤP THEO NHIỆT ĐỘ BỀ MẶT CẤP	59
3.1. MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT TRONG CẤP NGẦM TRUNG ÁP ..	60
3.2. PHƯƠNG PHÁP SỐ VÀ MẪU CẤP	67
3.2.1. Mẫu cấp	67
3.2.2. Phương pháp số	70
3.3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG	76
3.3.1. Phân tích trạng thái xác lập của sự phân bố nhiệt độ trong quá trình vận hành.....	76
3.3.2. Phân bố nhiệt độ trong cách điện cấp khi vận hành với dòng điện định mức và các giá trị khác nhau của nhiệt độ bề mặt cấp (T_s).....	79

3.3.3. Xác định ngưỡng cảnh báo nhiệt độ của cảm biến tại các dòng điện vận hành khác nhau	83
3.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG	87
KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ.....	89
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	92

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MV	Medium voltage	Trung áp
PD	Partial Discharge	Phóng điện cục bộ
FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn
IEC	International Electrotechnical Commission	Ủy ban Kỹ thuật Điện Quốc tế
PVC	Polyvinyl Chloride	Polyvinyl Clorua
PE	Polyethylene	Polyetylen
XLPE	Cross-Linked Polyethylene	Polyetylen liên kết chéo
EPR	Ethylene Propylene Rubber	Cao su Etylen-Propylen
TP		Thành phố
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Viện Kỹ sư Điện và Điện tử
EVNHANOI		Tổng công ty Điện lực Hà Nội
EVNHCMC		Tổng công ty Điện lực Hồ Chí Minh
UBND		Ủy ban nhân dân
HDPE	High-Density Polyethylene	Polyetylen mật độ cao
HFTC	High Frequency Current Transformer	Biến dòng tần số cao
TEV	Transient Earth Voltage	Cảm biến điện áp thoáng qua đất
SCADA	Supervisory Control and Data	Điều khiển giám sát và

	Acquisition	thu thập dữ liệu
FbCM	Fiber-based Current Monitoring	Giám sát dòng điện dựa trên sợi quang
DAS	Distributed Acoustic Sensing	Cảm biến âm thanh phân tán
SCG	Smart Cable Guard	Hệ thống giám sát cáp thông minh
DTS	Distributed Temperature Sensing	Cảm biến nhiệt độ phân tán
RC	Rogowski Coil	Cuộn Rogowski
RTD	Resistance Temperature Detector	Cảm biến nhiệt độ điện trở
UHF	Ultra High Frequency	Tần số cực cao
ADC	Analog to Digital Converter	Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số
SPI	Serial Peripheral Interface	Giao diện ngoại vi nối tiếp
T_s		Nhiệt độ bề mặt cáp
$T_{\max}$		Nhiệt độ lớn nhất của cách điện cáp
2D	Two-Dimensional	Hai chiều
T_{limit}		Nhiệt độ tối đa cho phép của cách điện cáp
$T_{s.\text{warning}}$		Nhiệt độ cảnh báo của bề mặt cáp

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. So sánh đặc điểm các loại vật liệu cách điện.....	8
Bảng 1.2. Tóm tắt các thành phần chính của cáp.....	15
Bảng 3.1. Thông số kỹ thuật của cáp ngầm MV [66].....	68
Bảng 3.2. Đặc tính vật liệu cấu thành cáp ngầm MV [27], [52].....	68
Bảng 3.3. Giá trị $T_{s,warning}$ trong các trường hợp mức dòng điện khác nhau ...	86

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Cấu tạo cơ bản của cáp ngầm MV [66]	13
Hình 1.2. Dòng tải cao và chu kỳ dòng điện tác động tàn phá đường dây	22
Hình 1.3. Sự lão hóa của vật liệu cách điện.....	29
Hình 2.1. Cấu hình đề xuất của hệ thống giám sát cáp ngầm MV [4].....	37
Hình 2.2. Các phương pháp đo giá trị dòng điện.....	38
Hình 2.3. Các phương pháp đo nhiệt độ	41
Hình 2.4. Các phương pháp đo độ ẩm	44
Hình 2.5. Các phương pháp đo phóng điện cục bộ.....	47
Hình 2.6. Hoạt động thu thập và xử lý dữ liệu. Δt - khoảng thời gian giữa 2 lần thực hiện phép đo [4].....	54
Hình 2.7. Thuật toán cảnh báo sự cố cáp ngầm [4]	56
Hình 2.8. Trình tự thực hiện để xác định ngưỡng ứng suất [4]	57
Hình 3.1. Cấu tạo mẫu cáp ngầm MV một lõi	61
Hình 3.2. Cửa sổ Untitled.mph - COMSOL Multiphysics	71
Hình 3.3. Mô-đun các trường làm việc	71
Hình 3.4. Thông số kỹ thuật mô hình mô phỏng	73
Hình 3.5. Thông số đặc tính vật liệu cấu thành cáp.....	73
Hình 3.6. Điều kiện biên nhiệt độ của mô hình	74
Hình 3.7. Điều kiện biên nguồn nhiệt của mô hình	75
Hình 3.8. Chia lưới mặt cắt 2D cáp ngầm.....	76

Hình 3.9. Phân bố nhiệt độ trong cáp MV khi $I = 400 \text{ A}$ và $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$: a) mặt cắt 2D ở chế độ xác lập, b) theo khoảng cách xuyên tâm trong khoảng thời gian vận hành từ 1 h đến 24 h	78
Hình 3.10. Phân bố nhiệt độ trong cáp MV khi $I = 590 \text{ A}$ tại các giá trị T_s khác nhau.....	80
Hình 3.11. Mối quan hệ giữa giá trị nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$, khi $I = 590 \text{ A}$ tại các giá trị T_s khác nhau	81
Hình 3.12. Mối quan hệ giữa giá trị nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$, khi I thay đổi tại các giá trị T_s khác nhau	84
Hình 3.13. Các điểm giao nhau giữa các đường hồi quy tuyến tính và trực ngưỡng sự cố T_{limit}	85

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Hiện nay, hệ thống cáp ngầm đang được triển khai mạnh mẽ nhờ những ưu điểm vượt trội so với cáp nổi, bao gồm khả năng giảm thiểu tác động của các yếu tố khí hậu bất lợi, hạn chế rủi ro an toàn điện và nâng cao tính thẩm mỹ. Đặc biệt, cáp ngầm trung áp (MV) đóng vai trò quan trọng trong hệ thống truyền tải và phân phối điện năng, góp phần quyết định vào việc duy trì hiệu quả vận hành và mức độ an toàn của lưới điện. Thực tế, thị trường cáp ngầm MV toàn cầu đang chứng kiến tốc độ tăng trưởng mạnh mẽ, được thúc đẩy bởi nhu cầu hiện đại hóa lưới điện, sự tăng cường tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo, và các khoản đầu tư vào hạ tầng truyền tải và phân phối điện. Ngoài ra, các yếu tố như sự phát triển của các trung tâm dữ liệu, tiến bộ trong công nghệ sản xuất cáp ngầm và các chính sách khuyến khích, tiếp tục đóng vai trò cốt lõi trong việc thúc đẩy nhu cầu sử dụng cáp ngầm MV. Đáng chú ý, khu vực Châu Á - Thái Bình Dương đang nổi lên là thị trường có tốc độ tăng trưởng nhanh nhất, phản ánh sự bùng nổ của nhu cầu năng lượng trong khu vực này. Riêng tại Việt Nam, tốc độ đô thị hóa nhanh chóng và sự phát triển quy mô của các khu công nghiệp đã tạo áp lực lớn lên hệ thống truyền tải điện. Việc xây dựng mạng lưới cáp ngầm MV hiệu quả đang trở thành giải pháp cấp bách nhằm đáp ứng một cách tối ưu yêu cầu phụ tải tại các khu vực trọng điểm.

Mặc dù vậy, cùng với sự mở rộng của mạng lưới cáp ngầm MV, nguy cơ xảy ra các sự cố trên đường dây này cũng đặt ra thách thức đáng kể. Các sự cố xảy ra trên đường dây cáp ngầm MV có thể dẫn đến những hậu quả nghiêm trọng, như gián đoạn cung cấp điện, đe dọa an toàn cộng đồng và gây ra thiệt hại kinh tế lớn. Trong thực tế, cáp ngầm MV chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố

tác động đồng thời như nhiệt độ, dòng điện, điện trường và các ứng suất cơ học. Những tác động này không chỉ ảnh hưởng đến hiệu suất vận hành mà còn làm giảm tuổi thọ cách điện và nguy cơ dẫn đến hỏng hóc. Trong bối cảnh đó, việc theo dõi và phân tích các yếu tố ứng suất một cách chính xác là điều kiện tiên quyết để đảm bảo độ tin cậy của hệ thống cáp. Tuy nhiên, với đặc thù được lắp đặt dưới mặt đất, việc tiếp cận và chẩn đoán tình trạng cáp ngầm trở nên phức tạp, đòi hỏi áp dụng các phương pháp giám sát hiện đại.

Trên thế giới đã xuất hiện nhiều giải pháp để có thể giám sát, chẩn đoán tình trạng cáp ngầm MV. Tuy nhiên, các giải pháp thường tập trung thu thập vào một yếu tố hoặc một ứng suất nhất định, do vậy sẽ gặp nhiều hạn chế trong việc giám sát, chẩn đoán toàn diện tình trạng cáp. Trong khi đó, các giải pháp giám sát cáp ngầm tự động trong nước chủ yếu tập trung vào giám sát vận hành của đường dây cáp cao áp, hoặc chỉ dừng ở mức độ giám sát thủ công, chưa khai thác hiệu quả các công cụ tự động hóa và phân tích dữ liệu. Đặc biệt, các đơn vị điện lực chưa chú trọng ứng dụng chẩn đoán trước sự cố cho đường dây cáp ngầm MV, đồng thời việc nghiên cứu đề cập đến giám sát tình trạng cáp và mối nối cáp chưa được quan tâm đầy đủ. Điều này dẫn đến những hạn chế trong việc phát hiện và cảnh báo các hiện tượng bất thường trên đường dây cáp ngầm MV, làm gia tăng nguy cơ xảy ra sự cố, kéo theo chi phí sửa chữa và bảo trì ngày một tăng cao.

Trên cơ sở đó, việc nghiên cứu và phát triển một hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm MV là cần thiết, giúp hỗ trợ quá trình ra quyết định trong việc bảo dưỡng, bảo trì và vận hành hệ thống.

Đề tài “**Nghiên cứu xây dựng cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm trung áp**” được chọn nhằm đưa ra một giải pháp kỹ thuật kết hợp thiết bị giám sát và mô phỏng, giúp theo dõi toàn diện và cảnh báo sớm các

hiện tượng bất thường trên hệ thống cáp ngầm MV, từ đó đảm bảo tính ổn định và an toàn cho hệ thống điện. Việc mô phỏng và phân tích sự phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm MV giúp xác định mối quan hệ giữa nhiệt độ bề mặt cáp và nhiệt độ lớn nhất của cách điện cáp, nhằm đưa ra ngưỡng cảnh báo phù hợp cho thông số nhiệt độ. Hơn nữa, nghiên cứu này góp phần xác định sự tương quan giữa giá trị nhiệt độ và mức dòng điện vận hành trong lõi dẫn của cáp. Sự trợ giúp của phần mềm mô phỏng trong quá trình nghiên cứu cho phép giả định các điều kiện thực tế một cách chính xác, giúp tối ưu hóa giải pháp giám sát và đảm bảo độ tin cậy của hệ thống.

2. Mục đích nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan về giải pháp giám sát cáp ngầm MV.
- Đề xuất được một cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm MV.
- Mô phỏng được sự phân bố nhiệt độ trong cách điện dựa trên các dữ liệu thực tế từ cảm biến nhiệt độ, vật liệu của cáp, ... từ đó khuyến nghị ngưỡng cảnh báo cho thông số nhiệt độ trong cấu hình đề xuất.

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

- Cáp ngầm trung áp cách điện XLPE.

4. Luận điểm cơ bản, đóng góp mới

- Đề tài phát triển nền tảng lý thuyết tích hợp giám sát các thông số nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và phóng điện cục bộ (PD), hỗ trợ nâng cao khả năng dự báo và cảnh báo sớm các sự cố cáp ngầm.
- Xây dựng mô hình mô phỏng phân bố nhiệt độ dựa trên dữ liệu cảm biến, điều kiện vận hành và đặc tính vật liệu của cáp polyme, giúp xác định ngưỡng nhiệt độ an toàn, phục vụ tối ưu hóa vận hành hệ thống.

- Đề tài xác định ngưỡng cảnh báo cho thông số nhiệt độ từ mô phỏng và tính toán, đảm bảo độ tin cậy cho vận hành cáp trong các điều kiện tải khác nhau.

5. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp nghiên cứu tổng quan tài liệu: xây dựng cơ sở lý thuyết vững chắc thông qua việc phân tích cấu tạo cáp, nguyên nhân sự cố, ... và các hệ thống giám sát hiện có trong và ngoài nước. Phương pháp này xác định các khoảng trống kỹ thuật, từ đó định hướng phát triển cấu hình giám sát tối ưu.

- Phương pháp phân tích và thiết kế kỹ thuật: đề xuất cấu hình hệ thống giám sát tự động, bao gồm việc lựa chọn cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, thiết bị đo lường dòng điện và các thành phần phần cứng khác. Đồng thời, xây dựng thuật toán cảnh báo sự cố cáp ngầm cho cấu hình đề xuất.

- Phương pháp mô phỏng số: sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích sự phân bố nhiệt độ trong cáp. Mô hình mô phỏng được thiết lập dựa trên thông số vật liệu và điều kiện vận hành thực tế, cho phép xác định ngưỡng nhiệt độ cảnh báo phù hợp với tiêu chuẩn an toàn.

- Phương pháp phân tích và đánh giá kết quả: phân tích dữ liệu mô phỏng nhiệt độ để đánh giá sự phân bố nhiệt trong cáp dưới các điều kiện vận hành khác nhau. Đưa ra các nhận xét, đánh giá tính hiệu quả của cấu hình hệ thống giám sát, từ đó đề xuất các giải pháp cải tiến phù hợp.

6. Nội dung

Ngoài phần mở đầu và kết luận, danh mục tài liệu tham khảo, mục lục, hình vẽ, bảng biểu, ký hiệu chữ viết tắt, nội dung đề án gồm các chương chính sau:

- Chương 1: Tổng quan.
- Chương 2: Đề xuất cấu hình hệ thống giám sát cáp ngầm tự động.
- Chương 3: Mô phỏng sự phân bố nhiệt độ trong cách điện cáp theo nhiệt độ bề mặt cáp.

7. Kết luận

- Cấu hình một hệ thống giám sát tự động cáp ngầm MV tích hợp các thông số quan trọng của cáp như nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và hiện tượng PD trong cáp.
- Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ trong lớp cách điện của cáp ngầm MV.
- Ngưỡng cảnh báo cho thông số nhiệt độ.
- Báo cáo phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ đến các đặc tính của lớp cách điện cáp.

CHƯƠNG 1 - TỔNG QUAN

1.1. GIỚI THIỆU CHUNG

1.1.1. Khái niệm

1.1.1.1. *Quá trình phát triển cáp ngầm trung áp*

Trong kỹ thuật điện, cáp MV là cáp dùng với điện áp lớn hơn 1kV nhưng không lớn hơn 35kV xoay chiều [3]. Cáp ngầm là giải pháp phổ biến trong các hệ thống truyền tải và phân phối điện MV, đặc biệt tại các khu vực đô thị, khu công nghiệp hoặc những nơi đòi hỏi cao về độ an toàn, thẩm mỹ, cũng như các khu vực không thể triển khai hệ thống dây dẫn trên không do hạn chế về không gian hoặc yêu cầu quy hoạch. Hệ thống cáp ngầm MV đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự ổn định của lưới điện, nhờ khả năng giảm thiểu tác động của các yếu tố khí hậu bất lợi (gió, bão), đồng thời hạn chế rủi ro an toàn điện. Thành phần chính của đường dây cáp ngầm MV bao gồm các đoạn cáp, và được kết nối với nhau bằng các đầu mối nối cáp khi cần truyền tải và phân phối điện ở khoảng cách lớn. Các yêu cầu về thiết kế, kích thước và thử nghiệm đối với “cáp điện có cách điện đặc dạng đùn và phụ kiện” dành cho cáp ngầm MV, được quy định chi tiết trong tiêu chuẩn IEC 60502-2 [34].

Khái niệm cáp ngầm MV ngày càng được mở rộng cùng với sự phát triển của ngành điện, nhằm đáp ứng nhu cầu sử dụng năng lượng ngày càng tăng, đảm bảo độ tin cậy trong truyền tải điện, đồng thời tối ưu hóa hạ tầng đô thị. Ở mức điện áp trung bình, cáp ngầm MV cung cấp một giải pháp kinh tế, linh hoạt và bền vững cho việc vận hành hệ thống điện phân phối, đặc biệt tại những nơi không thể sử dụng cáp trên không hoặc các công trình yêu cầu giảm thiểu tác động môi trường. Sự phát triển của vật liệu cách điện cáp là một phần quan trọng trong sự phát triển của công nghệ điện. Từ những sợi

cáp điện báo đầu tiên đến các đường dây điện cao thế ngày nay, vật liệu dùng để cách điện cáp điện đã có những phát triển đáng kể theo thời gian.

Vào cuối những năm 1800, sự phát triển của điện thoại và truyền tải điện đã tạo ra nhu cầu về vật liệu cách điện đáng tin cậy và bền hơn. Cao su là một trong những vật liệu đầu tiên được sử dụng cho mục đích này, do giá thành rẻ, dễ gia công và có điện trở cao. Tuy nhiên, vật liệu cách nhiệt bằng cao su có một số nhược điểm như dễ bị nứt và hư hỏng theo thời gian, có thể dẫn đến sự cố điện và hỏa hoạn. Vào đầu những năm 1900, một số vật liệu khác đã được hoàn thiện để thay thế cao su, bao gồm giấy, bông và amiăng. Vật liệu cách điện bằng giấy được sử dụng rộng rãi vào đầu thế kỷ 20. Vật liệu được tạo ra bằng cách tẩm giấy với một vật liệu như sáp hoặc vecni để chống lại độ ẩm và các yếu tố môi trường khác. Vật liệu cách điện bằng cotton, amiăng cũng được sử dụng trong thời gian này. Vào những năm 1920 và 1930, các vật liệu tổng hợp như polyvinyl clorua (PVC) và polyetylen (PE) bắt đầu được sử dụng để cách điện cáp. Những vật liệu này cung cấp các đặc tính điện và cơ học vượt trội so với các vật liệu trước đó và cũng có khả năng chống chịu tốt hơn với các yếu tố môi trường như độ ẩm, nhiệt và hóa chất. Vào những năm 1950 và 1960, việc sử dụng vật liệu tổng hợp để cách điện cáp tiếp tục phát triển, với sự phát triển của các vật liệu mới như polyetylen liên kết chéo (XLPE) và cao su etylen-propylen (EPR). Vật liệu cách điện XLPE lần đầu tiên được sử dụng vào đầu những năm 1960 và nhanh chóng trở nên phổ biến trong cáp điện cao thế. XLPE được đánh giá cao vì khả năng chịu được nhiệt độ cao và ứng suất cơ học. Vật liệu cách điện EPR được phát triển vào những năm 1960 và trở nên phổ biến trong cáp điện hạ thế. EPR có tính linh hoạt và khả năng chống chịu các yếu tố môi trường như độ ẩm và hóa chất.

Đột phá lớn nhất trong ngành cáp ngầm diễn ra với sự ra đời của các vật liệu cách điện tổng hợp, đặc biệt là XLPE. Công nghệ XLPE giúp tăng cường

tính năng chịu nhiệt, khả năng chịu cơ học và điện môi của cáp, đồng thời tăng tuổi thọ cáp. Hiện nay, cáp điện có vật liệu cách điện như PVC, PE, XLPE hoặc EPR, được coi là tiêu chuẩn cho các hệ thống cáp ngầm MV hiện đại, thay thế dần các loại cáp cách điện giấy, giấy tẩm dầu và cao su trước đây. Vật liệu cách điện cho cáp điện không ngừng được cải tiến nhằm nâng cao hiệu suất và hạn chế ảnh hưởng tới môi trường. Những loại vật liệu mới được sản xuất từ các nguồn tài nguyên tái tạo, đang dần được phát triển như lựa chọn thay thế cho các vật liệu truyền thống. Bên cạnh đó, các phương pháp thử nghiệm và đánh giá độ bền của cáp điện ngày càng được chuẩn hóa, để phù hợp với các tiêu chuẩn, quy chuẩn quốc tế như IEC hoặc IEEE, nhằm đảm bảo hiệu suất vượt trội và nâng cao độ an toàn trong vận hành hệ thống truyền tải điện. Bảng 1.1 trình bày sự so sánh giữa các loại vật liệu cách điện cáp phổ biến hiện nay, cung cấp cơ sở cho việc lựa chọn và ứng dụng phù hợp trong thực tế.

Bảng 1.1. So sánh đặc điểm các loại vật liệu cách điện

Vật liệu	Ưu điểm	Nhược điểm	Nhiệt độ hoạt động cho phép
PVC	- Giá thành thấp - Độ bền cao - Dễ dàng tìm kiếm vật liệu trong sản xuất	- Tổn thất điện môi cao - Bị nóng chảy khi gặp nhiệt độ cao - Chứa halogen, gây ảnh hưởng tiêu cực tới môi trường - Không phù hợp cho cáp điện trung áp và cao áp	70 °C (cáp điện chung), 85 °C (cáp chịu nhiệt)

XLPE	- Tổn thất điện môi thấp - Tính chất vật liệu được cải thiện ở nhiệt độ cao - Không nóng chảy nhưng có hiện tượng giãn nở nhiệt	- Độ nhạy cảm trung bình với hiện tượng tạo cây nước (mặc dù một số polyme XLPE có khả năng chống lại hiện tượng này tốt hơn)	90 °C
EPR	- Độ linh hoạt cao - Giãn nở nhiệt thấp hơn (so với XLPE) - Ít nhạy cảm với hiện tượng tạo cây nước	- Tổn thất điện môi ở mức trung bình đến cao - Cần bổ sung chất độn hoặc phụ gia vô cơ	90 °C
Giấy/ Giấy tẩm dầu	- Tổn thất điện môi trong phạm vi thấp đến trung bình - Không bị tổn hại bởi thử nghiệm điện một chiều - Có lịch sử sử dụng lâu dài, đáng tin cậy	- Trọng lượng nặng - Chi phí cao - Cần hệ thống bơm hoặc thiết bị tạo áp lực cho chất cách điện - Khó sửa chữa - Suy giảm khả năng cách điện khi tiếp xúc với độ ẩm	70 °C

1.1.1.2. Hiện trạng cáp ngầm trung áp tại Việt Nam

Tại Việt Nam, một số đơn vị quản lý điện lực tại các thành phố lớn đã và đang tích cực lập kế hoạch, thực hiện triển khai xây dựng các đường dây cáp ngầm MV, nhằm tận dụng những ưu điểm mà hệ thống ngầm mang lại.

Tại TP Hà Nội, theo thống kê đến tháng 12/2022, Tổng công ty Điện lực TP Hà Nội (EVNHANOI) đã hoàn thành hạ ngầm các tuyến đường dây trung

và hạ áp trên địa bàn TP thuộc 180 tuyến phố nội thành, tỉ lệ ngầm hóa lưới điện MV đạt 100%. Trong giai đoạn đầu, TP Hà Nội tập trung nguồn lực với mục đích triển khai hạ ngầm trên địa bàn bốn quận trung tâm của TP, sau đó, TP sẽ tiếp tục triển khai trên địa bàn các quận huyện khác trong giai đoạn tiếp theo. Theo Sở Xây dựng TP, giai đoạn thực hiện đến năm 2025, EVNHANOI sẽ thực hiện hạ hầm toàn diện tại 300 tuyến phố thuộc 11 quận, huyện và thị xã. Để thúc đẩy việc chia sẻ và sử dụng hiệu quả hạ tầng ngầm, chính quyền TP đã chủ động phối hợp chặt chẽ với các cơ quan quản lý hạ tầng đô thị. Những nỗ lực này không chỉ góp phần tối ưu hóa nguồn lực, mà còn hướng tới mục tiêu xây dựng Thủ đô phát triển bền vững, hiện đại và xứng đáng với vị thế trung tâm văn hóa của cả nước. Trong giai đoạn quy hoạch phát triển lưới điện MV của TP, từ năm 2016 đến năm 2020, đã triển khai xây dựng mới 4.378,6 km đường dây MV, trong đó 2.065,8 km là cáp ngầm, đồng thời cải tạo và nâng tiết diện tổng cộng 1.347,9 km dây cáp. Giai đoạn từ năm 2021 đến năm 2025, kế hoạch tiếp tục xây dựng mới 3.358,2 km đường dây MV, bao gồm 1.385,5 km cáp ngầm và cải tạo nâng tiết diện 886,5 km dây cáp.

Tại tỉnh Hải Dương, tính đến tháng 8/2022, điện lực TP Hải Dương quản lý 128,6 km cáp điện ngầm đường dây MV và 109,97 km đường dây cáp điện ngầm hạ thế, chủ yếu phân bố dọc theo các tuyến đường chính của TP.

Tại tỉnh Quảng Ninh, tính đến thời điểm tháng 9/2021, cơ quan điện lực TP Hạ Long đang quản lý đường dây cáp ngầm MV với tổng chiều dài khoảng 531,1 km. Đường dây MV có nhiệm vụ cấp điện cho các phụ tải quan trọng thuộc các phường trong địa bàn TP.

Trong số các tỉnh và thành phố trên cả nước, TP Hồ Chí Minh là địa phương đi đầu trong thực hiện ngầm hóa lưới điện. Trong giai đoạn từ năm 2011 đến năm 2020, công tác ngầm hóa đã đạt được nhiều kết quả đáng ghi

nhận với việc hoàn thành 240 dự án ngầm. Trong đó, Tổng công ty Điện lực TP. Hồ Chí Minh (EVNHCMC) đã thực hiện ngầm hóa 1.025 km lưới điện MV và 1.730 km lưới điện hạ áp. Trong giai đoạn từ năm 2021 đến năm 2030, EVNHCMC tiếp tục triển khai đề án ngầm đồng bộ nhằm hiện đại hóa hệ thống lưới điện và nâng cao hiệu quả vận hành. Tính đến tháng 12/2022, đơn vị đã hoàn thành kế hoạch số 1642 của UBND TP, từng bước hoàn thành mục tiêu ngầm hóa 500 km lưới điện MV và 800 km lưới điện hạ áp trong giai đoạn từ năm 2021 đến năm 2025. Trung bình mỗi năm, kế hoạch yêu cầu hoàn thành khoảng 100 km lưới điện MV và 160 km lưới điện hạ áp. Dự kiến đến năm 2025, tỷ lệ ngầm hóa lưới điện tại TP. Hồ Chí Minh sẽ đạt từ 50% đến 60%, trong đó các quận nội thành có tỷ lệ ngầm hóa đạt từ 80% đến 90%, riêng các quận 1, 3 và 5 sẽ đạt gần 100%. Tính đến tháng 12/2022, tỷ lệ ngầm hóa lưới điện MV tại TP đã đạt 47%, với 3.995 km lưới điện MV ngầm trên tổng số 8.438 km. Trong giai đoạn từ năm 2026 đến năm 2030, EVNHCMC tiếp tục triển khai kế hoạch hoàn tất ngầm hóa lưới điện trung, hạ áp và cáp viễn thông trên địa bàn TP, định hướng phù hợp với sự phát triển kinh tế - xã hội của từng khu vực.

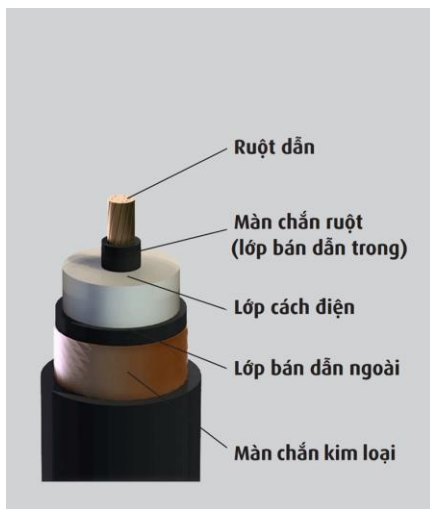
Thêm vào đó, một số tỉnh thành đã bước đầu triển khai hệ thống cáp ngầm MV với độ dài phù hợp cho nhu cầu địa phương. Điện lực Bình Định thực hiện thí điểm dự án ngầm hóa hệ thống lưới điện 22kV trên địa bàn thành phố Quy Nhơn. Trước đó, UBND tỉnh Bình Định đã ban hành kế hoạch thực hiện ngầm hóa hệ thống hạ tầng kỹ thuật trên địa bàn tỉnh giai đoạn từ năm 2020 đến năm 2025. Theo đó, giai đoạn này sẽ cơ bản hoàn tất hạ ngầm tại TP Quy Nhơn, toàn bộ các loại cáp của các ngành điện lực, viễn thông, chiếu sáng đô thị và hệ thống ống cấp thoát nước được bố trí đi chung trong hào kỹ thuật ở dưới vỉa hè. Kế hoạch từ năm 2025 về sau, UBND tiếp tục triển khai tại các đô thị loại IV trở lên trên địa bàn tỉnh.

Tại TP Đà Nẵng, UBND TP đã và đang xem xét, xây dựng lộ trình ngầm hóa lưới điện trung, hạ thế theo quyết định số 3239/QĐ-UBND ban hành ngày 23/7/2019. Lộ trình này được thiết kế phù hợp với điều kiện thực tế và khả năng thực hiện, tiến hành theo từng giai đoạn, từng khu vực và phân loại tuyến.

1.1.2. Cấu tạo cáp ngầm trung áp

1.1.2.1. Cấu tạo cơ bản của cáp ngầm trung áp

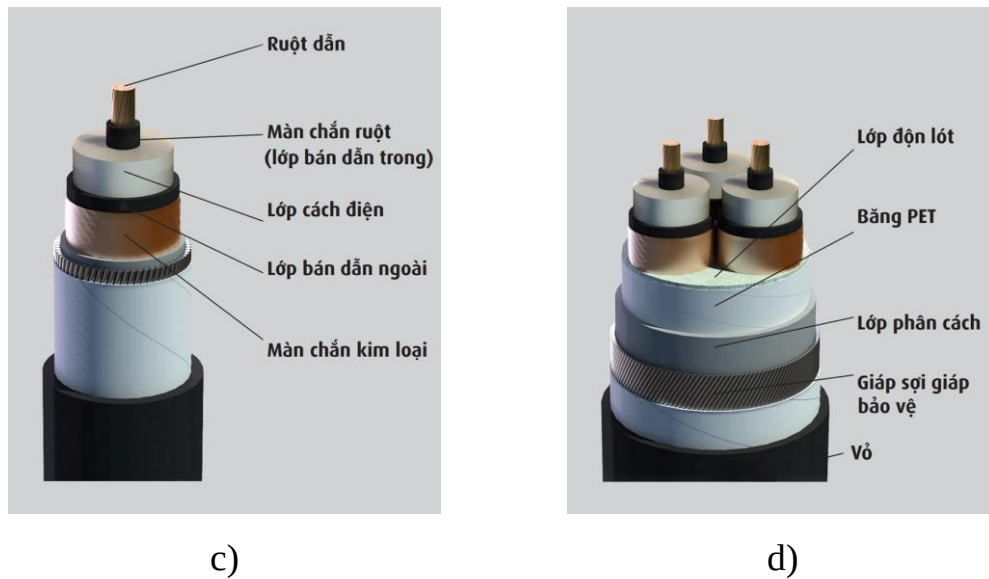
Cấu tạo của mẫu cáp ngầm MV điển hình thể hiện trên hình 1.1, bao gồm các hình: 1.1a, 1.1b, 1.1c và 1.1d. Cáp ngầm có nhiều lớp thành phần khác nhau, mỗi lớp này đảm nhiệm một chức năng riêng biệt, nhằm đảm bảo cáp có khả năng cách điện hiệu quả, cung cấp sự bảo vệ toàn diện trước các yếu tố cơ học và môi trường, đồng thời ngăn ngừa các sự cố phát sinh trong quá trình vận hành.



a)



b)



Hình 1.1. Cấu tạo cơ bản của cáp ngầm MV [66]

Cấu tạo cơ bản của cáp ngầm MV một lõi thường bao gồm các thành phần chính sau:

- Ruột dẫn: dẫn điện từ nguồn cung cấp đến các thiết bị sử dụng. Thường được làm bằng đồng hoặc nhôm để đảm bảo hiệu suất dẫn điện cao và khả năng chịu tải. Đồng được ưa chuộng hơn nhờ khả năng dẫn điện tốt hơn, mặc dù nhôm lại nhẹ hơn và rẻ hơn. Ruột dẫn có thể được tạo thành dưới dạng sợi bện hoặc lõi rắn tùy thuộc vào yêu cầu về độ dẻo dai và khả năng chịu tải. Trong phần lớn các hệ thống cáp MV, ruột dẫn được thiết kế với mục đích giảm thiểu sự thất thoát năng lượng và có khả năng chống chịu cơ học cao.

- Lớp bán dẫn trong: đặt giữa ruột dẫn và lớp cách điện nhằm kiểm soát điện trường, ngăn chặn sự tập trung điện trường cục bộ gây ra các hiện tượng phóng điện corona, một hiện tượng nguy hiểm có thể gây ra suy giảm độ bền của cáp. Lớp bán dẫn trong cũng giúp liên kết chặt chẽ giữa lõi dẫn điện và lớp cách điện, hạn chế khe hở và cải thiện khả năng cách điện.

- Lớp cách điện: là lớp quan trọng nhất của cáp ngầm, làm nhiệm vụ cách ly điện giữa ruột dẫn và môi trường xung quanh. Vật liệu phổ biến nhất

hiện nay là XLPE, có khả năng chịu nhiệt cao (lên tới 90 °C khi hoạt động bình thường và 250 °C trong trường hợp quá tải ngắn hạn) và khả năng chịu lực tác động tốt [34]. Bên cạnh XLPE, một số hệ thống cáp ngầm MV còn sử dụng vật liệu EPR, đặc biệt trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt như môi trường hóa chất hoặc dưới nước.

- Lớp bán dẫn ngoài: đặt bao quanh lớp cách điện chính, hoạt động tương tự như lớp bán dẫn trong, giúp phân bố điện trường đều trên bề mặt của lớp cách điện và bảo vệ lớp cách điện khỏi các tác động bên ngoài. Hợp chất bán dẫn ngoài cũng giúp giảm thiểu sự tích tụ điện áp trên bề mặt lớp cách điện, đồng thời hỗ trợ trong việc ngăn ngừa hiện tượng PD và bảo vệ cáp khỏi hư hỏng.

- Màn chắn kim loại: là lớp băng hoặc dây đồng (hoặc nhôm) quấn xung quanh lớp cách điện, giúp kiểm soát điện trường bên trong cáp và bảo vệ cáp khỏi các xung điện do sự cố trong hệ thống. Ngoài ra, lớp chắn này cũng hoạt động như một đường dẫn cho dòng sự cố trở về hệ thống nối đất.

- Vỏ bọc ngoài: làm từ nhựa PVC, PE hoặc polyetylen mật độ cao (HDPE), có nhiệm vụ bảo vệ toàn bộ cấu trúc cáp khỏi các yếu tố môi trường xung quanh như độ ẩm, hóa chất, tác động cơ học và cháy nổ. Đặc biệt, lớp vỏ này được thiết kế để có khả năng chống tia cực tím phát ra từ ánh sáng mặt trời.

Cấu tạo cơ bản của cáp ngầm MV ba lõi bao gồm một số lớp vật liệu chính tương tự như cáp ngầm một lõi, nhưng được bổ sung thêm các lớp sau để tăng cường khả năng bảo vệ và cải thiện hiệu suất vận hành:

- Băng chống thấm: có chức năng ngăn ngừa nước xâm nhập dọc theo chiều dài cáp, bảo vệ cáp khỏi bị hiện tượng ẩm, giúp giảm nguy cơ hỏng hóc và sự cố cách điện.

– Lớp độn lót: sử dụng để làm kín khoảng trống giữa các lõi dẫn và lớp bảo vệ bên ngoài. Lớp độn lót có thể được làm từ sợi polypropylen hoặc vật liệu tổng hợp khác, giúp tăng cường cấu trúc và tăng độ bền cơ học của cáp, đồng thời đảm bảo các lõi dẫn được giữ cố định, hạn chế nguy cơ gây hư hỏng trong quá trình vận chuyển và lắp đặt.

– Băng liên kết: có chức năng giữ cố định các thành phần bên trong cáp, đặc biệt là ba lõi dẫn và lớp độn. Việc cố định này ngăn ngừa sự trượt lệch hoặc lỏng lẻo khi thực hiện việc chuyển dờ hoặc thi công, đồng thời giữ toàn bộ cấu trúc cáp được sắp xếp một cách chắc chắn.

– Lớp phân cách: sử dụng để tạo ra khoảng cách giữa băng liên kết và lớp giáp sợi thép, nhằm làm giảm lực ma sát, ngăn chặn nguy cơ hỏng hóc do va đập.

– Giáp sợi thép: cung cấp khả năng bảo vệ cơ học cho cáp, chống chịu các tác động như uốn cong, kéo hoặc áp lực nén ép. Lớp giáp sợi thép được thiết kế xoắn quanh cáp, có nhiệm vụ bảo vệ các lớp bên trong cáp khỏi các yếu tố môi trường khắc nghiệt.

– Băng vải sau lớp giáp sợi thép: đặt bên ngoài lớp giáp sợi thép nhằm bảo vệ giáp khỏi bị ăn mòn hoặc hỏng hóc từ các yếu tố môi trường. Có chức năng duy trì sự ổn định của lớp giáp và giảm ma sát khi cáp được kéo hoặc uốn cong.

Tổng kết lại, các thành phần chính của cáp ngầm MV và chức năng tương ứng của mỗi lớp vật liệu được tóm tắt trong bảng 1.2:

Bảng 1.2. Tóm tắt các thành phần chính của cáp

STT	Danh mục	Chức năng	Thành phần
1	Lõi dẫn	- Mang dòng điện trong	- Dạng xoắn ép chặt hoặc

		ba điều kiện chính: vận hành bình thường, vận hành quá tải và vận hành trong tình huống ngắn mạch - Có khả năng chịu tác động của lực kéo trong quá trình lắp đặt cáp	dạng kết cấu đặc, một số thiết kế cáp ba lõi có lõi dẫn hình quạt: + $S < 1000 \text{ mm}^2$ (đồng hoặc nhôm), lõi dẫn xoắn tròn ép chặt + $S < 400 \text{ mm}^2$ (nhôm), lõi dẫn tròn đặc - Phần khe hở giữa các sợi dẫn được điền đầy bằng hợp chất bán dẫn theo chiều dọc của cáp - Áp dụng tiêu chuẩn IEC 60228 cho lõi cáp
2	Lớp bán dẫn trong bọc lõi dẫn	- Ngăn chặn sự tập trung của điện trường tại giao diện giữa lớp cách điện và lõi dẫn bên trong - Đảm bảo tiếp xúc chặt chẽ với cách điện, làm mịn điện trường tại lõi dẫn	- Hợp chất bán dẫn - Ép đùn đồng thời với lớp cách điện (3) và lớp bán dẫn ngoài (4)
3	Lớp cách điện	- Có khả năng chống chịu các ứng suất điện trường khác nhau ở các mức điện áp trong suốt vòng đời hoạt động của	- XLPE là loại vật liệu được sử dụng phổ biến làm vật liệu cách điện do có nhiều ưu điểm nổi bật - Chế tạo bằng kỹ thuật ép

		cáp	đùn
4	Lớp bán dẫn ngoài bọc cách điện	- Đảm bảo sự tiếp xúc chặt chẽ giữa cách điện và màn chắn - Ngăn chặn sự tập trung điện trường tại giao diện giữa cách điện và lớp màn chắn kim loại - Giảm nguy cơ ion hóa trên bề mặt lớp cách điện	- Hợp chất bán dẫn - Ép đùn đồng thời với lớp bán dẫn trong (2) và lớp cách điện (3) - Đôi khi, một lớp băng quăn cùng tính chất có thể được bổ sung
5	Màn chắn kim loại	- Cung cấp: + Màn chắn điện (không có điện trường bên ngoài cáp) + Chống thấm xuyên tâm (để tránh tiếp xúc giữa cách điện và nước) + Tạo lõi dẫn chủ động cho dòng điện ngăn mạch điện dung và dòng ngắn mạch không thứ tự + Góp phần bảo vệ cơ học	- Thường được sản xuất bằng vật liệu đồng tôi luyện, hoặc nhôm - Dạng sợi hoặc dạng băng
6	Vỏ bọc ngoài	- Cách ly cấu trúc cáp khỏi môi trường xung quanh - Góp phần bảo vệ cơ	- Làm bằng vật liệu PVC, PE hoặc HDPE - Có thể phủ thêm một lớp vật liệu bền nhiệt, giúp tăng khả

		học	năng chịu nhiệt và hạn chế nguy cơ bắt lửa
--	--	-----	--

1.1.2.2. Phân loại

Cáp ngầm MV được phân loại theo nhiều tiêu chí, chủ yếu dựa trên các yếu tố như cấu tạo, tính chất vật liệu cách điện, tiêu chuẩn thử nghiệm và ứng dụng thực tiễn:

a) Phân loại theo cấu tạo và số lõi dẫn điện

- Cáp ngầm MV một lõi: chỉ có một lõi dẫn điện, có khả năng dẫn điện mạnh và thích hợp cho các hệ thống điện đơn pha, thường lắp đặt trong các công trình lớn.

- Cáp ngầm MV ba lõi: gồm ba lõi dẫn, phục vụ cho hệ thống điện ba pha thông dụng, giảm thiểu nhiễu điện từ nhờ cách bố trí ba lõi và được áp dụng rộng rãi trong các hệ thống phân phối điện MV.

b) Phân loại theo vật liệu cách điện

Các vật liệu cách điện đóng vai trò quan trọng trong tính năng chịu nhiệt, cách điện và độ bền của cáp. Các loại phổ biến nhất bao gồm:

- Cáp cách điện XLPE: cáp XLPE có khả năng cách điện tốt, chịu nhiệt lên đến 90 °C và bền bỉ dưới tác động của môi trường. Nhờ tính chất vật lý ổn định, cáp XLPE thường xuất hiện trong các hệ thống truyền tải MV và cao áp.

- Cáp cách điện EPR: vật liệu cao su tổng hợp EPR có đặc tính linh hoạt và chống chịu với các hóa chất, dầu và độ ẩm, phù hợp với môi trường có yếu tố ăn mòn cao. Chịu nhiệt cao (lên đến 90 – 95 °C), chống chịu tốt với các môi trường có độ ẩm cao, hóa chất.

- Cáp cách điện PVC: đây là loại cáp sử dụng vật liệu PVC để cách điện. Khả năng chịu nhiệt và độ bền vật lý của PVC kém hơn. Chi phí thấp, dễ gia công và phù hợp cho các dự án không đòi hỏi tính năng cao.

c) Phân loại theo lớp giáp bảo vệ

Lớp giáp bảo vệ cần được trang bị khi cáp ngầm có nguy cơ tổn hại cơ học, bao gồm hai loại lớp giáp chính:

- Cáp có giáp kim loại: được trang bị lớp giáp kim loại bằng thép hoặc nhôm, giúp tăng khả năng chống chịu cơ học, thường dùng trong các môi trường khắc nghiệt hoặc chôn trực tiếp dưới đất.

- Cáp không giáp: thường được bảo vệ thêm bằng ống cáp PVC hoặc ống thép, phù hợp với môi trường ít tác động cơ học hoặc lắp đặt trong hệ thống có bảo vệ riêng biệt.

d) Phân loại theo tiêu chuẩn kỹ thuật và cấp điện áp

Cáp ngầm MV được sản xuất và thử nghiệm theo các tiêu chuẩn khắt khe, nhờ vậy cung cấp chất lượng cáp có độ tin cậy cao, đồng thời đảm bảo an toàn cho hệ thống điện:

- Theo “tiêu chuẩn IEC 60502-2”;
- Theo “tiêu chuẩn TCVN 5935-2”;
- Theo “tiêu chuẩn IEEE”, “tiêu chuẩn American Society for Testing and Materials (ASTM)”, ...

e) Phân loại theo ứng dụng thực tế

- Cáp ngầm MV cho hệ thống điện công nghiệp: phục vụ cho các nhà máy, khu công nghiệp, đảm bảo phân phối điện ổn định và không rủi ro cho các thiết bị có công suất lớn.

- Cáp ngầm MV đô thị: thiết kế phù hợp cho các địa bàn đông người dân sinh sống, với các yêu cầu thẩm mỹ và an toàn điện từ.

1.1.3. Ứng dụng

Cáp ngầm MV có tầm ảnh hưởng đáng kể trong mạng lưới truyền tải và phân phối điện:

- Ứng dụng trong hệ thống điện đô thị: tại các thành phố lớn, việc sử dụng cáp ngầm giúp giảm thiểu rủi ro sự cố điện do thời tiết (gió, bão) và cải thiện mỹ quan đô thị bằng cách loại bỏ các đường dây điện trên không. Điều này cũng giúp bảo vệ hệ thống điện khỏi sự va chạm của phương tiện giao thông hay sự phát triển của cây xanh.

- Ứng dụng công nghiệp của cáp MV: áp dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực công nghiệp khác nhau do khả năng xử lý điện áp cao hơn và truyền tải điện hiệu quả. Một số ứng dụng công nghiệp chính bao gồm:

- + Phân phối điện trong nhà máy và xí nghiệp: trong các cơ sở công nghiệp lớn, sử dụng cáp MV để phân phối điện đến các bộ phận khác nhau của cơ sở. Những loại cáp này xử lý phụ tải cao hơn cần thiết để vận hành máy móc và thiết bị tải nặng, đảm bảo cung cấp điện nhất quán và hiệu quả trên toàn bộ địa điểm.

- + Hệ thống năng lượng tái tạo: xuất hiện trong các dự án lớn như trang trại gió, nhà máy điện mặt trời và các cơ sở thủy điện. Kết nối các đơn vị phát điện với lưới điện chính, giúp truyền điện từ các nguồn tái tạo đến người dùng cuối hoặc hệ thống lưu trữ.

- + Trạm biến áp tiện ích: kết nối các trạm biến áp với lưới điện chính. Những loại cáp này truyền điện ở mức điện áp MV, đảm bảo năng lượng

được phân phối hiệu quả đến người dùng dân dụng, giao thương và công nghiệp.

+ Lĩnh vực khai thác: sử dụng cáp MV để cấp điện cho thiết bị và máy móc như máy khoan, băng tải và nhà máy chế biến. Những loại cáp này đảm bảo nguồn điện đáng tin cậy ở những vùng xa xôi, vị trí địa lý khó tiếp cận với cơ sở hạ tầng điện truyền thống.

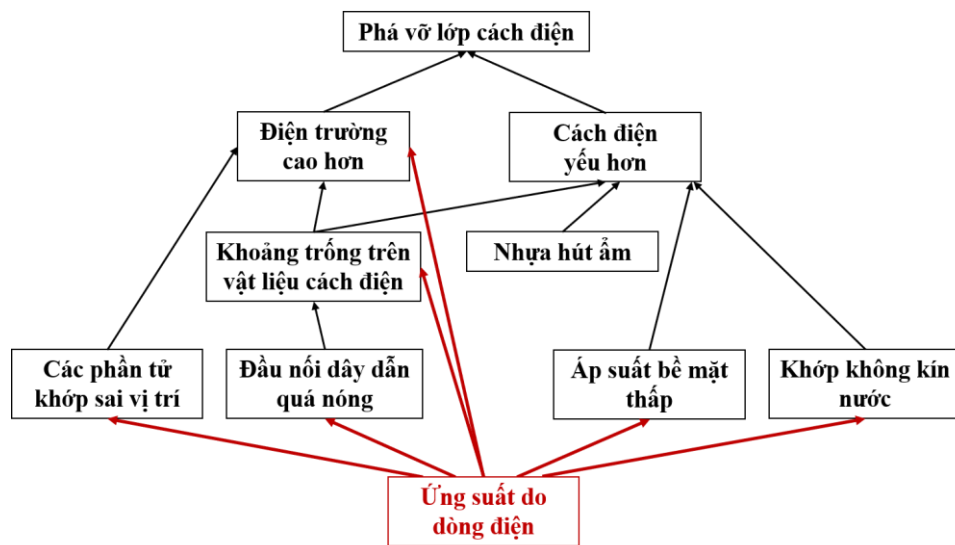
1.2. CÁC NGUYÊN NHÂN DẪN ĐẾN SỰ CỐ CỦA CÁP NGẦM VÀ MỐI NỐI CÁP NGẦM TRUNG ÁP

Sự cố trên đường dây cáp ngầm MV xảy ra thường phát sinh từ các yếu tố khách quan và yếu tố chủ quan. Nguyên nhân khách quan thường bao gồm các tác động từ môi trường tự nhiên, các điều kiện vật lý, sai sót kỹ thuật hoặc hạn chế trong quy trình bảo dưỡng, bảo trì. Các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão, đông sét, động đất, sạt lở có thể làm tổn hại cấu trúc của cáp ngầm, đặc biệt là tại các điểm mối nối trên đường dây. Đối với môi trường có độ ẩm cao, cáp ngầm dễ bị ảnh hưởng bởi quá trình oxy hóa, gây suy giảm độ bền hoặc làm giảm chất lượng cáp. Hơn nữa, sự tiếp xúc với các chất ăn mòn có thể làm suy yếu vật liệu cách điện của cáp.

Nguyên nhân chủ quan bao gồm các lỗi phát sinh từ quá trình lắp đặt và vận hành. Việc thi công lắp đặt không đảm bảo có thể dẫn đến áp lực không đồng đều tại mối nối, hình thành các khuyết tật hoặc lỗ rỗng bên trong vật liệu cách điện. Ngoài ra, sự sai sót trong vận hành hoặc ảnh hưởng từ các thiết bị điện khác trong hệ thống có thể làm phát sinh các sự cố trên đường dây cáp ngầm MV. Việc nhận diện và hiểu rõ các nguyên nhân này là nền tảng thiết yếu để thiết lập các biện pháp phòng ngừa và cải thiện độ tin cậy của hệ thống cáp.

1.2.1. Dòng tải cao

Dòng tải cao là một trong những tác nhân chính gây ra sự cố cáp ngầm MV, gây ra các hiện tượng như quá nhiệt, suy giảm cách điện và tổn hại đặc tính điện môi. Ứng suất do dòng tải cao, là lực điện động và lực nhiệt động, sẽ tác động trực tiếp lên đường dây cáp. Các ứng suất này tạo ra nhiều hệ quả tiêu cực đối với cấu trúc cách điện của cáp ngầm MV, dẫn tới các vấn đề phát sinh được mô tả trong hình 1.2. Dòng tải cao làm tăng điện trường cục bộ bên trong vật liệu cách điện, kết hợp với trạng thái yếu dần của lớp cách điện, sự cố phá vỡ lớp cách điện sẽ xảy ra. Do đó, việc kiểm soát dòng tải và đảm bảo cáp hoạt động trong điều kiện cho phép có vai trò then chốt để duy trì độ bền và độ an toàn của hệ thống cáp ngầm.



Hình 1.2. Dòng tải cao và chu kỳ dòng điện tác động tàn phá đường dây

Khi cáp ngầm chịu tải dòng điện cao, nhiệt lượng sinh ra tăng theo định luật Joule, tỷ lệ thuận với bình phương của cường độ dòng điện, do vậy với dòng điện càng cao, nhiệt độ sinh ra càng lớn.

Bên cạnh đó, dòng tải cao vượt ngưỡng cho phép kéo dài, sẽ tạo ra áp lực cơ học lớn lên vật liệu cách điện. Khi dòng tải quá cao, nhiệt độ và áp lực

vượt quá giới hạn cho phép, vật liệu lớp cách điện có thể bị biến dạng hoặc nóng chảy, gây ra sự phá vỡ cơ học [6]. Khi đó, lớp cách điện không còn khả năng bảo vệ lõi dẫn khỏi các yếu tố môi trường xung quanh, dẫn đến sự tiếp xúc giữa các pha hoặc giữa pha với đất, gây ra hiện tượng ngắn mạch hoặc các sự cố nghiêm trọng khác.

1.2.2. Nhiệt độ

Nhiệt độ là một trong những tác nhân chính tiếp theo gây ra sự cố trong hệ thống cáp ngầm MV do các tác động lão hóa nhiệt, sự gia tăng PD, giãn nở nhiệt. Quá trình lão hóa và suy giảm cách điện do nhiệt độ cao có thể diễn ra một cách âm thầm nhưng nhanh chóng dẫn đến sự cố nặng nề nếu không được sớm phát hiện và kịp thời ứng phó. Việc kiểm soát nhiệt độ và giảm thiểu các yếu tố gây nhiệt quá mức trong quá trình vận hành cáp giúp đảm bảo kéo dài tuổi thọ và duy trì độ bền của hệ thống cáp ngầm MV.

Một trong những vấn đề điển hình khi cáp ngầm hoạt động trong điều kiện nhiệt độ cao là sự giãn nở nhiệt không đồng đều giữa các thành phần khác nhau trong cấu trúc cáp. Khi cáp vận hành dưới điều kiện này, lõi dẫn điện thường là vật liệu đồng hoặc nhôm, có hệ số giãn nở nhiệt lớn hơn nhiều so với lớp cách điện polyme. Điều này dẫn đến sự hình thành các khoảng trống vi mô tại giao diện giữa lõi và lớp cách điện, các lỗ rỗng và vết nứt dễ dàng trở thành nơi tập trung điện trường cục bộ, gây ra hiện tượng PD. Theo nghiên cứu của Li và cộng sự (2024), nhiệt độ cao làm giảm độ bền điện môi của vật liệu, dẫn đến tăng cường độ của PD, gây ra phá hủy vi mô trong lớp cách điện [48]. Hiện tượng này đặc biệt nguy hiểm trong môi trường vận hành có nhiệt độ cao, điện trường phân bố không đồng đều trong vật liệu polyme do quá trình giải phóng điện tích không gian diễn ra nhanh hơn, làm tăng khả năng hình thành các khuyết tật vi mô như cây điện. Cây điện phát triển nhanh

hơn dưới sự kích thích của sự gia tăng nhiệt độ, gây ra suy giảm đặc tính cách điện, giảm tuổi thọ của cáp và có thể dẫn đến hỏng hóc khi chịu điện áp cao trong thời gian dài [67]. Do đó, việc giám sát nhiệt độ cách điện cáp góp phần cho sự phân bố điện trường đồng đều xung quanh cáp.

Tác động lớn nhất của nhiệt độ lên cáp ngầm MV là quá tải nhiệt, dẫn đến hiện tượng lão hóa nhiệt. Lão hóa nhiệt là một quá trình trọng yếu xảy ra trong cáp ngầm MV khi cáp vận hành dưới ứng suất nhiệt độ cao kéo dài. Nhiệt độ có tác động trực tiếp đến các đặc tính của vật liệu cách điện, đặc biệt với các loại vật liệu polyme như XLPE và EPR, là hai loại vật liệu thường xuyên được sử dụng trong cáp ngầm MV. Khi nhiệt độ vượt ngoài ngưỡng giới hạn nhiệt độ cho phép của cáp trong khoảng thời gian dài, sẽ dẫn đến sự gia tăng tốc độ lão hóa của vật liệu. Đặc biệt, quá trình oxy hóa nhiệt dẫn đến sự phân hủy cấu trúc polyme, gây ra các biến đổi trong tính chất cơ học và điện môi của vật liệu [28]. Theo nghiên cứu của Liang và cộng sự (2023), ở nhiệt độ trên 90 °C, sự phân cắt các chuỗi polyme bắt đầu xảy ra nhanh chóng, làm giảm tính đàn hồi và cường độ cách điện của lớp XLPE [49]. Các phản ứng oxy hóa cũng diễn ra ở nhiệt độ cao, làm gia tăng quá trình lão hóa và phá hủy hóa học của vật liệu [49]. Thêm vào đó, theo nghiên cứu của Boukezzi và cộng sự (2018), quá trình lão hóa nhiệt làm giảm điện trở suất của vật liệu cách điện. Khi điện trở suất giảm, khả năng cách điện của vật liệu suy yếu, dễ dẫn đến hiện tượng PD hoặc phá vỡ cách điện trong điều kiện dòng tải cao [13]. Sự suy giảm hiệu quả cách điện trực tiếp làm tăng nguy cơ sự cố toàn hệ thống.

Thêm vào đó, nhiệt độ cao gây suy giảm tính chất vật lý và tính chất hóa học của vật liệu polyme, làm thay đổi cấu trúc vi mô lớp cách điện. Theo đó, vật liệu cách điện trở nên giòn hơn, dễ bị nứt hoặc gãy khi gặp các tác động cơ học. Polyme cũng có thể trở nên mềm và dễ biến dạng ở nhiệt độ cao, dẫn

đến sự giảm sút khả năng chịu lực của cáp, đặc biệt các ứng dụng mà cáp chịu đồng thời áp suất từ đất đá hoặc các yếu tố tự nhiên xung quanh. Ngoài ra, các lỗ rỗng và khoảng trống xuất hiện trong vật liệu cách điện, có tốc độ hình thành và mở rộng tăng nhanh hơn ở nhiệt độ cao, kết hợp với điện trường mạnh góp phần thúc đẩy quá trình ion hóa và hình thành PD.

1.2.3. Phóng điện cục bộ

PD là hiện tượng đánh thủng cục bộ, tạo ra dòng điện nhất thời trong phạm vi từ nano đến micro giây, và nối tắt một phần điện môi [24], [32]. PD thường xảy ra tại những vùng khiếm khuyết xuất hiện trên vật liệu cách điện như các lỗ rỗng nhỏ hoặc các bề mặt không đồng nhất. Những vị trí này tồn tại điện trường cục bộ tập trung cao hơn so với các khu vực lân cận, và có cường độ vượt quá giới hạn đánh thủng điện môi của vật liệu cách điện.

Trong quá trình vận hành của cáp ngầm MV, hệ thống phải chịu sự tác động của các yếu tố như dòng điện lớn, nhiệt độ cao, môi trường khắc nghiệt và ứng suất cơ học. Sự kết hợp giữa các yếu tố này có thể làm tăng kích thước các lỗ rỗng và gây ra sự không đồng nhất trong điện trường, góp phần gây nên hiện tượng suy giảm cách điện và tăng nguy cơ xuất hiện PD [52]. Hơn nữa, vật liệu cách điện có thể bị suy yếu do các yếu tố như khuyết tật sản xuất, tạp chất hoặc các lỗ rỗng. Các yếu tố này có thể xuất hiện trong suốt quá trình sản xuất và lắp đặt cáp, làm tăng khả năng phát sinh PD khi cáp hoạt động dưới điện áp cao [24]. PD là hệ quả của quá trình tích lũy điện tích trong vật liệu cách điện, bao gồm các electron tự do và lỗ trống. Các hạt mang điện này, khi đặt dưới tác động đủ lớn của điện trường, sẽ bắt đầu dịch chuyển và tạo ra dòng điện cục bộ, gây nên hiện tượng PD. Hiện tượng PD trong cáp ngầm MV có thể được phân loại thành phóng điện vàng quang, phóng điện bề mặt,

phóng điện bên trong và phóng điện theo cây điện, tùy thuộc vào vị trí của hiện tượng [60].

Mặc dù PD không ngay lập tức gây ra sự cố toàn phần trên hệ thống điện, nhưng nếu hiện tượng này kéo dài mà không được xử lý, sẽ làm giảm dần chất lượng của vật liệu cách điện, đồng thời làm tăng nguy cơ sự cố nghiêm trọng, đặc biệt trong các hệ thống cáp ngầm MV. Khi quá trình PD bắt đầu, thuộc tính vật liệu cách điện sẽ dần dần bị suy giảm. Điều này tiếp tục gây ra các vết nứt, rạn và hiện tượng bất thường trong lớp cách điện xung quanh, cuối cùng dẫn đến sự hỏng hóc hoàn toàn của cách điện [11], [59], [62]. Theo nghiên cứu của Li và cộng sự (2024), PD không chỉ phá vỡ các liên kết hóa học trong vật liệu cách điện mà còn tạo ra nhiệt cục bộ, làm tăng nhiệt độ xung quanh điểm phóng điện, kết quả là quá trình hư hỏng trở nên nhanh chóng hơn [48]. Mặt khác, hoạt động liên tục của PD làm xuất hiện các tổn thương vật lý và hóa học trong lớp cách điện, tạo điều kiện cho sự hình thành cây điện - một quá trình lão hóa dẫn đến sự đánh thủng cục bộ lớp cách điện [15]. Cây điện là những đường dẫn điện hình thành bên trong vật liệu cách điện dưới tác động của PD. Cây điện phát triển đủ lớn có thể tạo liên kết giữa các vùng có điện cực khác nhau, dẫn đến đánh thủng lớp cách điện của cáp, gây ra sự cố ngắn mạch và hỏng hóc hệ thống cáp [15].

PD không chỉ ảnh hưởng đến tuổi thọ của cáp mà còn gây ra những tác động tiêu cực đến hiệu suất truyền tải điện năng. Quá trình PD làm phát sinh nhiễu điện từ và tạo ra các dạng sóng bất thường, gây trở ngại trong việc duy trì hiệu suất truyền tải điện năng ổn định của hệ thống. Nhiễu điện từ này cũng có thể gây ra hiện tượng sóng hài hoặc nhiễu tín hiệu, ảnh hưởng đến các thiết bị điện tử nhạy cảm trong hệ thống [45]. Bên cạnh các hệ quả trực tiếp, PD còn có thể dẫn đến suy giảm điều kiện vận hành của mạng lưới cáp. Khi PD xảy ra trong khoảng thời gian kéo dài, sẽ gây tổn hại vật lý, tạo ra các

chế phẩm phụ độc hại, bao gồm các hợp chất như ozon và các axit mạnh. Các hợp chất này làm giảm chất lượng cách điện, đồng thời có thể tác động đến môi trường xung quanh, gây ảnh hưởng xấu đến sức khỏe của con người và động thực vật [16], [22]. Đặc biệt, trong các môi trường đô thị hoặc khu vực công nghiệp, sự tích tụ của các sản phẩm phụ này có thể gây ô nhiễm môi trường. Theo đó, cần đưa ra các biện pháp xử lý hiệu quả để bảo vệ sức khỏe cộng đồng.

1.2.4. Sự lão hóa của vật liệu cách điện

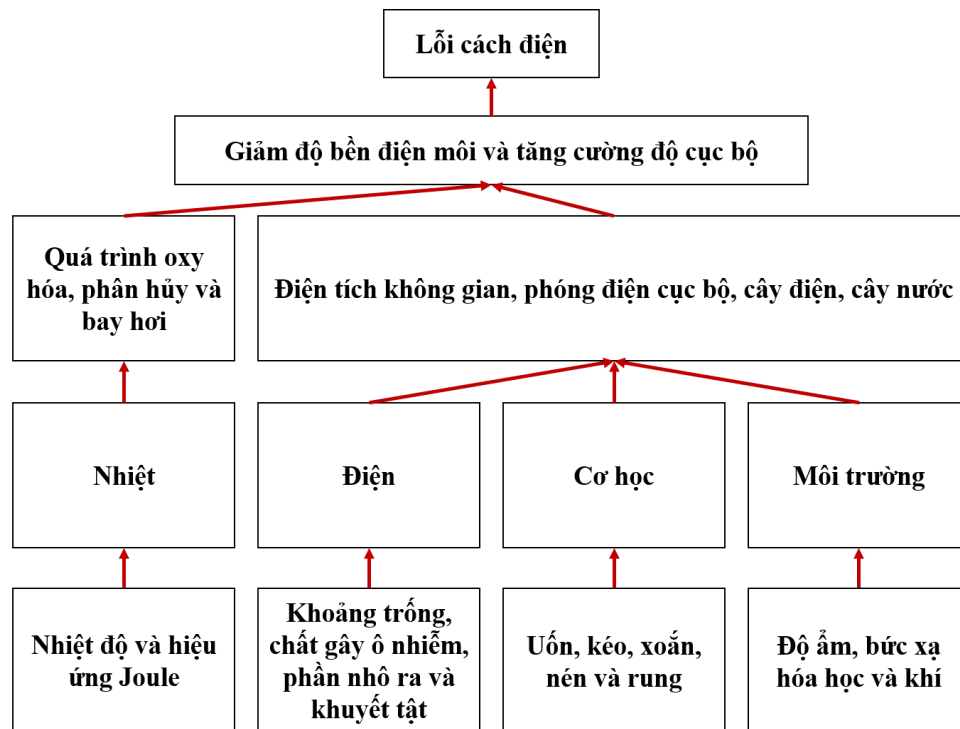
Sự lão hóa của cách điện gây ra việc giảm tuổi thọ hoạt động của các bộ phận nguồn. Ngoài sự lão hóa thường xuyên, sự xuất hiện của ứng suất không bình thường và sự phát triển của các khuyết tật đều đe dọa nghiêm trọng, do các ứng suất thúc đẩy sự gia tăng tốc độ lão hóa và dẫn đến sự hỏng hóc. Lão hóa cách điện là một vấn đề tiềm ẩn ở tất cả các loại thành phần nguồn [25]. Các lỗ trống, khuyết tật và vị trí lỗi lốm trên vật liệu, dưới tác động của ứng suất nhiệt và điện sẽ gây ra tác động đáng kể đến quá trình lão hóa cách điện [19]. Sự suy giảm của vật liệu cách nhiệt thay đổi tùy theo thành phần hóa học, nguồn gốc, khả năng chịu nhiệt và trạng thái vật lý.

Ngoài tác động của yếu tố nhiệt và điện, các yếu tố cơ học cũng đóng vai trò quan trọng trong quá trình lão hóa của vật liệu cách điện. Trong quá trình lắp đặt và vận hành, cáp ngầm thường phải chịu các lực kéo, uốn, xoắn và rung động. Những tác động này có thể gây ra các vết nứt vi mô hoặc làm biến dạng cấu trúc vật liệu, dẫn đến làm giảm khả năng chịu đựng của cáp đối với các yếu tố khác như nhiệt và điện. Sự lão hóa cơ học xảy ra khi vật liệu cách điện mất đi độ dẻo dai và trở nên giòn hơn theo thời gian. Các tác động cơ học lặp đi lặp lại có thể tạo ra các vùng ứng suất cao trong vật liệu, dẫn đến sự hình thành và phát triển các vết nứt. Khi vết nứt này lớn lên, sẽ tạo ra các

đường dẫn điện, làm giảm tính cách điện của cáp và tăng nguy cơ xảy ra sự cố đánh thủng. Hơn nữa, các lực cơ học còn có thể ảnh hưởng đến sự phân bố nhiệt độ và điện trường trong cáp, làm tăng khả năng xuất hiện các điểm nóng và vùng tập trung điện trường cục bộ. Những hiện tượng này không chỉ thúc đẩy quá trình lão hóa mà còn làm tăng nguy cơ xuất hiện các sự cố không mong muốn trong hệ thống cáp ngầm.

Yếu tố môi trường, đặc biệt là độ ẩm, chất ô nhiễm, và sự tiếp xúc với bức xạ tia cực tím hoặc hóa chất, có thể làm suy giảm nhanh chóng khả năng cách điện của vật liệu. Độ ẩm là một trong những yếu tố môi trường quan trọng nhất, có khả năng xâm nhập vào vật liệu cách điện và gây ra hiện tượng cây nước [54]. Cây nước là các kênh dẫn điện hình thành do sự tương tác giữa phân tử nước và điện trường, làm giảm độ bền cách điện và tăng nguy cơ đánh thủng. Ngoài ra, các chất ô nhiễm hóa học hoặc khí ăn mòn cũng có thể xâm nhập vào cáp ngầm qua các điểm kết nối hoặc hư hỏng cơ học, làm tăng tốc độ lão hóa của vật liệu cách điện. Những chất này không chỉ làm suy giảm độ bền điện môi mà còn gây ra các phản ứng hóa học có hại, làm giảm tính chất vật lý và hóa học của vật liệu. Bức xạ tia cực tím và các tác nhân hóa học khác từ môi trường cũng có thể phá vỡ các liên kết hóa học trong vật liệu cách điện, làm giảm tuổi thọ của cáp ngầm.

Sự suy giảm cách điện chủ yếu là do sự kết hợp của các ứng suất khác nhau, thể hiện trên hình 1.3, trong đó sự kết hợp giữa ứng suất nhiệt và ứng suất cơ là đáng chú ý hơn. Các yếu tố vận hành, vật lý và môi trường có thể dẫn đến những tác động xấu đi và gây ra sự lão hóa bổ sung [70]. Kết quả của các cơ chế lão hóa này là thuộc tính của vật liệu bị suy giảm và độ cách điện giảm ở mức cục bộ, dần dần lan rộng qua lớp cách điện giữa các phần dẫn điện. Cuối cùng, gây ra sự phá vỡ lớp cách điện do suy giảm độ bền điện môi kết hợp với gia tăng cường độ cục bộ các ứng suất.



Hình 1.3. Sự lão hóa của vật liệu cách điện

1.3. CÁC GIẢI PHÁP GIÁM SÁT CÁP NGẦM TRUNG ÁP

Hiện tại, trong và ngoài nước đã và đang nghiên cứu ứng dụng nhiều phương pháp giám sát cáp ngầm tại chỗ hoặc ngoài hiện trường, bằng các thử nghiệm trực tuyến hoặc ngoại tuyến, điển hình như phương pháp giám sát dòng rò, giám sát nhiệt độ, phương pháp điện áp xoay chiều tắt dần, phương pháp điện áp một chiều, phương pháp điện áp xung, phương pháp giám sát PD, ... [39]. Các ứng dụng nhằm phát hiện sớm các hiện tượng bất thường của cáp ngầm, chủ động trong công tác sửa chữa, bảo trì và thay thế cáp ngầm, nhờ vậy làm tăng độ tin cậy của hệ thống.

1.3.1. Thế giới

Trên thế giới, với nền tảng khoa học công nghệ phát triển, các phương pháp giám sát, phát hiện sự cố cáp ngầm đã được nghiên cứu phát triển và đưa vào ứng dụng thực tế.

Một số nước châu Âu đã sớm nghiên cứu, ứng dụng robot tự động để giám sát hệ thống cáp ngầm [35]. Trong giải pháp này, robot được thiết kế với cấu trúc đa phân đoạn, nhằm cải thiện độ ổn định, tính linh hoạt và cho phép mang thêm các cảm biến. Robot di động thu thập thông tin về độ lão hóa của cáp bằng cách sử dụng các cảm biến khác nhau: cảm biến hồng ngoại không tiếp xúc, cảm biến âm thanh phát hiện PD, cảm biến đo đặc tính chất điện môi. Dữ liệu thu thập truyền đến bảng điều khiển, bảng xử lý tín hiệu số giúp thu thập dữ liệu âm thanh tần số cao, xử lý và trả về kết quả cho bảng điều khiển. Kết quả sau xử lý có thể lưu trữ hoặc sử dụng để đưa ra quyết định, xác định hoạt động của robot và các thuật toán điều khiển. Robot cho phép thu thập dữ liệu liên tục và truyền về máy chủ qua kết nối không dây.

Với giải pháp phát hiện lỗi cáp ngầm của Althaf và cộng sự (2013), robot phát hiện lỗi bao gồm bộ phận tạo tín hiệu và bộ phận robot [7]. Mục tiêu cốt lõi của robot là phát hiện ngắn mạch, rất hữu ích để xác định vị trí đứt gãy của cáp ngầm. Một dây dẫn được kết nối với đơn vị tạo tín hiệu, sau đó robot được đặt lên dây cáp bằng mạch điều hướng từ xa. Tín hiệu 3 kHz được truyền qua dây và cũng cung cấp năng lượng cho bộ phận robot. Khi dòng điện bắt đầu di chuyển, theo định luật Faraday, sẽ có một trường điện từ được sinh ra. Nhờ vào khả năng khuếch đại của bộ mạch LM386, điện áp một chiều được tạo ra nhằm cung cấp năng lượng cho chân RA0 của vi điều khiển, và từ đó điều khiển chuyển động của robot. Khi robot di chuyển đến điểm gián đoạn, trường điện từ bằng không, tín hiệu đầu vào tại cổng analog sẽ thấp đáng kể. Khi cường độ tín hiệu đầu vào nhỏ hơn 10, PIC - Dòng vi điều khiển của công ty Microchip Technology và bộ cảm biến HALL được lập trình để báo động đoạn mạch, tính toán khoảng cách di chuyển và hiển thị trên màn hình.

Trong số các hiện tượng hư hỏng, hiện tượng quan trọng nhất là hoạt động PD. PD có thể được coi là dấu hiệu báo trước cho hư hỏng cách điện. Phép đo PD là một công cụ chẩn đoán quan trọng, đặc biệt phổ biến đối với cáp MV và cao áp, nơi cường độ ứng suất điện cục bộ có thể đạt đến giá trị đánh thủng. Trong giải pháp của công ty iPEC (Vương quốc Anh), giám sát cáp ngầm được thực hiện bằng việc lắp đặt cố định các cảm biến chuyên dụng trên mạng lưới để theo dõi liên tục tình trạng cách điện của cáp ngầm mà không làm gián đoạn hoạt động của hệ thống. Hệ thống bao gồm các biến dòng tần số cao (HFCT) để phát hiện tín hiệu PD trong cáp, cảm biến siêu âm phát hiện xung âm và cảm biến điện áp thoáng qua đất (TEV) đo xung điện [21]. Dữ liệu từ các cảm biến này được thu thập, xử lý bằng các thuật toán DeCIFer lọc nhiễu và phân tích, giúp chuẩn hóa các tín hiệu PD. Quá trình giám sát diễn ra tự động và cho phép truy cập từ xa thông qua hệ thống điều khiển giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA) hoặc mạng lưới nội bộ.

Giám sát dòng điện vỏ bọc đã được triển khai bởi công ty AP sensing [10]. Giải pháp giám sát cáp ngầm bao gồm việc sử dụng hệ thống Fiber-based Current Monitoring (FbCM), kết hợp với công nghệ cảm biến âm thanh phân tán (DAS). Công nghệ này tích hợp các biến dòng với bộ chuyển đổi tín hiệu quang học, nhằm theo dõi liên tục, chính xác dòng điện vỏ bọc và cung cấp cảnh báo sớm về các lỗi tiềm ẩn. Hệ thống FbCM đo dòng điện trong vỏ cáp bằng các máy biến dòng cách ly điện, không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ và chuyển đổi dòng đo được thành tín hiệu sợi quang. Các tín hiệu này được phân tích theo thời gian thực bởi hệ thống DAS, cho phép phát hiện sớm các sự cố như tiếp xúc đất ngoài ý muốn, hỏng cách điện, lỗi hộp nối và sự xâm nhập từ bên ngoài (hiện tượng quá độ hoặc sóng hài do máy phát điện gây ra).

Stedin - Nhà điều hành hệ thống phân phối ở Hà Lan, đang áp dụng Smart Cable Guard (SCG) [64]. Hệ thống SCG hoạt động bằng cách triển khai hai cảm biến PD tại hai điểm dọc theo chiều dài của cáp, cho phép ghi lại các xung PD phát sinh từ các điểm hư hỏng trong cáp và xác định vị trí của chúng dựa trên chênh lệch thời gian đến của xung tại mỗi cảm biến. Dữ liệu từ các cảm biến này được truyền liên tục về máy chủ, sau đó hệ thống phân tích sử dụng thuật toán lọc nhiễu để phân biệt xung PD với nhiễu nền, theo đó cung cấp cảnh báo sớm về các điểm có nguy cơ hư hỏng. Bằng cách giám sát trong điều kiện vận hành thực tế, SCG có khả năng phát hiện các hư hỏng phát triển theo thời gian và ghi nhận các yếu tố như nhiệt độ và tải dòng cao có thể làm gia tăng nguy cơ sự cố.

Trong số các phương pháp giám sát trực tuyến cáp khác nhau, giám sát nhiệt độ là phương pháp trực tiếp nhất để phản ánh tình trạng của cáp. Cảm biến nhiệt độ phân tán (DTS) qua sợi quang được sử dụng phổ biến bởi có ưu điểm là chống nhiễu điện từ và nhiễu cơ học cũng như đo liên tục trong không gian, phù hợp để theo dõi nhiệt độ của cáp đường dài. DTS kết hợp với mô hình phần tử hữu hạn đã được nghiên cứu ứng dụng bởi Chen và cộng sự (2021), nhằm giám sát trực tuyến cáp trong đường dây truyền tải điện đường sắt tại Trung Quốc [14]. Trên cơ sở đó, tính toán đặc tính phân bố của trường nhiệt độ của cáp, giúp phát hiện và định vị chính xác các điểm nóng bất thường trong cáp ngầm.

Trên thế giới đã xuất hiện nhiều giải pháp để có thể giám sát, chẩn đoán tình trạng cáp ngầm MV. Tuy nhiên, các giải pháp thường tập trung thu thập vào một yếu tố hoặc một ứng suất nhất định, vì vậy sẽ gặp nhiều hạn chế trong việc giám sát, chẩn đoán toàn diện tình trạng cáp.

1.3.2. Trong nước

Để nâng cao khả năng giám sát các tuyến cáp ngầm cao áp và MV trong các chế độ vận hành, các đơn vị quản lý điện lực trong nước đã ứng dụng một số phương pháp khác nhau nhằm phán đoán trước các nguy cơ dẫn đến sự cố trên đường dây cáp ngầm.

Hệ thống DTS đã được điện lực Đà Nẵng ứng dụng vào giám sát tuyến cáp ngầm nối từ trạm biến áp 110 kV An Đồn đến trạm biến áp 110 kV Cảng Tiên Sa với tổng chiều dài hơn 5 km [1]. DTS là hệ thống quang điện tử đo nhiệt độ dọc theo chiều dài sợi quang cảm biến, dựa trên hiện tượng tán xạ Raman trong sợi quang. Hệ thống này cho phép giám sát liên tục nhiệt độ của tuyến cáp, đồng thời tích hợp với hệ thống SCADA để cảnh báo và xử lý kịp thời các hiện tượng bất thường trong quá trình vận hành, góp phần nâng cao độ an toàn và hiệu quả cho hệ thống cáp ngầm. Hệ thống DTS bao gồm các thành phần chính: máy tính giám sát đặt tại tủ DTS, bộ điều khiển trung tâm, các cảm biến và thiết bị đo lường nội bộ và hệ thống SCADA. Hệ thống DTS cũng được một số đơn vị quản lý lưới điện cao áp sử dụng như: Công ty Truyền tải điện 4 đã triển khai lắp đặt hệ thống trên 4 tuyến cáp ngầm 220 kV thuộc hai đường dây mạch kép Tân Uyên - Long Bình và Tân Uyên - Thủ Đức [5].

Ngoài ra, dựa trên những nghiên cứu và thử nghiệm thành công, Công ty Truyền tải điện 4 đã triển khai công nghệ giám sát từ xa hiện tượng PD và nhiệt độ cho tủ hợp bộ tại trạm biến áp 220 kV Thủ Đức [2]. Bộ xử lý trung tâm gửi tín hiệu điện từ đến các cảm biến thông qua ăng-ten ở các tần số khác nhau. Các cảm biến nhận tín hiệu qua ăng-ten, chuyển đổi thành sóng âm bề mặt để thu thập thông tin nhiệt độ. Các giá trị nhiệt độ và PD thu thập được xử lý, lưu trữ và giám sát thông qua giao diện người máy, hệ thống SCADA

và máy tính, sử dụng các giao thức như Modbus, Ethernet, ... Người vận hành có thể cập nhật dữ liệu để theo dõi, đánh giá và tối ưu hóa phương án vận hành thiết bị theo tình trạng thực tế.

Tại Việt Nam, việc giám sát công trình điện ngầm chưa thực sự được chú trọng mặc dù xuất hiện nhiều sự cố liên quan, đặc biệt trong những khoảng thời gian nắng nóng kéo dài. Hiện tại, các giải pháp giám sát cáp ngầm tự động trong nước xuất hiện với số lượng hạn chế và chủ yếu tập trung giám sát vận hành đường dây cáp cao áp, các giải pháp hiện có này thường không tương thích với hệ thống cáp ngầm MV hiện đang vận hành. Mặt khác, việc nghiên cứu đề cập đến giám sát tình trạng cáp và mối nối cáp MV chưa được quan tâm đúng mức.

1.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG

Trong bối cảnh hiện nay, việc đảm bảo độ tin cậy, an toàn và hiệu quả của hệ thống truyền tải điện năng trở thành yếu tố then chốt, đặc biệt đối với các hệ thống cáp ngầm MV, vốn được ứng dụng rộng rãi trong môi trường đô thị và các khu công nghiệp. Sự cố trên đường dây cáp ngầm xảy ra thường phát sinh từ các yếu tố khách quan và chủ quan, các nguyên nhân chủ yếu bao gồm ứng suất dòng tải cao, nhiệt độ, hiện tượng PD, sự lão hóa của vật liệu cách điện, ...

Quá trình vận hành, sửa chữa và bảo trì đường dây cáp ngầm đòi hỏi sự chú ý đặc biệt, do những thách thức trong việc tiếp cận và kiểm tra hệ thống. Do vậy, điều quan trọng là cần xác định và theo dõi các lỗi phát sinh sớm trước khi dẫn đến sự cố, làm gián đoạn nguồn cung cấp điện. Trên cơ sở đó, giám sát tình trạng của các thành phần trong hệ thống truyền tải điện ngầm MV là một phương pháp thiết yếu để có thể ngăn chặn những hậu quả không mong muốn xảy ra. Các hệ thống giám sát cáp ngầm đã được nghiên cứu và

ứng dụng, tuy nhiên những giải pháp giám sát, chẩn đoán tình trạng cáp còn nhiều hạn chế về số lượng, giá thành và độ tin cậy.

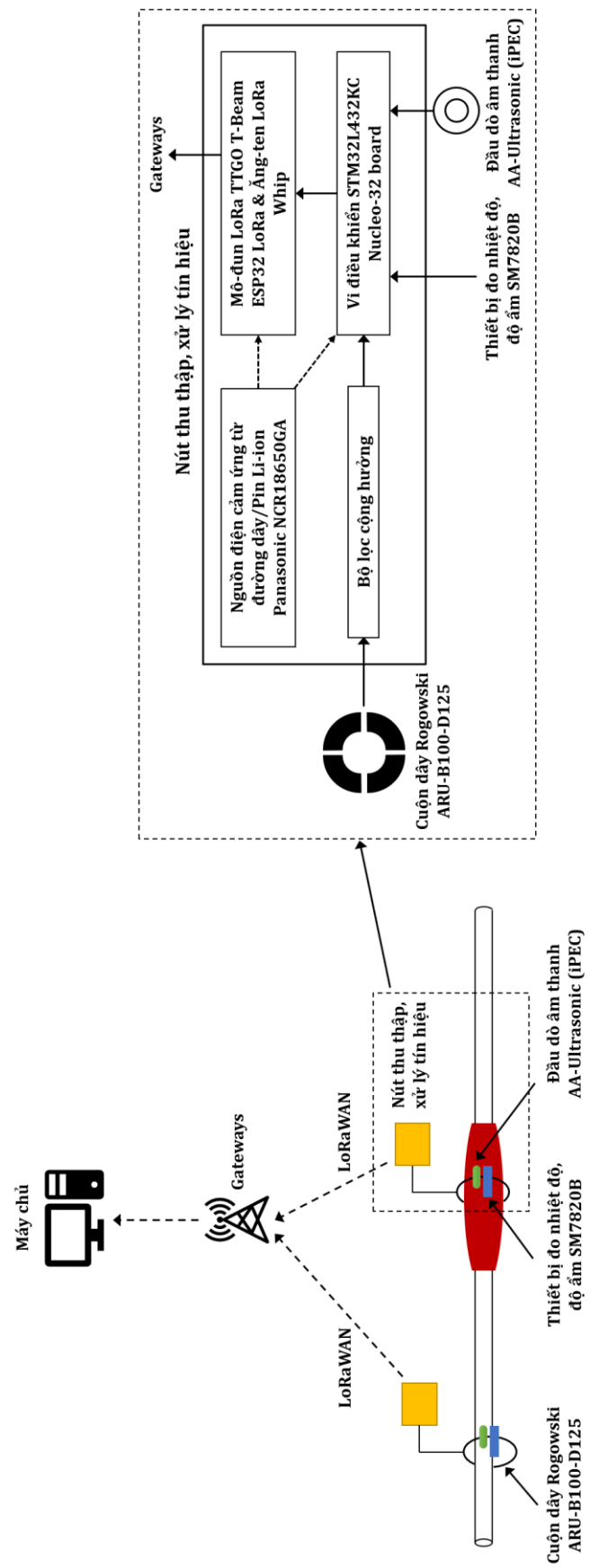
Do đó, nghiên cứu này nhằm đưa ra một giải pháp kỹ thuật kết hợp thiết bị giám sát và mô phỏng để theo dõi và cảnh báo dấu hiệu bất thường cho cáp ngầm MV, đảm bảo khả năng phát hiện các vấn đề tiềm ẩn, từ đó nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ của hệ thống phân phối điện.

CHƯƠNG 2 - ĐỀ XUẤT CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT CÁP NGÀM TỰ ĐỘNG

2.1. CẤU TRÚC CHUNG CỦA HỆ THỐNG ĐỀ XUẤT

Các nguyên nhân chính dẫn đến sự cố của đường dây cáp ngầm MV đã được trình bày chi tiết trong phần 1.2. Trên cơ sở đó, cần xây dựng một cấu hình hệ thống có khả năng giám sát các thông số bao gồm dòng điện, nhiệt độ, độ ẩm và hoạt động PD. Trong cấu hình này, thông số độ ẩm được sử dụng để theo dõi và đánh giá điều kiện môi trường lắp đặt của hệ thống cáp điện, do đây là yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ của cáp. Đối với việc giám sát tình trạng vận hành của cáp điện, các thông số cốt lõi bao gồm dòng điện tải, PD và nhiệt độ. Theo đó, dòng điện tải phản ánh mức độ chịu tải của cáp và tổn hao điện năng trong quá trình truyền tải, PD là thông số quan trọng để phát hiện sớm suy giảm cách điện và nguy cơ phóng điện nội bộ. Trong khi đó, thông số nhiệt độ cho phép giám sát sự gia tăng nhiệt độ do các tổn hao gây ra trong quá trình vận hành liên tục của cáp.

Quá trình xây dựng hệ thống bắt đầu bằng việc lựa chọn các thiết bị, cảm biến dùng để thu thập dữ liệu trên đường dây. Tiếp theo, tiến hành đề xuất cấu tạo phần cứng của “nút thu thập, xử lý tín hiệu” và xây dựng cách thức hoạt động của máy chủ. Cấu hình hệ thống giám sát đề xuất được trình bày trên hình 2.1. Các cảm biến được sử dụng trong thực hiện đo lường các thông số tại vị trí lắp đặt “nút thu thập, xử lý tín hiệu”, nhằm thu thập dữ liệu trực tiếp từ đường dây và các mối nối cáp. Tín hiệu thu thập được gửi đến nút trung gian, giúp thực hiện xử lý sơ bộ trước khi truyền tải tới máy chủ thông qua giao thức không dây. Tại máy chủ - đơn vị trung tâm của hệ thống, dữ liệu sẽ tiếp tục được xử lý và phân tích để đưa ra cảnh báo sự cố khi cần thiết.

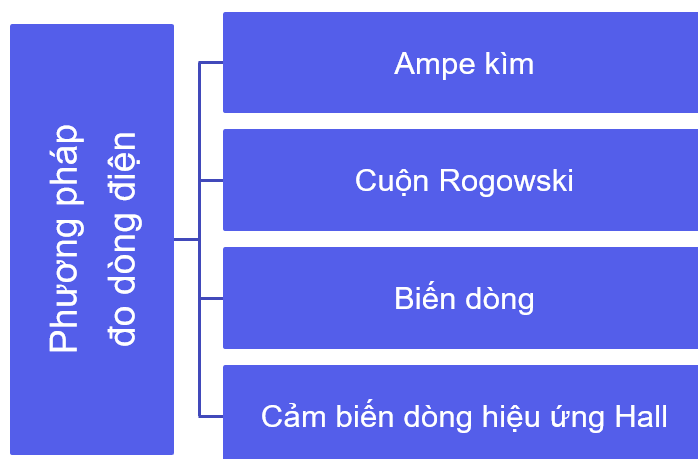


Hình 2.1. Cấu hình đề xuất của hệ thống giám sát cáp ngầm MV [4]

2.1.1. Các cảm biến

2.1.1.1. Các phương pháp đo giá trị dòng điện

Việc xác định giá trị dòng điện có thể sử dụng các thiết bị thể hiện trên hình 2.2, các thiết bị này là đại diện điển hình cho từng phương pháp đo:



Hình 2.2. Các phương pháp đo giá trị dòng điện

a) Ampe kìm

Ampe kìm là một thiết bị được sử dụng phổ biến để đo dòng điện trong trong dải từ 100 mA đến 2000 A nhanh chóng, cho phép đo dòng điện mà không cần phải ngắt mạch điện. Thiết bị hoạt động dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ khi đo dòng điện xoay chiều, và dựa vào cảm biến Hall để đo dòng điện một chiều. Khi thực hiện đo, sử dụng hàm kẹp bao quanh dây dẫn, kết quả đo được hiển thị trên màn hình điện tử hoặc chỉ thị kim. Ampe kìm sử dụng rộng rãi trong bảo trì, kiểm tra hệ thống điện công nghiệp, dân dụng.

- Ưu điểm: đo lường không tiếp xúc, an toàn, nhanh chóng, có thể đo dòng xoay chiều và một số loại cũng có khả năng đo dòng một chiều.

- Nhược điểm: chỉ có thể đo chính xác trong một dải dòng điện nhất định, do đó không phù hợp cho các phép đo yêu cầu độ chính xác cao ở dải dòng cực thấp hoặc cực cao. Ngoài ra, từ trường ngoài có thể gây nhiễu, làm

giảm độ chính xác, và một số loại ampe kìm không tích hợp chức năng đo điện áp hoặc trở kháng.

b) Cuộn Rogowski (RC)

RC là một cuộn dây cảm ứng không có lõi sắt, được quấn quanh một dây dẫn có dòng điện, dùng để đo dòng điện xoay chiều hoặc xung dòng điện tốc độ cao. Theo định luật Faraday, từ trường thay đổi do dòng điện chạy qua dây dẫn sẽ tạo ra một điện áp trong RC, điện áp này tỷ lệ với tốc độ thay đổi của dòng điện (di/dt), và có thể được tích phân để tính ra dòng điện thực tế [37]. Thiết bị thường được sử dụng trong các hệ thống điện công nghiệp, đặc biệt là các hệ thống điện cao áp và đo lường dòng xung trong ứng dụng kỹ thuật cao.

- Ưu điểm: đo không tiếp xúc, có khả năng đo chính xác dòng điện trong các hệ thống có tần số cao như sóng hài. Do không có lõi từ, nên RC không bị bão hòa từ trường, một vấn đề xảy ra phổ biến với các cảm biến từ dựa trên lõi sắt.

- Nhược điểm: chỉ có thể đo tốc độ thay đổi của dòng điện (di/dt), cần mạch tích phân để chuyển đổi tín hiệu, điều này làm tăng độ phức tạp và chi phí của hệ thống. RC không thể đo dòng điện một chiều do nguyên lý đo lường của RC cần xuất hiện sự biến đổi từ trường.

c) Biến dòng

Biến dòng là một dạng máy biến áp được sử dụng để giảm dòng điện lớn trong dây dẫn xuống mức an toàn có thể đo được bởi các thiết bị đo lường thông thường. Biến dòng biến đổi dòng điện lớn ở cuộn sơ cấp thành dòng nhỏ hơn tỉ lệ ở cuộn thứ cấp để dễ đo lường. Biến dòng có thể đo dòng xoay chiều mà không cần tiếp xúc với mạch điện chính. Biến dòng được sử dụng

rộng rãi trong các hệ thống phân phối điện cao áp, hệ thống bảo vệ quá dòng, và trạm biến áp.

- Ưu điểm: có độ chính xác cao trong đo dòng điện lớn, đặc biệt trong hệ thống điện cao áp mà các thiết bị đo khác không thể đo trực tiếp. Biến dòng giúp cách ly điện áp cao, đảm bảo an toàn khi đo lường trong môi trường nguy hiểm. Phù hợp để đo lường các thông số điện năng trong các hệ thống công nghiệp lớn, có độ bền và tính linh hoạt cao.

- Nhược điểm: có thể bão hòa khi tiếp xúc với mức dòng điện cao, dẫn đến sai số đo lường và ảnh hưởng đến hiệu suất của thiết bị. Biến dòng chủ yếu chỉ đo được dòng xoay chiều nên không phù hợp cho dòng một chiều. Máy biến dòng có thể gây tổn thất điện năng, do thiết bị tiêu thụ điện năng trong mạch thứ cấp để đo lường. Một số loại biến dòng có thiết kế cồng kềnh và kích thước lớn, gây khó khăn trong lắp đặt, bảo trì, đặc biệt trong hệ thống điện cao áp.

d) Cảm biến dòng hiệu ứng Hall

Cảm biến dòng hiệu ứng Hall là thiết bị điện tử sử dụng để xác định dòng điện vận hành trong dây dẫn, hoạt động dựa trên nguyên lý của hiệu ứng Hall. Khi xuất hiện dòng điện vận hành trên dây dẫn, từ trường sinh ra, làm xuất hiện điện áp Hall có chiều vuông góc với dòng điện và tỷ lệ thuận với cường độ dòng điện vận hành. Kết quả đo lường dòng điện cuối cùng được xác định sau quá trình xử lý, hiệu chỉnh tín hiệu điện áp Hall.

- Ưu điểm: có thể đo lường dòng điện một chiều và xoay chiều không tiếp xúc, với độ chính xác cao với sai số đầu ra thấp, khoảng 1%. Đồng thời, cảm biến có khả năng chống bụi, nước và chịu được điều kiện môi trường khắc nghiệt khi được thiết kế chống thấm. Thiết bị có giá thành thấp, kích thước nhỏ gọn với tốc độ phản hồi nhanh.

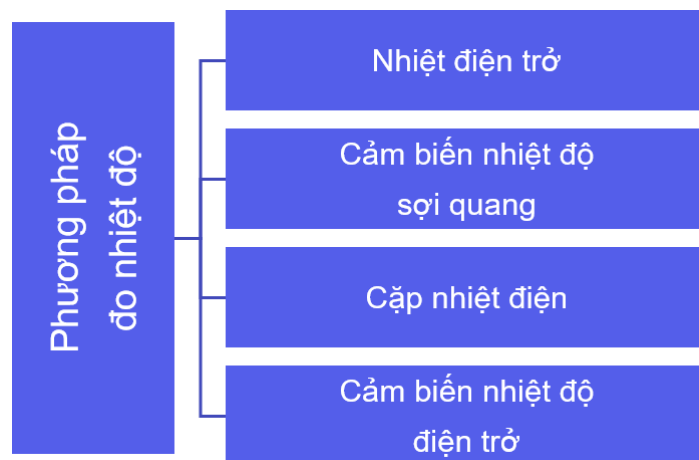
– Nhược điểm: từ trường của cảm biến có thể bị nhiễu, dẫn đến suy giảm độ tin cậy của phép đo, đặc biệt khi giới hạn đầu ra thiết lập ở khoảng 20 mA hoặc thấp hơn. Ngoài ra, cảm biến dễ bị ảnh hưởng trong các môi trường có sự biến đổi nhiệt độ theo thời gian, gây tác động lớn đến độ chính xác của phép đo.

e) Lựa chọn thiết bị

Để giám sát cáp ngầm MV một cách hiệu quả và có độ tin cậy cao, cần thiết bị có thể đo cả dòng điện xoay chiều, dòng điện xung tốc độ cao; khả năng đo nhiều tần số và biên độ tín hiệu. Đặc biệt, cần có chi phí thấp, độ tuyến tính tốt và đo cách ly không xâm nhập. Thiết bị cảm biến dòng điện là cuộn RC ARU-B100-D125 từ hãng LEM (Thụy Sĩ) được đề xuất sử dụng trong cấu hình [46]. Thiết bị này phù hợp với cáp có đường kính ngoài tối đa 125 mm, đảm bảo độ chính xác 1%, và cung cấp tín hiệu đầu ra ở mức 100 mV/kA.

2.1.1.2. Các phương pháp đo giá trị nhiệt độ, độ ẩm

Việc xác định giá trị nhiệt độ có thể sử dụng các thiết bị thể hiện trên hình 2.3, các thiết bị này là đại diện điển hình cho từng phương pháp đo:



Hình 2.3. Các phương pháp đo nhiệt độ

a) Nhiệt điện trở

Nhiệt điện trở là một thiết bị nhiệt điện, được sử dụng để đo nhiệt độ. Khi xuất hiện biến động nhiệt độ, điện trở suất của thiết bị sẽ có xu hướng thay đổi theo. Nhiệt điện trở có bản chất là cảm biến bán dẫn, được chế tạo từ vật liệu gốm (các oxit kim loại hoặc pha tạp) hoặc polyme; tạo thành dạng hạt, vòng hoặc đĩa. [17]

- Ưu điểm: độ nhạy cao với sự thay đổi nhiệt độ và thời gian phản hồi nhanh. Môi quan hệ điện trở - nhiệt độ phi tuyến tính. Độ ổn định và khả năng lặp lại tốt trong phạm vi nhiệt độ xác định. Hiệu quả về mặt chi phí cho phép đo nhiệt độ chính xác.

- Nhược điểm: phạm vi nhiệt độ giới hạn (thường là $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ đến $200\text{ }^{\circ}\text{C}$), hạn chế cho việc sử dụng ở nhiệt độ cực cao hoặc cực thấp. Độ bền kém, nhạy cảm với các điều kiện bên ngoài.

b) Cảm biến nhiệt độ sợi quang

Cảm biến sợi quang là một công nghệ mới, chứa một hợp chất phosphor hoặc hợp chất có tính phát quang, phát ra ánh sáng ở đầu cảm biến. Hợp chất này nhạy cảm với sự thay đổi nhiệt độ. Có nhiều cách để cảm biến sợi quang có thể đo sự thay đổi nhiệt độ, nhưng phổ biến nhất là đo thời gian phát sáng sau khi chiếu sáng. Khi đó, phosphor sẽ được chiếu sáng bởi đèn cực tím hoặc laser trong một khoảng thời gian ngắn. Thời gian phát sáng của phosphor sẽ được đo, từ đó tính toán nhiệt độ tại vị trí của phosphor. Sự thay đổi nhiệt độ sẽ làm cho thời gian phát sáng dài hơn hoặc ngắn hơn theo một cách có thể dự đoán được.

- Ưu điểm: không bị ảnh hưởng bởi các dạng nhiễu như nhiễu điện từ, nhiễu tần số vô tuyến do sử dụng ánh sáng làm tín hiệu truyền dẫn. Cảm biến

sợi quang có tỷ lệ chính xác tốt và giá thành hợp lý với các hệ thống khác có độ chính xác tương đương.

- Nhược điểm: dải nhiệt độ hoạt động hẹp, hầu hết các cảm biến sợi quang chỉ được thiết kế hoạt động ở ngưỡng 300 °C. Thiết bị cảm biến sợi quang chưa được chuẩn hóa hoàn toàn, vì vậy việc lắp đặt thường phải tùy chỉnh toàn bộ, dẫn đến chi phí cuối cùng cao hơn. Cần đào tạo chuyên môn cẩn thận cho đội ngũ vận hành thiết bị.

c) Cặp nhiệt điện

Cặp nhiệt điện là một thiết bị đo nhiệt độ, bao gồm hai dây kim loại không giống nhau được nối với nhau để tạo thành một mối nối. Nguyên lý hoạt động của cặp nhiệt điện dựa trên hiệu ứng Seebeck. Khi hai kim loại không giống nhau được nối tại một đầu và tiếp xúc với chênh lệch nhiệt độ, sẽ tạo ra một điện áp nhỏ [56]. Giá trị điện áp này tỷ lệ thuận với chênh lệch nhiệt độ giữa mối nối và điểm tham chiếu. Bằng cách đo điện áp này và sử dụng dữ liệu hiệu chuẩn, có thể thu được các giá trị đọc nhiệt độ chính xác. Cặp nhiệt điện được sử dụng chủ yếu trong các quy trình công nghiệp, hệ thống sưởi, thông gió, điều hòa không khí và nghiên cứu khoa học.

- Ưu điểm: phạm vi xử lý phổ nhiệt độ rộng trong khoảng từ -100 °C đến 2500 °C. Chi phí tương đối thấp, thời gian phản hồi nhanh và có thể chịu được môi trường khắc nghiệt, rung động.

- Nhược điểm: độ nhạy thấp với những thay đổi nhiệt độ nhỏ. Độ chính xác tương đối thấp, mức độ sai số từ 1 °C đến 2 °C. Ngoài ra, thiết bị dễ bị ăn mòn do hai kim loại có độ phản ứng khác nhau tiếp xúc với nhau. Điện áp đầu ra thấp, khiến đầu ra dễ bị nhiễu bởi các thiết bị điện tử xung quanh.

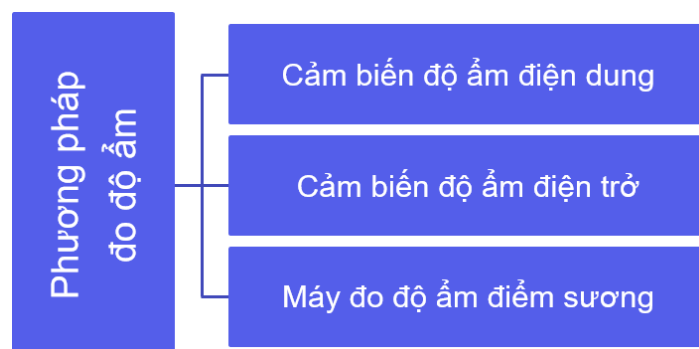
d) Cảm biến nhiệt độ điện trở (RTD)

RTD là thiết bị thụ động đo sự thay đổi điện trở của kim loại theo nhiệt độ [42]. Khi nhiệt độ gia tăng, điện trở của kim loại trong thiết bị tăng và ngược lại, khi nhiệt độ giảm làm điện trở cũng giảm. Loại RTD phổ biến thường được chế tạo bằng dây dẫn kim loại bạch kim, quấn quanh một cuộn gốm.

- Ưu điểm: độ nhạy, tính tuyến tính và độ chính xác rất cao. Thiết bị có thể được sử dụng an toàn ở nhiệt độ trong phạm vi rộng (-200°C đến 850°C). RTD có khả năng hoạt động trong các ứng dụng đòi hỏi độ bền cao.

- Nhược điểm: thời gian phản hồi chậm (khoảng từ 0,5 đến 5 giây trở lên) do độ dẫn nhiệt chậm trong việc đưa cảm biến vào trạng thái cân bằng nhiệt. RTD được vận hành bằng mạch cấp nguồn bên ngoài nên có thể xảy ra hiện tượng tự làm nóng phần tử điện trở, có thể ảnh hưởng đến giá trị đo nhiệt độ.

Việc xác định giá trị độ ẩm có thể sử dụng các thiết bị thể hiện trên hình 2.4, các thiết bị này là đại diện điển hình cho từng phương pháp đo:



Hình 2.4. Các phương pháp đo độ ẩm

e) Cảm biến độ ẩm điện dung

Cảm biến độ ẩm điện dung là thiết bị điện tử khai thác sự thay đổi điện dung của vật liệu nhạy cảm với độ ẩm như một hàm số của độ ẩm, theo đó chuyển đổi thành giá trị độ ẩm tương đối của môi trường. [44]

- Ưu điểm: mức tiêu thụ điện năng thấp và tín hiệu đầu ra có biên độ lớn. Có thể chịu được nhiệt độ dưới 0°C và linh hoạt trong các ứng dụng khác nhau. Thiết bị không bị ảnh hưởng bởi yếu tố áp suất.

- Nhược điểm: độ ổn định lâu dài bị hạn chế, cần thay thế bảo trì sau một khoảng thời gian sử dụng nhất định. Thiết bị rất nhạy cảm với lớp sương hình thành từ yếu tố thời tiết và một số chất có tính ăn mòn khác.

f) Cảm biến độ ẩm điện trở

Cảm biến độ ẩm điện trở thực hiện đo giá trị độ ẩm tương đối, nhờ vào phát hiện những thay đổi điện trở của vật liệu nhạy cảm với mức độ ẩm xung quanh. Thiết bị khai thác đặc tính của vật liệu điện trở như polyme dẫn điện, muối hoặc chất nền sau xử lý. Sự hấp thụ nước gây ra biến dạng cơ học ở vật liệu, làm thay đổi điện trở và từ đó chuyển đổi thành giá trị độ ẩm tương đối. [44]

- Ưu điểm: cung cấp phép đo độ ẩm tương đối chính xác, phạm vi đo lường rộng và có thể hoạt động trong môi trường khắc nghiệt. Đồng thời, cảm biến điện trở phản ứng nhanh với những thay đổi về độ ẩm, khiến chúng phù hợp với các ứng dụng yêu cầu giám sát theo thời gian thực.

- Nhược điểm: dễ suy giảm tuổi thọ khi tiếp xúc với hơi hóa chất và các chất gây ô nhiễm. Một số cảm biến có xu hướng bị lệch giá trị đo khi tiếp xúc với hơi ngưng tụ nếu sử dụng lớp phủ hòa tan trong nước. Thiết bị bị chi phối mạnh mẽ bởi nhiệt độ khi được lắp đặt trong môi trường có biến động nhiệt độ lớn.

g) Máy đo độ ẩm điểm sương

Máy đo độ ẩm điểm sương là thiết bị được dùng để đo nhiệt độ điểm sương của khí, tương ứng với nhiệt độ mà hơi nước trong không khí bắt đầu

ngưng tụ thành chất lỏng. Bao gồm một tấm gương kim loại đánh bóng, được làm mát ở áp suất không đổi và hàm lượng hơi không đổi cho đến khi độ ẩm bắt đầu ngưng tụ trên đó. Nhiệt độ của kim loại mà tại đó sự ngưng tụ bắt đầu là điểm sương.

- Ưu điểm: xác định chính xác độ ẩm trong các ứng dụng môi trường kín.
- Nhược điểm: không thể hoạt động hiệu quả trong môi trường khắc nghiệt, chi phí cao.

h) Lựa chọn thiết bị

Hiện nay, các hệ thống giám sát hiện đại có xu hướng tích hợp cả hai cảm biến nhiệt độ và độ ẩm trên cùng một thiết bị. Thêm vào đó, thị trường các thiết bị này đang phát triển mạnh, với đa dạng các mẫu sản phẩm. Thiết bị cung cấp khả năng theo dõi toàn diện điều kiện vận hành trong thời gian thực.

Nguyên lý hoạt động của hệ thống được xây dựng dựa trên việc khai thác các thuộc tính vật lý đặc trưng của vật liệu để đo lường và giám sát các thông số. Trong đó, cảm biến RTD được lựa chọn để theo dõi nhiệt độ nhờ vào độ tin cậy cao và khả năng hoạt động ổn định trong môi trường vận hành khắc nghiệt. Trong khi đó, cảm biến độ ẩm điện dung được sử dụng để đo lường độ ẩm môi trường, với ưu điểm nổi bật là khả năng thích nghi hiệu quả trước những biến động của điều kiện nhiệt độ và áp suất trong môi trường cấp ngầm.

Hai loại cảm biến này được tích hợp trong cùng một thiết bị đo nhiệt độ và độ ẩm. Thiết bị có mã SM7820B (SONBEST, Shanghai) [63], được đề xuất sử dụng. Thiết bị này cung cấp sự đơn giản hóa trong quá trình lắp đặt và vận hành, đồng thời hỗ trợ giao tiếp hiệu quả qua giao thức MODBUS-RTU với chuẩn kết nối RS485, giúp dễ dàng kết nối với bộ vi điều khiển. Đặc biệt,

thiết bị có khả năng hoạt động tốt trong các điều kiện khắc nghiệt như môi trường ngầm trong lớp đất đá hoặc tại các hố ga kỹ thuật, phù hợp với hệ thống cáp ngầm MV.

2.1.1.3. *Các phương pháp đo phóng điện cục bộ*

Việc đo lường PD có thể sử dụng các thiết bị thể hiện trên hình 2.5, các thiết bị này là đại diện điển hình cho từng phương pháp đo:



Hình 2.5. Các phương pháp đo phóng điện cục bộ

a) Cảm biến sóng điện từ dải tần số cực cao (UHF)

Cảm biến sóng điện từ UHF có thể phát hiện hiện tượng PD trong các thiết bị điện, đặc biệt là trong thiết bị đóng cắt cách điện khí và máy biến áp [20], [47]. Cảm biến này thu tín hiệu trong dải tần UHF (khoảng từ 300 MHz đến 3 GHz) và được lắp đặt gần hoặc bên trong hệ thống thiết bị điện cao áp và đường dây cáp để thu nhận tín hiệu [29]. Các cảm biến này có thể hoạt động kết hợp cùng với nhiều hệ thống giám sát khác nhau trong hệ thống giám sát.

– Ưu điểm: có thể phát hiện phóng điện bề mặt và bên trong, là phương pháp thử nghiệm trực tuyến, do đó không cần ngừng hoạt động thiết bị để thực hiện các phép đo. Ăng-ten nhỏ gọn và được thiết kế để sử dụng an toàn

bên trong các trạm biến áp điện. Phạm vi của UHF cho phép thực hiện các thử nghiệm mà không phá vỡ khoảng cách an toàn của tài sản. UHF bỏ qua corona, nhiễu nền khác bằng cách phát hiện các dải tần số gây nhiễu và điều chỉnh tần số hoạt động trung tâm thành phạm vi yên tĩnh hơn. UHF cung cấp một phương pháp toàn diện để đo PD trong các trạm biến áp ngoài trời.

- Nhược điểm: suy giảm tín hiệu mạnh khi tín hiệu UHF truyền qua các vật liệu cách điện dày hoặc qua khoảng cách xa. Ngoài ra, cảm biến UHF không thể được hiệu chuẩn chính xác do sự phức tạp trong đặc tính tần số. Hiệu ứng che chắn của cáp cũng làm suy giảm tín hiệu khi có các lớp bọc kim loại hoặc các vật liệu chắn xung quanh, khiến cảm biến khó phát hiện PD trong các khu vực có che chắn mạnh.

b) Cảm biến điện áp thoáng qua đất (TEV)

Cảm biến TEV được sử dụng rộng rãi để phát hiện ảnh hưởng của bức xạ điện từ phát sinh từ PD. Thông thường, các cảm biến này được đặt gần các đầu cáp hoặc khu vực dễ xảy ra hiện tượng PD. Khi PD xảy ra, sẽ tạo ra bức xạ điện từ, và bức xạ này có khả năng gây ra các xung điện áp thoáng qua trên các bề mặt kim loại xung quanh [26]. Cảm biến TEV là cảm biến điện dung, theo đó cảm biến ghi nhận các xung điện áp này và chuyển đổi thành tín hiệu điện áp tỷ lệ với điện áp tức thời do bức xạ tạo ra.

- Ưu điểm: gắn bên ngoài vỏ kim loại của thiết bị mà không cần tiếp xúc với dòng điện bên trong, đảm bảo an toàn và không gây gián đoạn cho hoạt động của thiết bị. TEV đặc biệt hữu ích trong các hệ thống cách điện khí hoặc không khí. TEV có chi phí thấp, dễ sử dụng, và hiệu quả cao trong các ứng dụng thực tiễn.

- Nhược điểm: phụ thuộc vào vỏ bọc kim loại của thiết bị để truyền tải xung, nên chỉ hoạt động tốt trên các hệ thống có vỏ kim loại. Cảm biến TEV

cũng nhạy cảm với nhiễu điện từ từ môi trường xung quanh, đặc biệt trong các trạm biến áp.

c) Biến dòng tần số cao (HFCT)

Phương pháp sử dụng một biến dòng tần số cao để phát hiện các xung dòng điện sinh ra từ hiện tượng PD trong cáp. Khi hiện tượng PD hoạt động, sẽ tạo ra các xung dòng điện có tần số cao, HFCT thường được kẹp quanh cáp hoặc dây nối đất để thu thập các xung dòng này và truyền về hệ thống xử lý để phân tích [8]. HFCT chuyển đổi xung dòng điện có tần số cao thành tín hiệu điện áp tỷ lệ thuận với dòng điện. Được sử dụng rộng rãi trong kiểm tra PD của cáp ngầm, máy biến áp và thiết bị cao áp khác trong các hệ thống điện.

- Ưu điểm: cho phép giám sát PD mà không cần tiếp xúc trực tiếp với lõi cáp, có thể áp dụng trong môi trường đang vận hành mà không làm gián đoạn hệ thống. Ngoài ra, có thể giám sát PD trên các hệ thống cáp dài và khó tiếp cận, nhờ khả năng phát hiện từ xa các xung dòng điện. Được sử dụng rộng rãi trong các chương trình giám sát liên tục, chính xác, cho phép phát hiện sớm và cảnh báo kịp thời về các nguy cơ hỏng hóc của hệ thống cách điện.

- Nhược điểm: yêu cầu trang bị một mạch vòng điện khép kín để thu nhận tín hiệu PD một cách hiệu quả. Do đó, thiết bị đòi hỏi thiết kế, lắp đặt tương đối phức tạp. Thiết bị dễ bị ảnh hưởng bởi hiện tượng bão hòa vật liệu khi phải chịu tác động của dòng điện lớn tại tần số công suất, dẫn đến việc mất thông tin hoặc sai lệch kết quả đo.

d) Cảm biến âm thanh siêu âm

Cảm biến âm thanh siêu âm là một đầu dò âm thanh siêu âm. Âm thanh phát xạ từ hoạt động PD nằm trong dải tần từ 20 kHz đến 1 MHz, được tạo ra

khi có sự hình thành PD làm bay hơi vật liệu xung quanh, dẫn đến sự giải phóng nhanh chóng năng lượng cơ học dưới dạng trường áp suất [41], [53]. Khi hoạt động PD xảy ra, cảm biến âm thanh trong hệ thống sẽ phát hiện các xung áp suất này và tiến hành tạo ra các xung điện có tần số, biên độ thích hợp. Phương pháp này thường yêu cầu tiếp cận gần với nguồn PD, nhưng không cần tiếp xúc trực tiếp, giúp dễ dàng triển khai tại hiện trường.

- Ưu điểm: kích thước nhỏ gọn, phù hợp lắp đặt tại nơi chật hẹp. Thiết bị có tính linh hoạt, dễ dàng lắp đặt tại mọi vị trí trên đường dây. Cảm biến có khả năng đo lường PD hiệu quả mà không cần tiếp xúc trực tiếp với hệ thống, nhờ đó giảm thiểu nguy cơ gây gián đoạn hệ thống.

- Nhược điểm: cần đặt gần nguồn PD để đạt hiệu quả, do đó khó phát hiện PD từ xa. Phương pháp này cũng dễ bị ảnh hưởng bởi các nguồn âm thanh và nhiễu từ không khí, đặc biệt là trong môi trường có tiếng ồn cao, làm giảm độ chính xác của phép đo.

e) Lựa chọn thiết bị

Yêu cầu đặt ra là sự đơn giản hóa, dễ dàng phát hiện hoạt động PD và đặc biệt có thể linh hoạt trong việc lắp đặt theo dõi tại các điểm yếu của cáp. Đầu dò âm thanh siêu âm AA của hãng iPEC (Vương quốc Anh) được khuyến nghị sử dụng trong hệ thống. Thiết bị có khả năng đo lường từ -6 dB μ V đến +70 dB μ V, với sai số đo lường ± 6 dB μ V. Ngoài ra, cảm biến rất nhạy, có thể phát hiện các hoạt động PD ở ngưỡng dưới 10 pC.

Phương pháp cảm biến âm thanh siêu âm là một phương pháp phù hợp với cấu hình đề xuất trong việc phát hiện PD. Các cảm biến âm thanh siêu âm có thể thu nhận các tín hiệu và giúp xác định vị trí, mức độ của sự cố PD. Cảm biến này được lắp đặt sát bề mặt vỏ cáp, giúp các cảm biến có thể thu nhận được tín hiệu từ nguồn phát sinh PD.

2.1.2. Nút thu thập, xử lý tín hiệu

Hệ thống giám sát cáp ngầm bao gồm các “nút thu thập, xử lý tín hiệu”, nhằm kết nối giữa các cảm biến với máy chủ điều khiển, từ đó tạo ra một nền tảng giám sát liên tục cho các thông số kỹ thuật của đường dây cáp ngầm MV. Các nút này đóng vai trò cầu nối trong hệ thống, không chỉ thu thập dữ liệu từ các cảm biến mà còn xử lý và truyền tải tín hiệu không dây đến máy chủ, giúp đơn vị quản lý giám sát liên tục và kịp thời. Để thuận tiện cho việc sửa chữa, bảo trì và dễ dàng nâng cấp trong tương lai, các nút được khuyến nghị đặt trong hố ga hoặc gần các điểm kết nối kỹ thuật dọc tuyến cáp ngầm. Một nút điển hình bao gồm các thành phần chính được liệt kê trong hình 2.1, bao gồm:

- Bộ lọc cộng hưởng: ghép nối các thành phần như điện trở, tụ điện và cuộn cảm để tạo ra tần số cộng hưởng phù hợp với tần số của dòng điện giám sát. Tín hiệu điện áp phản ứng với dòng điện trong dây dẫn có vai trò quan trọng trong phép đo. Bộ lọc cộng hưởng kết hợp với thiết bị RC xử lý tín hiệu điện áp này, nhằm tăng độ nhạy và giảm thiểu nhiễu, giúp cải thiện hiệu quả cho phép đo đặc và phân tích dòng điện.

- Hệ thống vi điều khiển: đóng vai trò trung tâm xử lý của nút, thực hiện quản lý các chức năng chính gồm giao tiếp, đo dòng điện, nhiệt độ, độ ẩm và sự phát xạ âm thanh. Phiên bản vi điều khiển STM32L432KC Nucleo-32 board được đề xuất để duy trì khả năng kết nối với các thiết bị ngoại vi, đặc biệt có thể hoạt động trong chế độ tiêu thụ điện năng thấp. Tín hiệu đo dòng điện và phát xạ âm thanh đưa vào cổng ADC của vi điều khiển, trong khi các tín hiệu nhiệt độ và độ ẩm được đưa vào cổng SPI, giúp đảm bảo rằng dữ liệu số đầu vào duy trì ổn định.

- Mô-đun LoRa: truyền dữ liệu từ “nút thu thập, xử lý tín hiệu” đến máy chủ, hệ thống sử dụng công nghệ truyền không dây LoRaWAN. LoRaWAN

nổi bật với khả năng tiêu thụ năng lượng thấp và cung cấp vùng phủ sóng rộng cùng khả năng truyền qua các vật cản [12]. LoRaWAN không phụ thuộc vào một nhà cung cấp duy nhất, cho phép nhiều đơn vị dễ dàng triển khai [43]. LoRaWAN chủ yếu được sử dụng với các cảm biến không dây, việc trao đổi thông tin có tốc độ thấp và khoảng thời gian truyền tương đối dài [57]. Hệ thống cấu hình đề xuất trang bị mô-đun TTGO T-Beam ESP32 LoRa kết hợp cùng ăng-ten LoRa Whip cho cả phía phát và phía nhận tín hiệu, giúp tối ưu hóa hiệu suất truyền tải dữ liệu trong không gian chật hẹp và ở khoảng cách xa.

– Nguồn cấp: duy trì hoạt động ổn định của “nút thu thập, xử lý tín hiệu”. Một máy biến áp nguồn được kết nối với mỗi nút để cung cấp năng lượng thông qua khớp nối cảm ứng và mạch chỉnh lưu, nhờ vào khả năng thu năng lượng khi có dòng điện chạy qua dây dẫn. Trong trường hợp mất điện đột ngột, nút sẽ chuyển sang dùng hai pin Li-ion Panasonic NCR18650GA mắc song song, với dung lượng tổng khoảng 6800 mAh, phù hợp để cung cấp năng lượng dự phòng và hỗ trợ sạc lại khi có nguồn điện.

2.1.3. Máy chủ

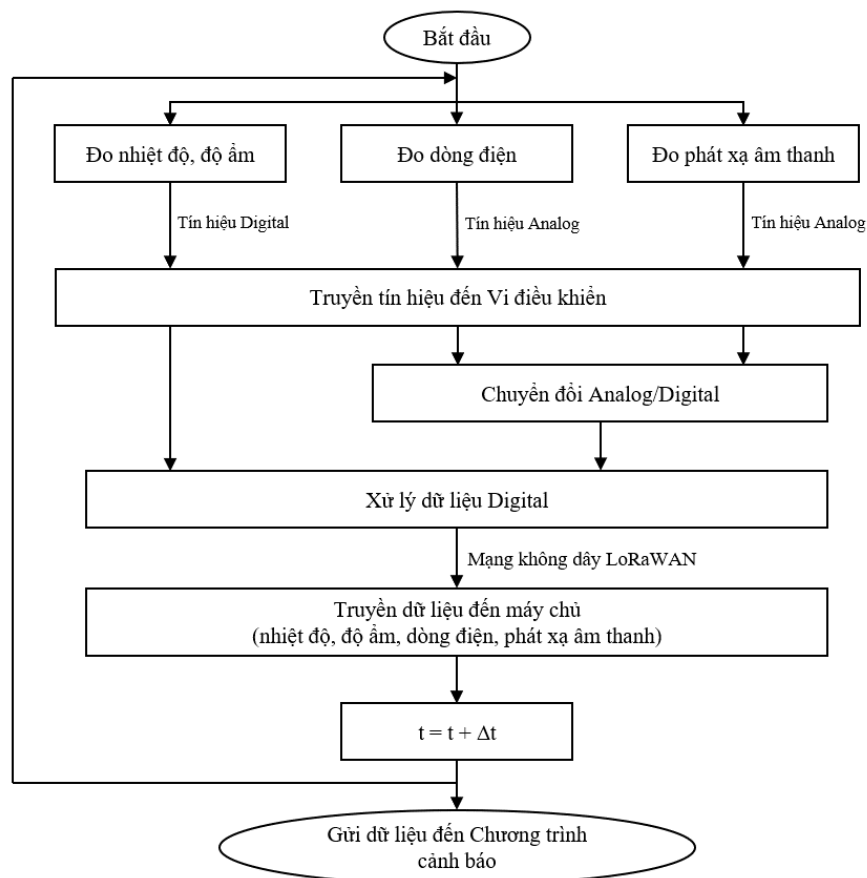
Máy chủ điều khiển đảm nhiệm việc tiếp nhận tín hiệu gửi về từ các “nút thu thập, xử lý tín hiệu”. Máy chủ thực hiện hai quá trình chính: (1) giám sát và ghi nhận dữ liệu thời gian thực từ các cảm biến, (2) chuẩn bị và phân tích dữ liệu để đưa ra cảnh báo. Quá trình giám sát thời gian thực thực hiện các lệnh đo trực tiếp thông số tại các cảm biến hoặc các mối nối, trong khi đó, dữ liệu sau khi thu thập được phân tích qua thuật toán để so sánh với các giới hạn an toàn đã đặt trước, nhằm phát hiện và đưa ra cảnh báo khi xuất hiện các dấu hiệu bất thường.

2.2. HOẠT ĐỘNG THU THẬP VÀ XỬ LÝ DỮ LIỆU

Hình 2.6 mô tả quá trình hoạt động thu thập và xử lý dữ liệu phục vụ cho việc giám sát và cảnh báo lỗi cáp ngầm MV. Đầu tiên, các thông số nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và phát xạ âm thanh được đo lường tại những vị trí lắp đặt thiết bị giám sát, trên đường dây cáp hoặc các mối nối, theo chu kỳ thực hiện phép đo là Δt . Trong cấu hình, thiết bị SM7820B thu nhận tín hiệu nhiệt độ và độ ẩm dưới dạng tín hiệu số, trong khi tín hiệu dòng điện và phát xạ âm thanh là dạng tín hiệu tương tự, được ghi lại lần lượt thông qua cuộn RC ARU-B100-D125 và đầu dò âm thanh AA. Các tín hiệu này được chuyển đến vi điều khiển để tiếp tục quá trình xử lý.

Đối với tín hiệu tương tự, hệ thống cần chuyển đổi sang tín hiệu số để đồng bộ qua cổng ADC trên vi điều khiển. Quy trình chuyển đổi này diễn ra qua ba bước chính gồm: lấy mẫu, số hóa và mã hóa [38]. Đầu tiên, tín hiệu ứng suất được thu thập tại các thời điểm nhất định trong bước lấy mẫu, với độ chính xác phụ thuộc vào tần số lấy mẫu và độ phân giải của ADC. Tiếp theo, các giá trị mẫu được làm tròn hoặc gán với giá trị nguyên gần nhất trong bước số hóa. Cuối cùng, tín hiệu được mã hóa thành một chuỗi bit, biểu diễn đúng biên độ và sự thay đổi của tín hiệu tương tự ban đầu. Khi tất cả tín hiệu đã chuyển đổi sang dạng số, gồm: tín hiệu dòng điện, phát xạ âm thanh đã được chuyển đổi và tín hiệu nhiệt độ, độ ẩm. Vi điều khiển tiến hành xử lý qua hai giai đoạn: tiền xử lý và phân tích. Trong bước tiền xử lý, dữ liệu được làm sạch và chuẩn hóa để loại bỏ nhiễu và đảm bảo tính nhất quán của cấu trúc. Trong giai đoạn phân tích, các thuật toán thống kê và học máy được áp dụng để phát hiện mẫu và mối quan hệ trong dữ liệu, nhờ đó tổng hợp thông tin quan trọng.

Dữ liệu số sau khi xử lý sẽ được vi điều khiển truyền đến máy chủ thông qua kết nối LoRaWAN nhờ vào mô-đun đã nêu trong mục 2.1.2. Một yếu tố thiết yếu của hệ thống này là việc xác định chu kỳ thu thập dữ liệu Δt hợp lý. Khoảng thời gian giữa các lần đo cần được tính toán một cách khoa học, do ảnh hưởng trực tiếp đến tần số lấy mẫu trong việc thu thập dữ liệu. Khi thời gian giữa các phép đo dài hơn, tần số lấy mẫu cần được điều chỉnh để không bỏ sót những thay đổi, biến động quan trọng trong tín hiệu. Ngược lại, nếu thời gian giữa các phép đo quá ngắn so với tần số lấy mẫu, điều này có thể dẫn đến lãng phí tài nguyên. Do đó, việc tối ưu chu kỳ đo và tần số lấy mẫu là điều quan trọng nhằm đảm bảo hệ thống hoạt động hiệu quả và thu thập dữ liệu chính xác.



Hình 2.6. Hoạt động thu thập và xử lý dữ liệu. Δt - khoảng thời gian giữa 2 lần thực hiện phép đo [4]

2.3. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN CẢNH BÁO SỰ CỐ CHO CÁP NGẦM

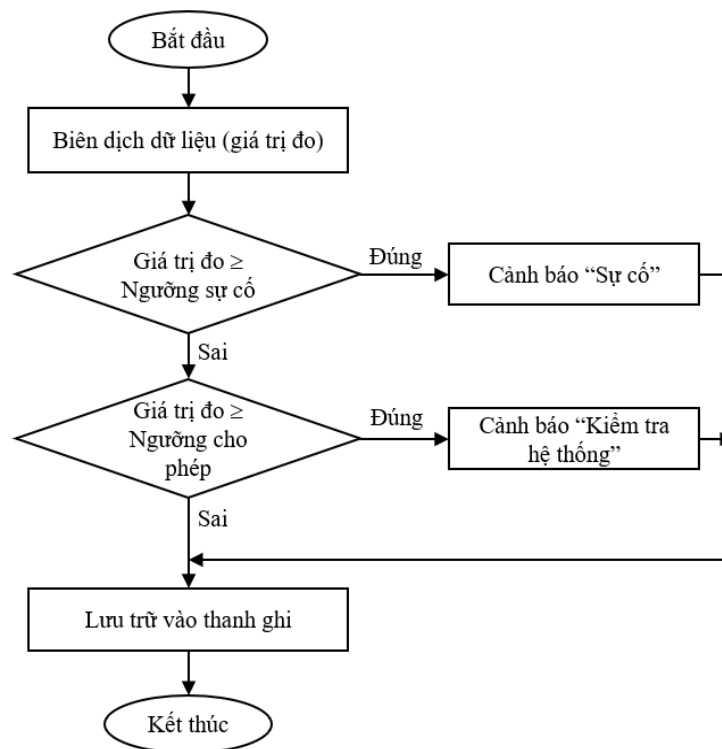
Trong cấu hình giám sát được đề xuất, thuật toán cảnh báo sự cố cho cáp ngầm MV mô tả trên hình 2.7, đóng vai trò trung tâm trong việc quản lý hiệu quả các thiết bị. Quá trình xử lý dữ liệu tiến hành phân tích các thông số đo lường, bao gồm nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện, và âm thanh phát xạ tại các điểm “nóng” cáp hoặc mối nối cáp. Các dữ liệu này được biên dịch từ tín hiệu thu thập bởi các thiết bị đo, đảm bảo giám sát chính xác tình trạng hệ thống. Để phát hiện nguy cơ hỏng hóc tiềm ẩn, hệ thống so sánh các giá trị ứng suất với “ngưỡng cho phép” và “ngưỡng sự cố” đã thiết lập:

- Trong trường hợp các giá trị vượt quá mức “ngưỡng sự cố” và xuất hiện những biến động không đồng nhất với điều kiện thông thường của cáp, hệ thống sẽ kích hoạt cảnh báo “sự cố”, yêu cầu tiến hành các biện pháp khẩn cấp để giảm thiểu hậu quả hư hỏng và bảo vệ hệ thống.

- Nếu giá trị ứng suất chỉ vượt quá “ngưỡng cho phép”, hệ thống sẽ đưa ra cảnh báo “kiểm tra hệ thống”, một cảnh báo ở mức độ nhẹ hơn nhưng vẫn mang lại nhiều giá trị quan trọng. Cảnh báo này xuất hiện khi có dấu hiệu, biểu hiện bất thường của đường dây, khi đó, cần tiến hành kiểm tra đường dây để phòng ngừa các rủi ro. Bên cạnh đó, các thông số này cũng cung cấp tương quan về sự thay đổi tình trạng cách điện của cáp, cho phép theo dõi độ suy giảm cách điện của đường dây.

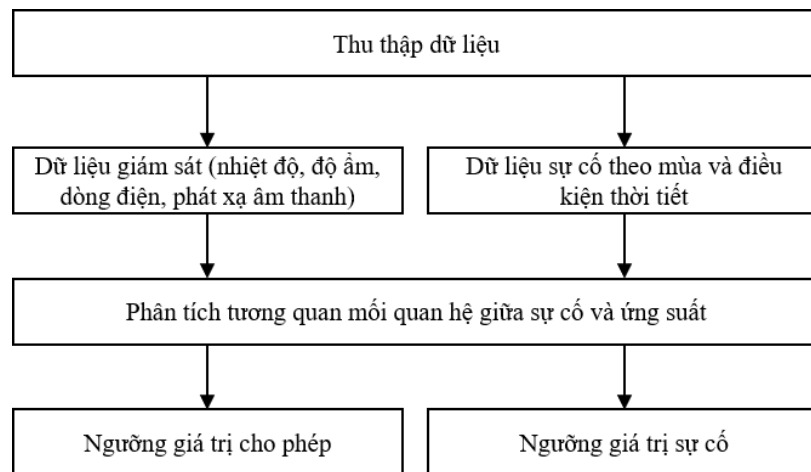
Sự kết hợp của hai mức cảnh báo giúp duy trì tính liên tục và an toàn cho hệ thống cáp ngầm, đồng thời giảm thiểu nguy cơ xảy ra sự cố nghiêm trọng. Đặc biệt, khi có nhiều cảnh báo xuất hiện cùng một khoảng thời điểm từ các nút đo khác nhau, đồng nghĩa với tình trạng đường dây cáp ngầm đã có nguy cơ xuống cấp, yêu cầu thực hiện các công tác bảo trì toàn diện. Hơn nữa, các

phép đo định kỳ cũng được lưu lại để xây dựng biểu đồ biến thiên theo thời gian, hỗ trợ phân tích xu hướng, hiệu ứng vụ mùa, tính chu kỳ và sự biến động của dữ liệu. Để đảm bảo độ chính xác của các biểu đồ này, dữ liệu phải được thu thập liên tục trong thời gian dài, giúp hệ thống xác định chính xác các thay đổi về tình trạng cấp ngậm. Tất cả các trạng thái và sự kiện bất thường đều được lưu trữ dưới dạng dữ liệu kỹ thuật số, tạo điều kiện để đơn vị quản lý dễ dàng phân tích và đánh giá các biến động qua thời gian.



Hình 2.7. Thuật toán cảnh báo sự cố cấp ngậm [4]

Trong thuật toán giám sát và cảnh báo sự cố cho cấp ngậm, việc thiết lập “ngưỡng sự cố” và “ngưỡng cho phép” đóng vai trò cốt lõi trong độ chính xác của hoạt động chẩn đoán và cảnh báo. Các giá trị này cần được điều chỉnh dựa trên điều kiện thời tiết và theo mùa, với quy trình đánh giá và cập nhật hàng năm. Hình 2.8 thể hiện trình tự các bước để có thể xác định “ngưỡng sự cố” và “ngưỡng cho phép”.



Hình 2.8. Trình tự thực hiện để xác định ngưỡng ứng suất [4]

Ban đầu, hệ thống giám sát ghi nhận dữ liệu vào bộ nhớ và biểu diễn dưới dạng biểu đồ thời gian, phản ánh sự thay đổi dữ liệu trong các khoảng thời gian trong năm. Dữ liệu về sự cố theo mùa và điều kiện thời tiết sẽ cần thu thập từ nguồn cơ sở dữ liệu của các cơ quan quản lý đường dây cáp ngầm. Tiếp đó, giá trị của các ứng suất được đối chiếu với số lượng sự cố ghi nhận trong điều kiện khí hậu khác nhau. Trên cơ sở đó, phân tích tương quan mối quan hệ giữa các thông số ứng suất và tần suất xảy ra sự cố nhằm xác định “ngưỡng sự cố”. Phương pháp này dựa trên sự kết hợp giữa phân tích số liệu thực tế và xây dựng mô hình dự đoán.

Quá trình xác định “ngưỡng cho phép” của cáp ngầm MV cũng đòi hỏi phân tích dữ liệu chi tiết từ các thông số thực tế, đồng thời xác định mức độ hoạt động an toàn của cáp trong các điều kiện khác nhau. Từ cơ sở dữ liệu này, hệ thống sẽ thiết lập mức giới hạn tối đa mà cáp có thể hoạt động bình thường. Nhờ vậy, công tác quản lý và vận hành cáp từng bước cải thiện về độ tin cậy, an toàn và hiệu quả.

2.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG

Chương 2 đã đề xuất cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm MV. Đây là một giải pháp kỹ thuật có khả năng theo dõi, giám sát các thông

số có liên quan trực tiếp đến các nguyên nhân chính gây ra sự cố của đường dây cáp ngầm.

Trong đề xuất này, quá trình lựa chọn các thiết bị phần cứng của giải pháp được thực hiện, nhằm xây dựng hệ thống có khả năng đảm nhiệm các chức năng thu thập, xử lý và truyền dữ liệu. Các thiết bị bao gồm: cuộn dây RC, thiết bị đo độ ẩm, nhiệt độ, đầu dò âm thanh phát xạ từ hoạt động PD, vi điều khiển, mô-đun LoRa, máy biến áp nguồn và một số các linh kiện phần cứng khác.

Một thuật toán cảnh báo sự cố và nguy cơ tiềm ẩn của đường dây cáp ngầm được phát triển dựa trên các dữ liệu giám sát và dữ liệu ghi nhận sự cố. Điểm cốt lõi tạo nên tính hiệu quả của thuật toán này là việc so sánh các giá trị ứng xuất với ngưỡng giới hạn, kết hợp cùng việc xây dựng trình tự xác định các giới hạn này theo điều kiện thời tiết, tương ứng với tần suất xảy ra sự cố của đường dây cáp ngầm MV.

CHƯƠNG 3 - MÔ PHỎNG SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ TRONG CÁCH ĐIỆN CÁP THEO NHIỆT ĐỘ BỀ MẶT CÁP

Dựa vào thuật toán cảnh báo sự cố mô tả trên hình 2.7 (mục 2.3), việc xác định các ngưỡng cảnh báo là yếu tố then chốt nhằm xây dựng một hệ thống giám sát đảm bảo đáp ứng các yêu cầu về độ tin cậy. Trong quá trình giám sát tình trạng vận hành cáp ngầm MV, việc theo dõi các thông số dòng điện tải và cường độ phát xạ âm thanh từ hoạt động PD, cho phép xác định ngay lập tức các bất thường có thể dẫn đến sự cố. Những thông số này có thể được đo trực tiếp và cung cấp kết quả nhanh chóng, giúp hệ thống giám sát phản ứng kịp thời với các tình huống khẩn cấp. Tuy nhiên, với yếu tố nhiệt độ, vấn đề sẽ phức tạp hơn do giới hạn của cảm biến chỉ có thể xác định giá trị nhiệt độ tại bề mặt cáp, không phản ánh chính xác nhiệt độ của cách điện cáp - vị trí có thể xảy ra hiện tượng quá nhiệt và gây hư hỏng, như đã được đề cập trong phần 1.2.

Trong các lớp vật liệu cấu thành cáp, lớp cách điện XLPE thường có giới hạn nhiệt độ vận hành an toàn thấp hơn nhiều so với lõi dẫn đồng, lớp màn chắn bằng đồng hoặc một số hợp chất bán dẫn đặc biệt, chẳng hạn như hợp chất nền EPR. Mặt khác, nhiệt độ tối đa của lớp cách điện sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu tải tối đa của cáp, và là yếu tố phản ánh trực tiếp nhất trạng thái hoạt động ổn định của cáp. Sự phân bố nhiệt độ lớp cách điện không chỉ quyết định tuổi thọ của vật liệu cáp mà còn ảnh hưởng đến sự vận hành an toàn và tin cậy của cáp. Khi nhiệt độ cách điện vượt quá giới hạn cho phép trong thời gian dài, cấu trúc phân tử của vật liệu sẽ bắt đầu bị phá vỡ, dẫn đến hiện tượng suy giảm cách điện [61], [65], [68]. Khi đó, chức năng bảo vệ cách điện của cáp sẽ không còn được đảm bảo, làm tăng nguy cơ xảy ra các sự cố nghiêm trọng như ngắn mạch hoặc tình trạng quá tải trong hệ thống. Mặc dù hiện nay đã xuất hiện một số giải pháp nhằm theo dõi nhiệt độ

lớp cách điện của cáp, tuy nhiên các giải pháp này thường yêu cầu chi phí đầu tư lớn, gặp nhiều hạn chế về mặt kỹ thuật và không tương thích với các hệ thống cáp ngầm cũ hiện có [14], [51].

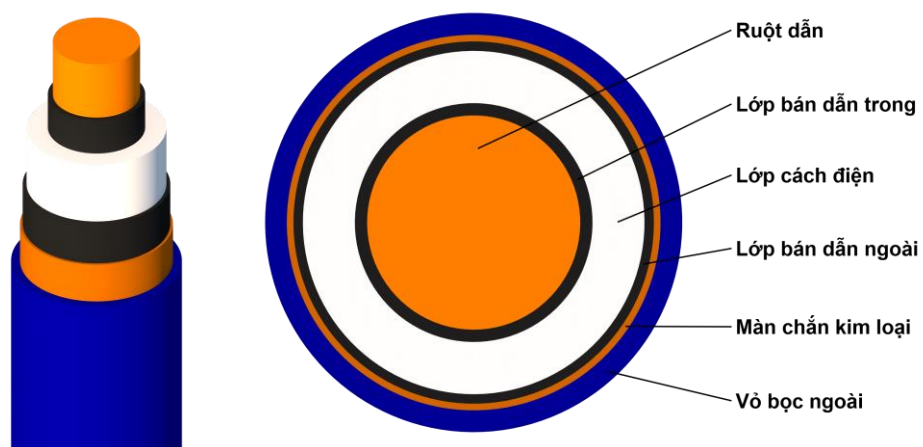
Để khắc phục những hạn chế này, chương 3 của đề án thực hiện mô phỏng và phân tích sự phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm MV, nhằm xác định nhiệt độ của lớp cách điện bên trong cáp. Thông qua việc sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics dựa trên FEM, nghiên cứu này phân tích và làm rõ mối quan hệ chặt chẽ giữa giá trị nhiệt độ bề mặt cáp (T_s) và nhiệt độ lớn nhất của cách điện cáp (T_{max}). Xuất phát từ đó, nhiệt độ lớp cách điện có thể được tính toán từ dữ liệu nhiệt độ bề mặt cáp, đảm bảo độ chính xác của dữ liệu nhiệt độ và hiệu quả của hệ thống cảnh báo, giúp giám sát điều kiện hoạt động của cáp một cách toàn diện hơn mà không cần tiếp xúc trực tiếp với cấu tạo bên trong cáp. Ngoài ra, nghiên cứu này góp phần xác định sự tương quan giữa nhiệt độ và dòng điện vận hành trong lõi dẫn của cáp. Sơ lược của phương pháp như sau: xác định tổn thất điện năng phụ thuộc vào dòng điện sinh ra trong lõi dẫn, giả định rằng lõi dẫn của cáp có hình trụ. Tổn thất điện năng tạo ra trong bộ phận này là hàm số của dòng điện và được xác định từ định luật Joule có tính đến các hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận. Tiếp theo, từ phương trình Fourier - Kirchhoff, sự phân phối nhiệt độ trong cáp được xác định.

3.1. MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT TRONG CÁP NGẦM TRUNG ÁP

Trong mô hình truyền nhiệt, cáp ngầm MV được giả định có chiều dài vô hạn để đơn giản hóa trong thực hiện tính toán và phân tích. Khi dòng điện chạy qua lõi dẫn, độ lớn của nhiệt lượng sinh ra tỷ lệ thuận với bình phương dòng điện và điện trở của lõi dẫn, nhiệt lượng gây ra quá trình khuếch tán nhiệt phức tạp trong cáp. Hiện nay, các nghiên cứu về phân bố nhiệt độ trong

cáp ngầm thường tập trung vào quá trình truyền nhiệt xuyên tâm trong không gian hai chiều (2D), do hướng từ lõi dẫn đến vỏ cáp là hướng phân tán chính của nhiệt lượng [23], [36], [69]. Nhiệt độ giảm dần từ lõi dẫn, nơi xuất hiện nhiệt độ cao nhất ra ngoài, qua các lớp vật liệu và tiếp tục giảm khi truyền ra không khí. Do đó, truyền nhiệt theo chiều xuyên tâm có ảnh hưởng lớn đến hiệu quả làm mát của cáp ngầm. Việc theo dõi nhiệt độ và duy trì ngưỡng nhiệt độ an toàn cho cách điện của cáp rất cần thiết để đảm bảo độ tin cậy và ổn định của đường dây.

Thành phần chính của đường dây cáp ngầm MV bao gồm các đoạn cáp, và được kết nối với nhau bằng các đầu mối nối cáp khi cần truyền tải và phân phối điện ở khoảng cách lớn. Cáp ngầm MV có cấu tạo gồm một hoặc nhiều lõi dẫn và được cấu thành từ nhiều lớp vật liệu. Việc lựa chọn chủng loại, cấu trúc cáp ngầm MV sẽ tùy thuộc vào yêu cầu, điều kiện vận hành xác định của đường dây. Trong nghiên cứu này, mô hình thực hiện dựa trên cáp ngầm MV một lõi của hãng CADIVI, có cấu tạo cơ bản biểu thị trong hình 3.1, gồm: lõi dẫn đồng, lớp bán dẫn trong của lõi dẫn, lớp cách điện polyme, lớp bán dẫn ngoài của cách điện, lớp màn chắn kim loại và lớp vỏ bọc bảo vệ polyme.



Hình 3.1. Cấu tạo mẫu cáp ngầm MV một lõi

Vật liệu cách điện trong cáp ngầm chịu ảnh hưởng của điện trường, phụ thuộc vào mức điện áp tác dụng, gây ra tổn thất điện môi trong cáp. Ngoài ra, các dòng điện xoáy có thể phát sinh trên lớp màn chắn kim loại nối đất của cáp. Nếu lớp bảo vệ được làm từ vật liệu từ tính, các tổn thất bổ sung do hiệu ứng từ trễ và dòng điện xoáy cũng sẽ xuất hiện, làm gia tăng tổn thất năng lượng và sinh nhiệt trong hệ thống cáp.

Nguyên nhân chủ yếu gây ra hiện tượng nóng lên trên cáp điện là do tổn thất điện năng trong khoảng thời gian t sinh ra bởi dòng điện I chạy qua lõi dẫn có điện trở R . Nhiệt lượng được chuyển hóa từ năng lượng điện, lan truyền ra môi trường từ lõi dẫn của cáp. Theo định luật Fourier, phương trình vi phân về truyền nhiệt được trình bày trong phương trình (3.1) [50].

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Trong đó, T là biến nhiệt độ (K), k là nhiệt dẫn suất của vật liệu ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), q_v là cường độ nguồn nhiệt theo thể tích (W/m^3), ρ là khối lượng riêng của vật liệu (kg/m^3) và c là nhiệt dung riêng của môi trường trung gian truyền nhiệt ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$). Nhiệt dẫn suất k mô tả mối quan hệ giữa vector thông lượng nhiệt q và gradient nhiệt độ ∇T qua công thức $q = -k \nabla T$.

Trong trạng thái đẳng nhiệt, vế phải của phương trình (3.1) sẽ biến mất, sự phân bố nhiệt độ được đưa ra bởi phương trình Poisson và các điều kiện về giới hạn nhiệt độ (điều kiện Dirichlet) hoặc dòng chảy nhiệt (điều kiện Neumann): $\nabla \cdot (k \nabla T) + q_v = 0$

Trong phân tích nhiệt trạng thái ổn định của môi trường hai chiều, phương trình (3.1) được đơn giản hóa bằng phương trình (3.2) [30]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q_v \quad (3.2)$$

Đối với bất kỳ vùng đồng nhất nào với nhiệt dẫn suất và tỷ lệ sinh nhiệt đã cho, phương trình (3.2) có thể được giải để xác định nhiệt độ tại bất kỳ điểm nào trong vùng đó, dựa trên các điều kiện biên được xác định.

Thông lượng nhiệt thể tích là một thông số quan trọng trong phân tích, do thông số định lượng tốc độ truyền năng lượng nhiệt trên mỗi đơn vị thể tích trong lõi dẫn của cáp, được mô tả bởi công thức (3.3).

$$Q_b(T_c) = \frac{P_b}{A} \quad (3.3)$$

Trong đó, A là diện tích mặt cắt hình học của lõi dẫn (m^2), và P_b là tổn thất nhiệt của cáp (W/m), chủ yếu do tổn thất Joule, có thể được tính toán thông qua công thức (3.4):

$$P_b = I^2 R_{ac} \quad (3.4)$$

Điện trở AC của lõi dẫn cáp, khác với điện trở DC, khi hai cáp liên kết được cấp điện bằng dòng điện xoay chiều, hiện tượng hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận sẽ xảy ra, dẫn đến sự thay đổi của điện trở AC. Điện trở AC có thể được biểu thị dưới dạng một hàm số của điện trở DC với hệ số hiệu ứng bề mặt và hệ số hiệu ứng lân cận tương ứng, và được tính toán bằng công thức (3.5) theo tiêu chuẩn IEC 60287-1-2 [33]:

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + \gamma_s + \gamma_p) \quad (3.5)$$

Trong đó, R_{ac} là giá trị điện trở AC của lõi dẫn trên một đơn vị chiều dài (Ω/m), R_{dc} là giá trị điện trở DC của lõi dẫn trên một đơn vị chiều dài (Ω/m), ở nhiệt độ T có thể thu được theo công thức (3.6):

$$R_{dc} = R_{ref} \left[1 + \alpha_{ref} (T(x, y) - T_{ref}) \right] \quad (3.6)$$

Trong đó, R_{ref} và α_{ref} lần lượt là điện trở tham chiếu của lõi dẫn cáp và hệ số nhiệt điện trở của vật liệu lõi dẫn, cả hai đều được xác định ở nhiệt độ tham

chiều $T_{ref} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. $T(x,y)$ là nhiệt độ hoạt động của lõi dẫn. Đối với vật liệu đồng ở $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{20} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$. Điện trở tham chiếu của lõi dẫn cáp được tính theo công thức (3.7):

$$R_{ref} = \frac{\rho_{20}}{A} \quad (3.7)$$

Trong đó, ρ_{20} là điện trở suất của vật liệu lõi dẫn ở $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Omega \cdot \text{m}$). Đối với vật liệu đồng, $\rho_{20} = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (bảng 3.2).

Ta có γ_s và γ_p lần lượt là hệ số hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận, trình bày trong công thức (3.8), (3.9), (3.10) và (3.11) theo IEC 60287-1-2 [33]:

$$\gamma_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (3.8)$$

Trong đó:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_s \quad (3.9)$$

$$\gamma_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (3.10)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_p \quad (3.11)$$

Với f là tần số dòng điện xoay chiều đi qua lõi dẫn của cáp (Hz), d_c là đường kính lõi dẫn (m), s là khoảng cách giữa các trục lõi dẫn liền kề (m), x_s và x_p lần lượt là đối số của hàm Bessel được sử dụng để tính hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận, k_s và k_p lần lượt là hệ số điều chỉnh hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận.

Trong quá trình tính toán mô hình truyền nhiệt, việc xác định chính xác các điều kiện biên tương ứng là yếu tố quyết định để đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng, đồng thời phản ánh đầy đủ các điều kiện vận hành thực tế của hệ thống. Quá trình truyền nhiệt được trình bày bởi sự thay đổi năng lượng nhiệt do chênh lệch nhiệt độ. Có ba cơ chế chính liên quan đến truyền nhiệt: dẫn nhiệt, đối lưu nhiệt và bức xạ nhiệt, mỗi cơ chế đóng vai trò khác nhau tùy thuộc vào điều kiện môi trường và cấu trúc vật liệu. Các cơ chế được mô tả như sau:

- Dẫn nhiệt là quá trình trao đổi năng lượng giữa các phân tử trong một chất khi có sự chênh lệch nhiệt độ, quá trình xảy ra thông qua tương tác trực tiếp. Cơ chế này diễn ra trong cả chất rắn, chất lỏng và chất khí, được giải thích dựa trên thuyết động học phân tử của vật lý. Cơ chế dẫn nhiệt được trình bày trong phương trình (3.1), nhằm thiết lập quá trình khuếch tán nhiệt liên tục từ các vùng nóng sang các vùng lạnh. [50]

- Đối lưu nhiệt là cơ chế truyền nhiệt xuất hiện trong chất lỏng hoặc khí, thông qua sự kết hợp giữa dẫn nhiệt và chuyển động khối. Cơ chế này được xem xét với một tình huống điển hình: khi khí lạnh chảy qua một vật thể nóng. Lớp chất lỏng nằm ngay sát vật thể có tốc độ dòng chảy giảm, tạo ra một vùng mỏng, được gọi là lớp ranh giới. Nhiệt được cuốn trôi đi về phía hạ lưu sau khi quá trình truyền dẫn vào lớp ranh giới, cuối cùng nhiệt bão hòa vào trong dòng chảy chính. [50]

- + Đối lưu nhiệt bao gồm hai loại chính: đối lưu tự nhiên (xảy ra là do sự khác biệt mật độ liên quan đến gradient nhiệt) và đối lưu cưỡng bức (khi xuất hiện ngoại lực tác động vào sự chuyển động của chất lỏng hoặc khí).

- + Điều kiện truyền nhiệt đối lưu mô tả trong phương trình (3.12):

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h(T_o - T_w) \quad (3.12)$$

Trong đó, h là hệ số truyền nhiệt đối lưu giữa biên trên của khu vực khép kín và không khí xung quanh ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), k là nhiệt dẫn suất của vật liệu ($\text{W/m} \cdot \text{K}$), T_o là nhiệt độ tại biên trên của khu vực khép kín (K) và T_w là nhiệt độ của không khí (K).

– Bức xạ nhiệt là quá trình truyền năng lượng nhiệt giữa hai bề mặt dưới dạng sóng điện từ, có thể xảy ra ngay cả trong môi trường chân không. Bức xạ nhiệt là một dạng năng lượng điện từ, thể hiện các tính chất giống sóng ánh sáng hoặc sóng vô tuyến. Mỗi lượng tử năng lượng bức xạ được đặc trưng bởi bước sóng λ và tần số ν . [50]

+ Thành phần chính của bức xạ nhiệt thường là phổ bức xạ hồng ngoại.

+ Điều kiện truyền nhiệt bức xạ mô tả trong phương trình (3.13):

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \rho \varepsilon (T_o^4 - T_w^4) \quad (3.13)$$

Trong đó, ρ là hằng số Stefan-Boltzmann, ε là độ phát xạ bề mặt (W/m^2), T_o là nhiệt độ bề mặt chưa xác định (K) và T_w là nhiệt độ trao đổi của đối lưu hoặc bức xạ (K). Phương trình (3.13) được xem xét để bao gồm điều kiện biên bức xạ giữa bề mặt ngoài của cáp và bề mặt bên trong của ống dẫn. Phương trình (3.13) có thể được trình bày lại, mô tả trong phương trình (3.14):

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_r (T_o - T_w) \quad (3.14)$$

Truyền nhiệt bức xạ $h_r(T)$ được định nghĩa theo công thức (3.15) [30]:

$$h_r(T) = \rho \varepsilon (T_o^2 + T_w^2) (T_o + T_w) \quad (3.15)$$

Trong tính toán mô hình truyền nhiệt của nghiên cứu, giả thiết rằng mô hình cáp ngầm MV mới, không xuất hiện các khuyết tật hoặc hư hỏng, và cần xác định các điều kiện biên tương ứng. Trong nghiên cứu này có hai loại điều kiện biên chính, bao gồm:

1) Nhiệt độ tại biên được biết trước và không đổi. Trong điều kiện mô phỏng, giá trị nhiệt độ thu thập từ cảm biến nhiệt độ đặt tại bề mặt vỏ cáp. Do đó, mô hình đã tích hợp truyền nhiệt đối lưu và truyền nhiệt bức xạ vào điều kiện biên nhiệt độ thu được từ cảm biến.

2) Giá trị dòng điện chạy qua lõi dẫn. Thực hiện tính toán tổn thất điện năng gây ra trong điều kiện có tính đến hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng lân cận, nhằm xác định giá trị dòng nhiệt tại biên.

Điều kiện nhiệt độ tại biên không đổi theo phương trình (3.16):

$$T|_{\Gamma} = T_s \quad (3.16)$$

Trong đó, T_s là nhiệt độ tại biên (K), giữ không đổi. Điều kiện biên của lớp đất được xem xét trong nghiên cứu là lớp đất sâu, với nhiệt độ là 20 °C.

Điều kiện mật độ dòng nhiệt tại biên theo phương pháp pha theo phương trình (3.17):

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = -q_w \quad (3.17)$$

Trong đó, k là nhiệt dẫn suất của vật liệu (W/m·K), q_w là mật độ dòng nhiệt xác định (W/m²).

3.2. PHƯƠNG PHÁP SỐ VÀ MẪU CÁP

3.2.1. Mẫu cáp

Đề án thực hiện phân tích sự phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm MV thông

qua mô hình mặt cắt 2D của cáp, với giả định cáp có chiều dài vô hạn nhằm bỏ qua ảnh hưởng không đáng kể của tổn hao nhiệt theo phương dọc trục [23]. Đồng thời, nhiệt độ bề mặt cáp được giả định đồng nhất tại mọi điểm, giúp đơn giản hóa mô hình, khắc phục hạn chế về thời gian thực hiện và tập trung vào cơ chế truyền nhiệt bên trong kết cấu cáp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng đến việc xây dựng và thiết lập cấu hình giám sát tại một điểm điển hình bất kỳ trên bề mặt cáp, từ đó đảm bảo tính đại diện trong đánh giá đặc tính phân bố nhiệt độ.

Các thông số kỹ thuật của cáp và đặc tính vật liệu cấu thành cáp được thiết lập trong mô hình mô phỏng, dựa trên thông số liệt kê trong bảng 3.1 và bảng 3.2. Mẫu cáp sử dụng trong mô hình là cáp ngầm MV một lõi, không có giáp bảo vệ của hãng CADIVI, có cấp điện áp tiêu chuẩn 12/20 (24) kV hoặc 12,7/22 (24) kV.

Bảng 3.1. Thông số kỹ thuật của cáp ngầm MV [66]

Tiết diện lõi dẫn (mm ²)	Chiều dày cách điện (mm)	Chiều dày lớp vỏ (mm)	Chiều dày lớp bán dẫn trong (mm)	Chiều dày lớp bán dẫn ngoài (mm)	Chiều dày lớp màn chắn (mm)	Đường kính tổng (mm)
400	5,5	2,3	1,3	1,0	0,7	44,1

Bảng 3.2. Đặc tính vật liệu cấu thành cáp ngầm MV [27], [52]

Cấu trúc	Vật liệu	Nhiệt dẫn suất k (W/m·K)	Nhiệt dung riêng c (J/kg·K)	Khối lượng riêng ρ	Điện dẫn suất σ_{20} ở 20 °C	Điện trở suất ρ_{20} ở 20 °C
----------	----------	----------------------------	-------------------------------	-------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

				(kg/m ³)	(S/m)	(Ω·m)
Lõi dẫn	Đồng	400	385	8940	$5,96 \cdot 10^7$	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Lớp bán dẫn trong	Hợp chất bán dẫn (polyetylen pha với carbon black)	0,2875	2200	940	$5,99 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Lớp cách điện	XLPE	0,2875	2526	1200	-	-
Lớp bán dẫn ngoài	Hợp chất bán dẫn (polyetylen pha với carbon black)	0,2875	2200	940	$5,99 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Màn chắn kim loại	Đồng	400	385	8940	$5,96 \cdot 10^7$	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Lớp vỏ	HDPE	0,2875	2200	950	-	-

Ngoài ra, nhiệt độ môi trường bên ngoài và nhiệt độ tham chiếu cho vật liệu được giả định có giá trị 20 °C [33]. Trong mô phỏng, truyền nhiệt bức xạ

và đối lưu tự nhiên đã được tính đến, dữ liệu cuối cùng thu được là nhiệt độ tại bề mặt ngoài của vỏ cáp - vị trí đặt cảm biến nhiệt độ trong hệ thống giám sát.

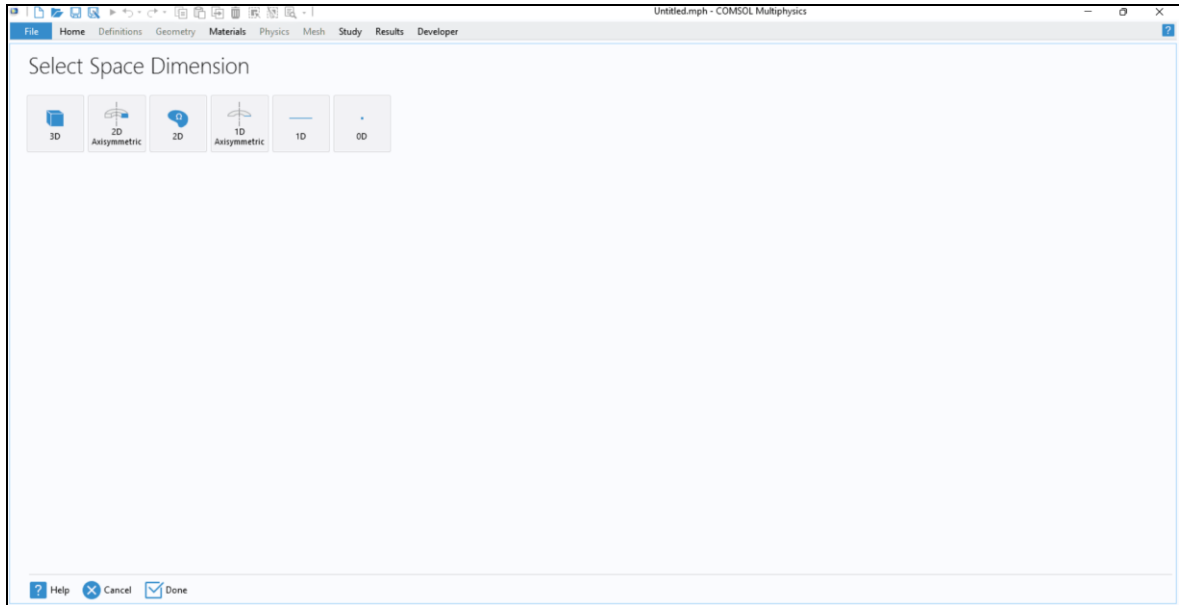
Sự phân bố nhiệt độ trong cáp được tính toán trong các trường hợp hoạt động của cáp, dựa trên sự thay đổi của hai thông số chính, bao gồm dòng điện có tần số 50 Hz chạy qua lõi dẫn và giá trị nhiệt độ thu được từ cảm biến nhiệt độ đặt trên bề mặt cáp T_s . Mô hình mô phỏng được thực hiện dưới điều kiện thay đổi giá trị nhiệt độ T_s trong dải từ 30 đến 85 °C với bước biến thiên 5 °C, trong khi dòng điện vận hành được điều chỉnh từ 200 A đến giá trị dòng điện cho phép của cáp nghiên cứu là 590 A [34].

3.2.2. Phương pháp số

Trong bài toán kỹ thuật, các phương trình toán học phức tạp thường không thể giải chính xác bằng các phương pháp giải tích thông thường. Do đó, các phương pháp xấp xỉ số được áp dụng để tìm ra nghiệm gần đúng cho các bài toán phức tạp này, trong đó FEM một trong những kỹ thuật được ứng dụng phổ biến nhất [31], [40]. Trong nghiên cứu này, FEM áp dụng để giải các phương trình (3.1), (3.2) và công thức (3.3) (mục 3.1), nhằm mô tả quá trình truyền nhiệt trong cáp ngầm MV. Phần mềm COMSOL Multiphysics được sử dụng dựa trên FEM để thực hiện các phân tích, giúp mô phỏng và tính toán sự phân bố nhiệt độ trong cáp.

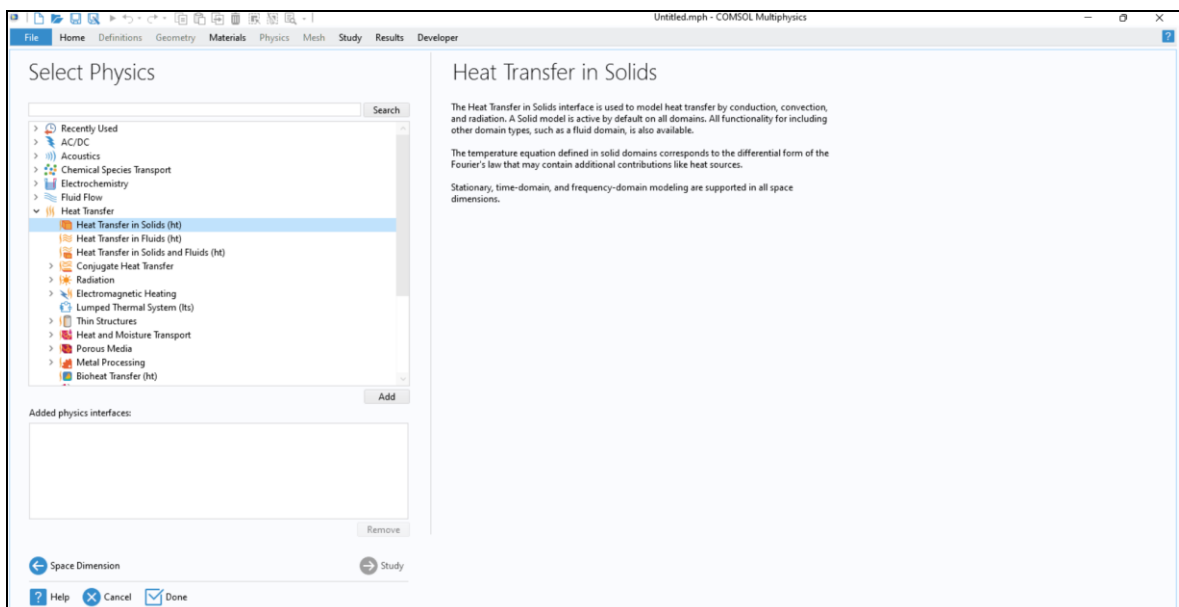
Khi khởi động COMSOL Multiphysics, cửa sổ giao diện Untitled.mph - COMSOL Multiphysics xuất hiện, chi tiết được thể hiện trên hình 3.2. Người sử dụng có thể khởi tạo một mô hình mới bằng cách lựa chọn kích thước không gian và chế độ ứng dụng trong *Select Space Dimension*. Các tùy chọn bao gồm không gian không chiều, một chiều (hoặc một chiều đối xứng trục),

hai chiều (hoặc hai chiều đối xứng trục) hoặc ba chiều, phù hợp với yêu cầu phân tích và đặc điểm của bài toán cần mô phỏng.



Hình 3.2. Cửa sổ Untitled.mph - COMSOL Multiphysics

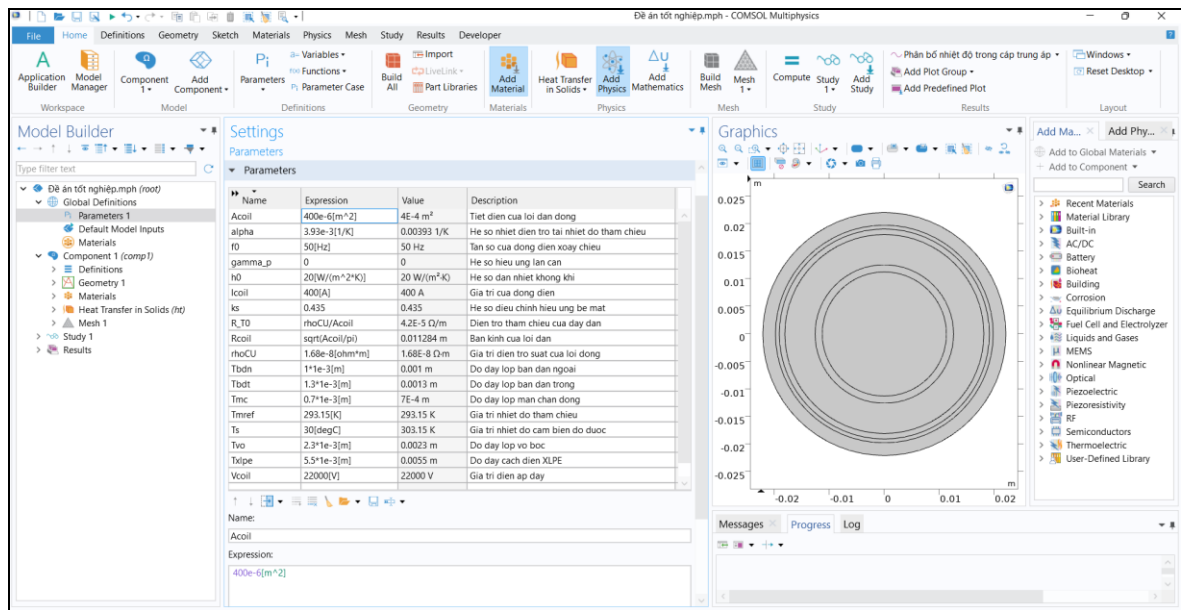
Mô hình của nghiên cứu thực hiện trên mặt cắt 2D của cáp ngầm MV, thực hiện chọn 2D, tiếp tục mở ra cửa sổ mô-đun trong giao diện *Select Physics* minh họa trong hình 3.3:



Hình 3.3. Mô-đun các trường làm việc

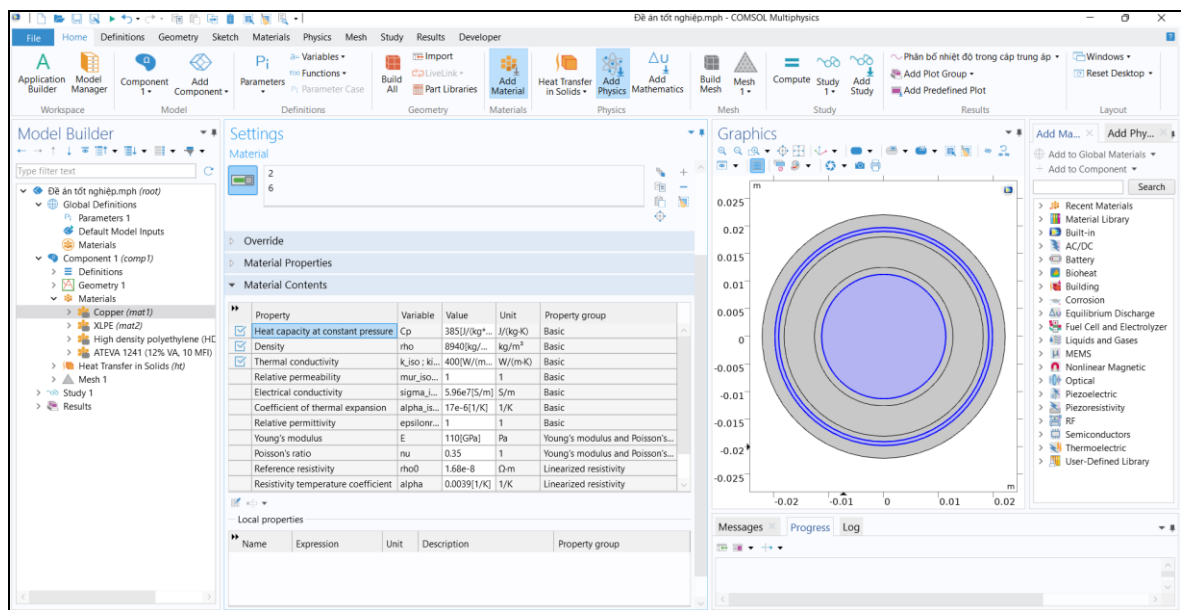
Trong đề án này, để thực hiện xác định sự phân bố nhiệt độ trong cách điện cáp, tôi sử dụng giao diện *Truyền nhiệt trong chất rắn (Heat Transfer in Solids)* trong mô-đun *Truyền nhiệt (Heat Transfer)*. Mô-đun *Truyền nhiệt* trong COMSOL Multiphysics hỗ trợ đầy đủ các cơ chế truyền nhiệt, bao gồm dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ nhiệt. Nhờ tích hợp chức năng đa vật lý, phần mềm cho phép mô phỏng trường nhiệt độ đồng thời với các hiện tượng vật lý khác, giúp cải thiện độ chính xác của mô hình và phản ánh đầy đủ các điều kiện vận hành thực tế. Mô hình toán học mô tả quá trình truyền nhiệt thông qua cơ chế dẫn nhiệt trong vật liệu rắn đã được tích hợp trong phần mềm COMSOL. Các phương trình (3.1) và (3.2) trình bày trong mục 3.1 được sử dụng để thiết lập và giải bài toán nhiệt.

FEM được áp dụng như một công cụ tính toán số hiệu quả để phân tích các đặc tính nhiệt cáp ngầm. Bước khởi đầu trong phương pháp này là tạo lập khối mô hình hình học của cấu trúc cáp. Do đó, thực hiện thiết lập các thông số kỹ thuật trong mô phỏng, giao diện xây dựng mô hình trong phần mềm COMSOL Multiphysics thể hiện trên hình 3.4. Trong mục *Model Builder* chọn *Global Definitions*, thông số kỹ thuật mô hình được thiết lập trong cửa sổ *Parameters*.



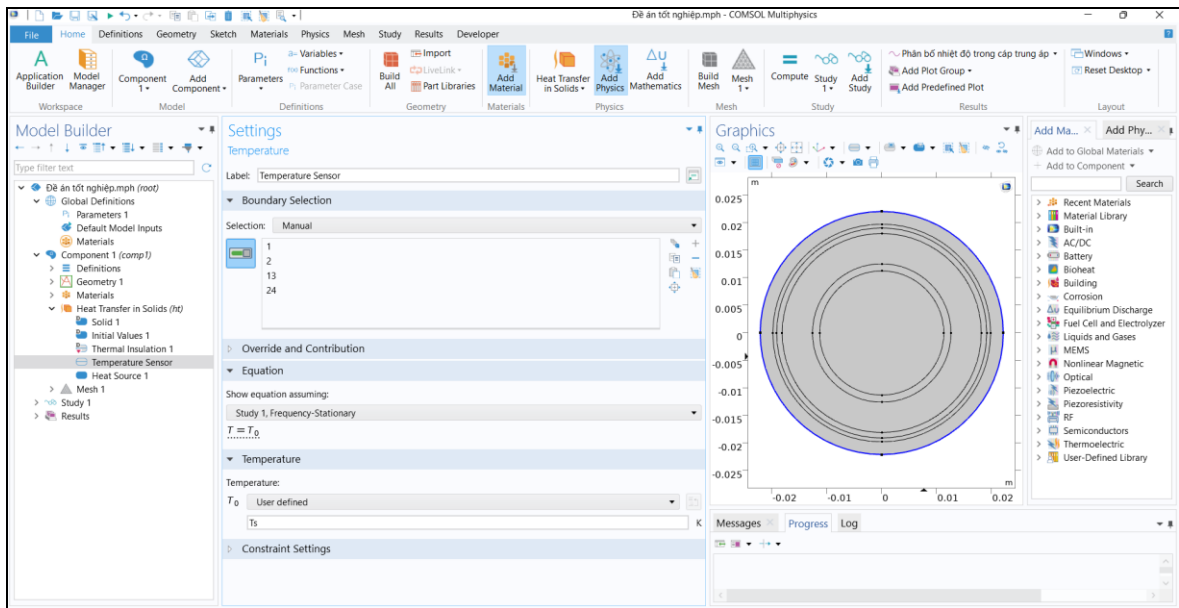
Hình 3.4. Thông số kỹ thuật mô hình mô phỏng

Sau đó, thực hiện thiết lập các thông số đặc tính vật liệu cấu thành cáp, bao gồm các vật liệu: đồng, XLPE, HDPE và hợp chất bán dẫn. Giao diện thiết lập trong cửa sổ *Materials* của phần mềm COMSOL Multiphysics mô tả trên hình 3.5. Dữ liệu thiết lập dựa trên thông số đã liệt kê trong bảng 3.2 (mục 3.2.1).



Hình 3.5. Thông số đặc tính vật liệu cấu thành cáp

Giao diện thiết lập điều kiện biên nhiệt độ của mô hình được thể hiện trong hình 3.6. Dựa trên nhiệt độ cố định tại biên, điều kiện này giúp phần mềm xác định phân bố nhiệt độ phía bên trong mô hình. Theo đó, có thể thiết lập mô phỏng các trường hợp xác định trong thực tế, khi các giá trị nhiệt độ bề mặt cáp ngầm có thể thay đổi.

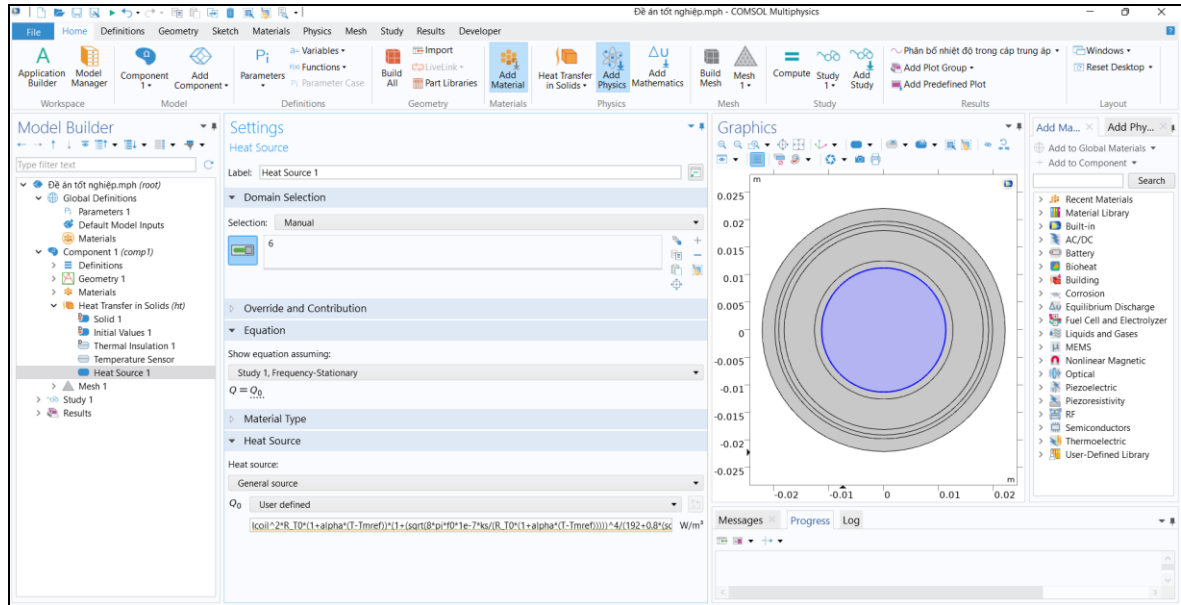


Hình 3.6. Điều kiện biên nhiệt độ của mô hình

Thêm vào đó, điều kiện biên của nguồn nhiệt trong mô hình có vai trò quan trọng trong phân tích sự phân bố nhiệt độ, giao diện thiết lập điều kiện biên của nguồn nhiệt thể hiện trên hình 3.7. Điều kiện này áp dụng cho lõi đồng của cáp, giúp tính toán sự ảnh hưởng của nguồn nhiệt tới các vùng lân cận trong mô hình.

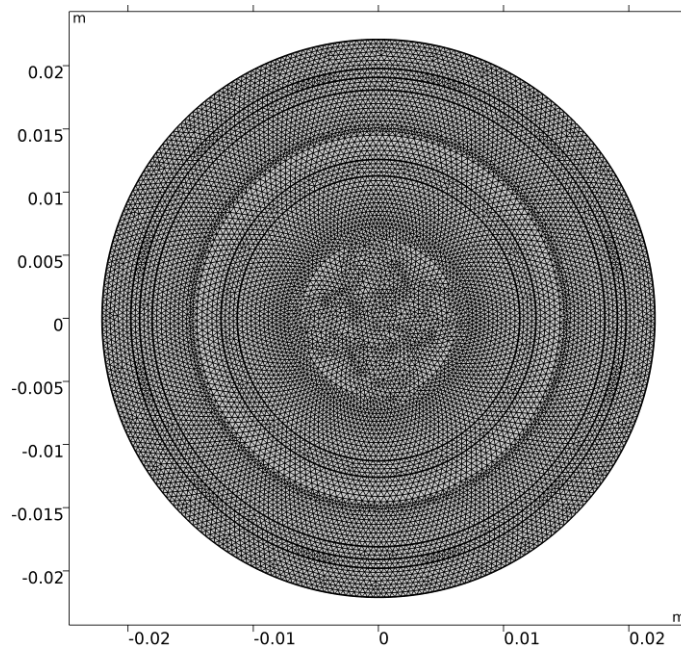
Nguồn nhiệt lượng Q trong phương trình (3.1) được hiểu là năng lượng sinh ra trên mỗi đơn vị thể tích trong vật liệu. Đối với cáp điện, Q đại diện cho mật độ công suất tiêu hao do hiệu ứng Joule, xảy ra khi dòng điện chạy qua lõi dẫn điện của cáp. Đại lượng Q phụ thuộc vào giá trị dòng điện và điện trở suất (phụ thuộc vào nhiệt độ) của lõi dẫn trong cáp. Sự phụ thuộc của điện dẫn suất theo nhiệt độ được đưa vào tính toán thông qua hệ số α . Trên cơ sở

đó, mật độ tiêu hao năng lượng Q trong lõi cáp được biểu diễn theo công thức (3.3) (mục 3.1).



Hình 3.7. Điều kiện biên nguồn nhiệt của mô hình

Sau khi thiết lập hình học và gán tính chất vật lý, bước thực hiện tiếp theo là chia lưới cho mô hình. Cấu trúc chia lưới trên mặt cắt 2D của cáp, như mô tả trong hình 3.8, minh họa cách phân chia không gian tính toán thành các phần tử nhỏ để áp dụng FEM. Lưới được sử dụng cho hình học mô hình có vai trò then chốt trong cách giải quyết mô hình, do lưới thiết lập các đặc điểm như: cách chia hình học, hình dạng hình học được chia, kích thước, mật độ, số lượng phần tử trong hình học và chất lượng phần tử. Quá trình tính toán bị ảnh hưởng trực tiếp bởi các yếu tố trên, bao gồm thời gian mô hình giải quyết, lượng bộ nhớ cần thiết để tính toán, cách nội suy giải pháp giữa các nút, độ hội tụ và độ chuẩn xác của giải pháp. Trong mô hình, các phần tử lưới có hình dạng hình tam giác, lưới được thiết lập như sau: lưới do người dùng điều khiển. Toàn bộ lưới được định nghĩa trước: kích thước phần tử tối đa là $4,73 \cdot 10^{-4}$ m, kích thước phần tử tối thiểu là $9,47 \cdot 10^{-7}$ m với hệ số cong bằng 0,2.



Hình 3.8. Chia lưới mặt cắt 2D cáp ngầm

3.3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

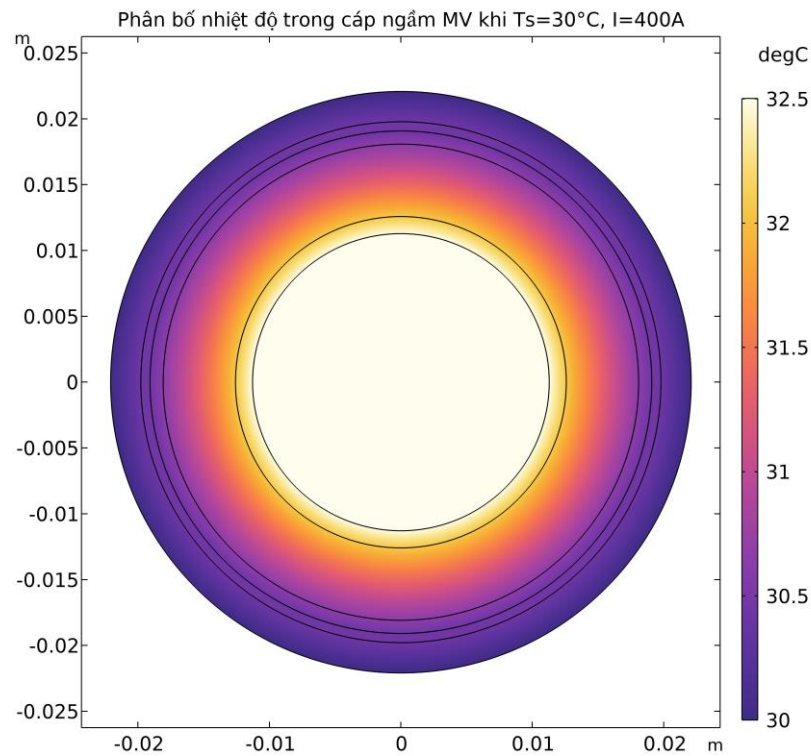
3.3.1. Phân tích trạng thái xác lập của sự phân bố nhiệt độ trong quá trình vận hành

Kết quả phân bố nhiệt độ trong cáp MV trong khoảng thời gian vận hành từ 1 h đến 24 h khi $I = 400 \text{ A}$, $T_s = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, thể hiện trên hình 3.9b. Trong trường hợp mô phỏng, sự phân bố nhiệt độ trong cáp đạt ngưỡng tiệm cận chế độ hoạt động xác lập sau khoảng 6 h vận hành. Trong khoảng thời gian tiếp theo sau 6 h vận hành, sự phân bố nhiệt độ trong cáp có sự biến động tương đối nhỏ, các đường phân bố nhiệt độ gần như trùng nhau với các khoảng thời gian vận hành bằng 6 h, 12 h, 18 h và 24 h.

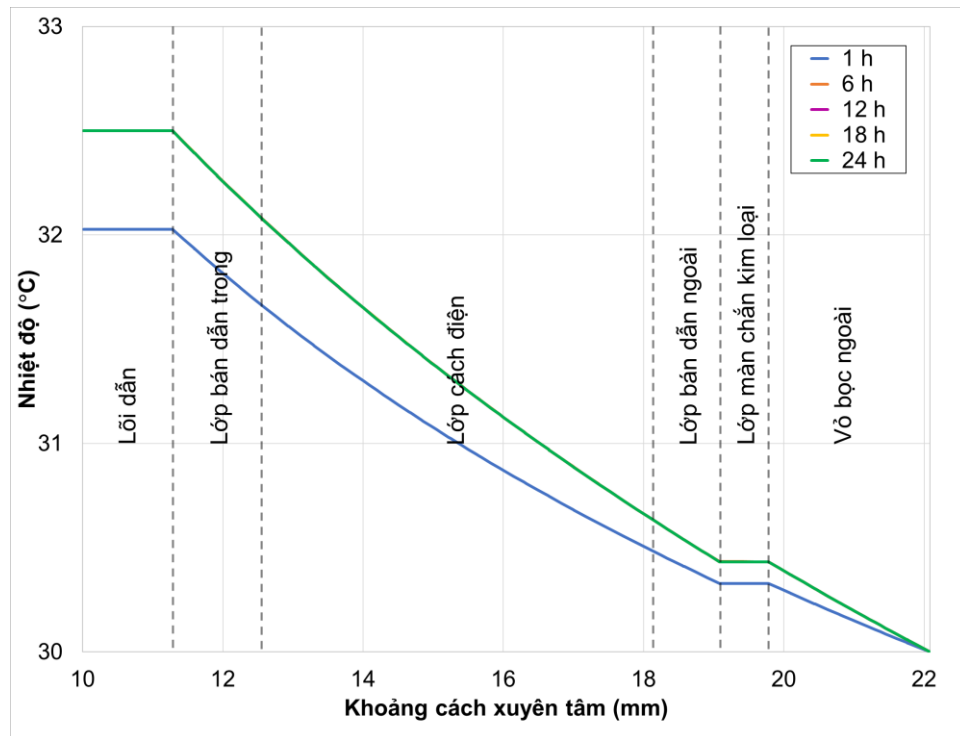
Dựa trên kết quả ban đầu thu được, việc đánh giá phân bố nhiệt độ xuyên suốt nghiên cứu này sẽ tập trung phân tích trạng thái nhiệt độ xác lập của cáp trong quá trình vận hành. Ở trạng thái này, nhiệt lượng sinh ra bên trong cáp do tổn thất điện năng đạt mức cân bằng với nhiệt lượng tản ra môi trường qua các lớp cách điện và bảo vệ. Khi trạng thái nhiệt độ ổn định được thiết lập,

cáp sẽ hoạt động mà không có sự gia tăng nhiệt độ theo thời gian, đảm bảo tính cân bằng về nhiệt. Mô phỏng trạng thái nhiệt xác lập nhằm xác định giới hạn vận hành an toàn của cáp, giúp tối ưu hóa thiết kế và dự đoán hành vi nhiệt trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt.

Kết quả mô phỏng trong hình 3.9 thể hiện phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm MV khi $I = 400\text{ A}$ và $T_s = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bao gồm kết quả phân bố nhiệt độ đồng tâm trong mặt cắt 2D của cáp (hình 3.9a) và kết quả phân bố nhiệt độ theo khoảng cách xuyên tâm (hình 3.9b). Hai biểu đồ cùng biểu thị chi tiết sự phân bố nhiệt độ không đồng đều trong cáp, phản ánh sự thay đổi nhiệt độ tại từng lớp vật liệu và cơ chế truyền nhiệt trong cấu trúc cáp.



a)



b)

Hình 3.9. Phân bố nhiệt độ trong cáp MV khi $I = 400$ A và $T_s = 30$ °C: a) mặt cắt 2D ở chế độ xác lập, b) theo khoảng cách xuyên tâm trong khoảng thời gian vận hành từ 1 h đến 24 h

Biểu đồ phân bố nhiệt độ trong mặt cắt 2D thể hiện trong hình 3.9a, giá trị nhiệt độ lớn nhất trong cáp xuất hiện tại lõi dẫn đồng đạt khoảng 32,5 °C. Nhiệt độ $T_{\max}$ đạt khoảng 32,07 °C, trong khi nhiệt độ bề mặt cáp T_s là 30 °C, thấp hơn khoảng 2,07 °C so với $T_{\max}$. Kết quả mô phỏng hình 3.9a chỉ ra tính đối xứng quay quanh trục xuyên tâm của sự phân bố nhiệt độ trong cáp. Trên cơ sở đó, việc giám sát nhiệt độ sẽ cần chú ý đến yếu tố này, để đảm bảo rằng trong cấu trúc cáp không xuất hiện những khu vực bất đối xứng - vị trí có thể tồn tại sự gia tăng nhiệt độ cục bộ.

Trong hình 3.9b, biểu đồ phân bố nhiệt độ theo khoảng cách xuyên tâm đã biểu thị cơ chế truyền nhiệt phức tạp trong cáp. Sự truyền nhiệt diễn ra từ nguồn nhiệt chính (lõi dẫn) qua lớp bán dẫn trong, lớp cách điện, lớp bán dẫn

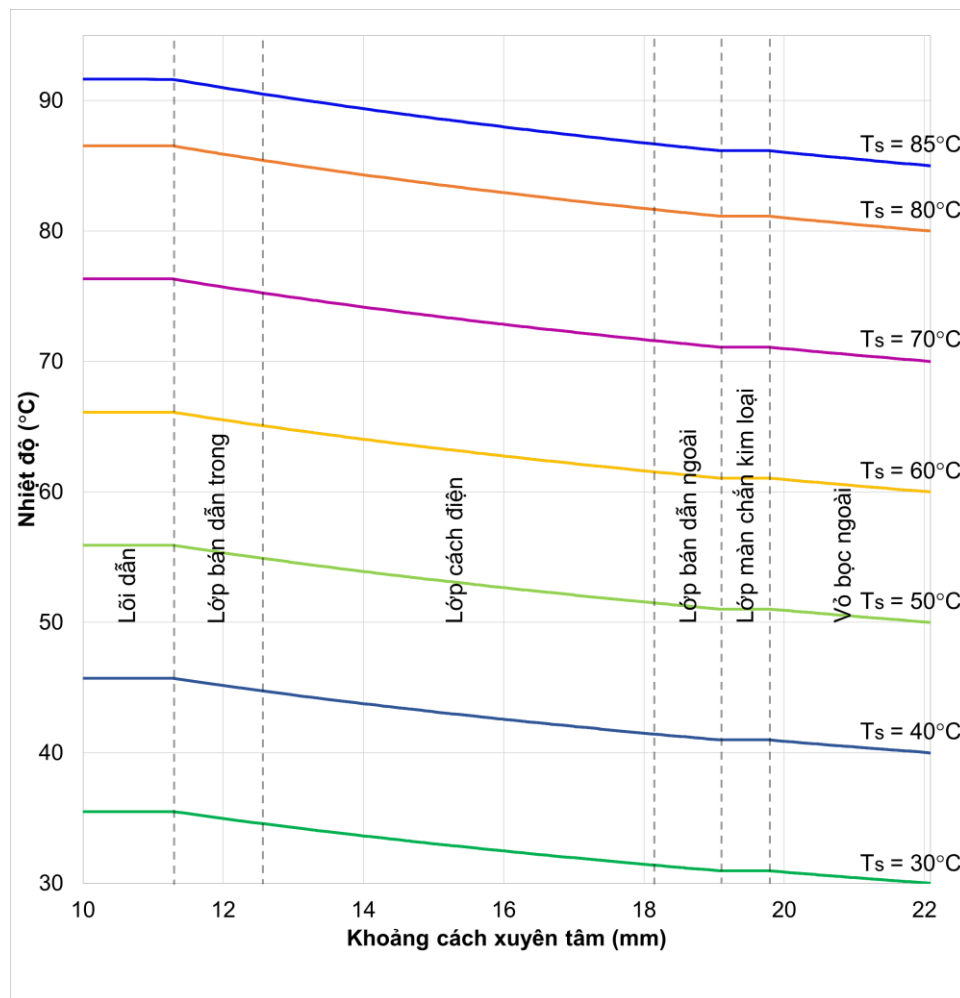
ngoài, lớp màn chắn và lớp vỏ. Nhiệt độ trong cáp có xu hướng giảm dần theo khoảng cách xuyên tâm, và bị chi phối bởi sự khác biệt trong đặc tính vật liệu và thông số kỹ thuật của các lớp vật liệu cấu thành cáp. Với lớp cách điện XLPE, thành phần có độ dày cấu tạo lớn và nhiệt dẫn suất k thấp ($k = 0,2875 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ảnh hưởng chủ yếu đến sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt cáp và cấu trúc bên trong cáp. Sự không đồng đều nhiệt độ giữa các lớp vật liệu cũng phản ánh tính chất truyền nhiệt phi tuyến theo hướng xuyên tâm. Đồng thời nhấn mạnh vai trò của từng lớp vật liệu trong việc quyết định hiệu quả của quá trình truyền nhiệt, điều hòa và phân phối nhiệt lượng sinh ra từ lõi dẫn. Khả năng dẫn nhiệt của các lớp vật liệu đảm bảo rằng nhiệt lượng được phát tán ra môi trường xung quanh, nhờ đó nhiệt độ trong cáp sẽ giảm dần một cách liên tục và không gây ra hiện tượng tích tụ nhiệt trong cấu trúc cáp.

3.3.2. Phân bố nhiệt độ trong cách điện cáp khi vận hành với dòng điện định mức và các giá trị khác nhau của nhiệt độ bề mặt cáp (T_s)

Kết quả mô phỏng trong hình 3.10 thể hiện sự phân bố nhiệt độ theo khoảng cách xuyên tâm của cáp ngầm MV với mức dòng điện định mức 590 A khi T_s thay đổi từ 30°C đến 85°C . Sự chênh lệch nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$ dao động trong khoảng từ $4,5^\circ\text{C}$ đến $5,5^\circ\text{C}$.

Sự phân bố nhiệt độ biểu thị hướng truyền nhiệt xuyên tâm trong mặt cắt 2D của cáp, kết quả này tương đồng với kết quả đã được trình bày trong mục 3.3.1 khi $I = 400 \text{ A}$ và $T_s = 30^\circ\text{C}$. Xuất phát từ đó, nghiên cứu nhấn mạnh rằng nhiệt dẫn suất k và độ dày lớp vật liệu có tác động đáng kể trong quá trình khuếch tán nhiệt, đặc biệt với lớp cách điện XLPE, nơi các yếu tố này ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng vận hành ổn định của cáp ngầm. Ngoài ra, sự suy giảm nhiệt độ cho thấy sự tồn tại của tổn hao nhiệt và tổn hao điện môi trong các lớp vật liệu của cáp. Qua mô phỏng, với trường hợp nhiệt độ cảm

biến đo được $T_s = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, thu được giá trị nhiệt độ $T_{\max} = 75,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, trong khi đó, với trường hợp nhiệt độ cảm biến $T_s = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, giá trị nhiệt độ $T_{\max} = 65,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Điều này chỉ ra sự chi phối của nhiệt độ T_s tới độ chênh lệch nhiệt độ T_s và $T_{\max}$, mức độ chênh lệch gia tăng khi nhiệt độ T_s tăng lên. Từ cơ sở đó, khi cáp ngầm được thiết kế vận hành trong điều kiện phụ tải lớn hoặc nơi có nhiệt độ môi trường khắc nghiệt, việc tính toán và theo dõi sự phân bố nhiệt độ trong cáp cần phải đặc biệt chú ý.



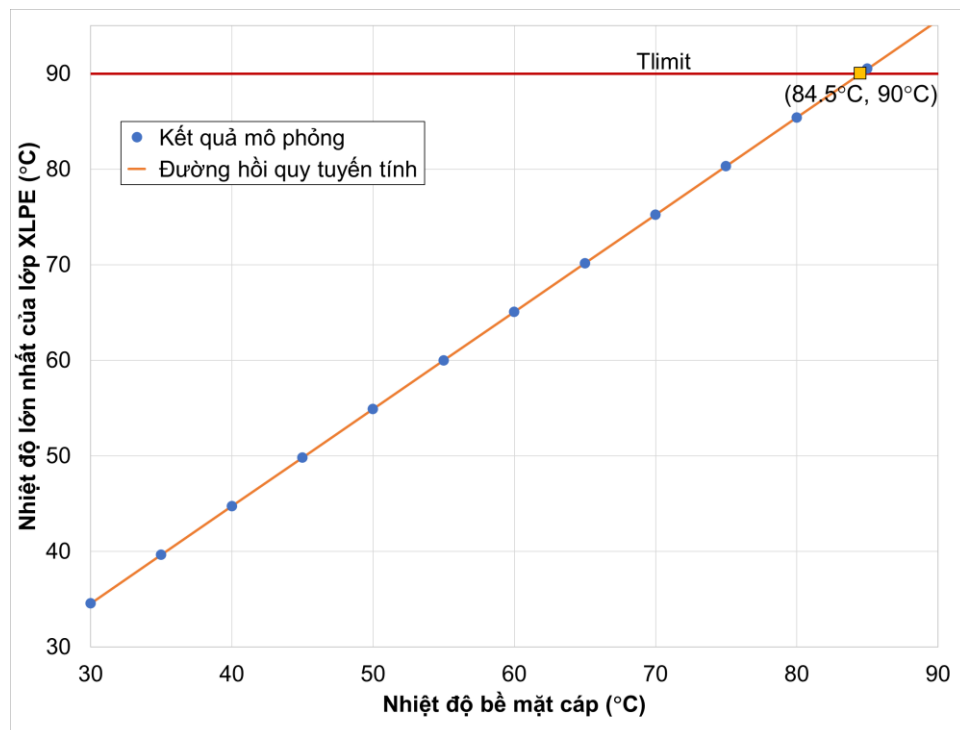
Hình 3.10. Phân bố nhiệt độ trong cáp MV khi $I = 590\text{ A}$ tại các giá trị T_s khác nhau

Sự tương quan giữa giá trị nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$ khi $I = 590\text{ A}$ và tại các giá trị T_s khác nhau, được biểu diễn trên biểu đồ hình 3.11. Trong biểu đồ, các điểm chấm tròn màu xanh thể hiện kết quả mô phỏng số và đường

thẳng màu cam biểu thị mối quan hệ xấp xỉ tuyến tính của hai giá trị T_s và T_{max} . Mối quan hệ này được mô tả bằng phương trình hồi quy tuyến tính, biểu diễn dưới dạng phương trình (3.18):

$$T_{max} = aT_s + b \quad (3.18)$$

Trong đó, tham số a phản ánh biến động của nhiệt độ T_{max} với sự thay đổi của nhiệt độ T_s . Giá trị a quyết định độ dốc của phương trình hồi quy tuyến tính, và bị ảnh hưởng bởi mức dòng điện vận hành, điều này được minh chứng rõ ràng thông qua sự gia tăng độ dốc của đường tuyến tính khi dòng điện tăng lên. Giá trị b là hằng số biểu thị sự chênh lệch ban đầu giữa T_{max} và T_s , thường do quá trình truyền nhiệt theo hướng xuyên tâm không tức thời từ lõi dẫn đến vỏ cáp. Sự chênh lệch ban đầu ảnh hưởng bởi các yếu tố như cấu trúc thiết kế của cáp, nhiệt dẫn suất k của vật liệu chế tạo và các điều kiện môi trường xung quanh.



Hình 3.11. Mối quan hệ giữa giá trị nhiệt độ T_s và nhiệt độ T_{max} , khi $I = 590$ A tại các giá trị T_s khác nhau

Có thể thấy rằng trong cùng một mức dòng điện vận hành $I = 590 \text{ A}$, sự gia tăng nhiệt độ $T_{\max}$ gần như tuyến tính với sự gia tăng của nhiệt độ T_s . Theo nghiên cứu của Anders (1997), sự phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm được quyết định bởi tổng điện trở nhiệt của các lớp vật liệu [9]. Mặc dù các lớp trung gian có tính chất dẫn nhiệt khác nhau, tổng điện trở nhiệt của toàn bộ hệ thống vẫn duy trì mối quan hệ tuyến tính. Lúc này, tổng điện trở nhiệt hoạt động như một cầu nối dẫn nhiệt, đảm bảo rằng duy trì sự truyền nhiệt đều đặn từ lõi cáp ra đến vỏ cáp, dẫn đến sự chênh lệch giữa T_s và $T_{\max}$ có thể biểu diễn bằng mối quan hệ tuyến tính. Ngoài ra, theo tiêu chuẩn IEC 60287-2-1 [33], dựa trên phương pháp tính toán tổng điện trở nhiệt đã khẳng định tính đúng đắn của mô hình tuyến tính khi đánh giá giá trị nhiệt độ $T_{\max}$ dựa trên giá trị nhiệt độ T_s . Mối quan hệ gần như tuyến tính giữa nhiệt độ T_s và $T_{\max}$ chịu ảnh hưởng bởi mức dòng điện không đổi, kết hợp với điều kiện biên ổn định trong quá trình mô phỏng, giúp đảm bảo tính chính xác của kết quả phân tích qua việc hạn chế các biến động nhiệt không mong muốn.

Độ chính xác của phương pháp được kiểm tra bằng cách tính toán sai số giữa hai giá trị $T_{\max}$ thu được từ phương trình hồi quy tuyến tính và kết quả mô hình mô phỏng. Sai số tương đối lớn nhất giữa hai giá trị $T_{\max}$ có giá trị tương đối nhỏ, khoảng 0,002%, xảy ra tại $T_s = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ngoài ra, đường thẳng giới hạn màu đỏ xuất hiện trên biểu đồ hình 3.11, đại diện cho ngưỡng nhiệt độ tối đa cho phép của cách điện cáp (T_{limit}), $T_{\text{limit}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ đối với cáp MV sử dụng lớp cách điện XLPE [18], [34], [58]. Dựa vào biểu đồ kết quả trong hình 3.11, điểm giao nhau giữa đường hồi quy tuyến tính và trục nhiệt độ T_{limit} có thể cho biết tọa độ của cặp nhiệt độ (T_s ; $T_{\max}$) tương ứng với giá trị (84,5 $^\circ\text{C}$; 90 $^\circ\text{C}$). Đây là điểm xác định giá trị nhiệt độ T_s khi nhiệt độ lớp cách điện của cáp đạt ngưỡng sự cố. Dựa vào đó, khi mẫu

cáp hiện tại vận hành với dòng điện định mức 590 A, cảnh báo sẽ cần được đưa ra khi nhiệt độ cảm biến tại bề mặt cáp đạt ngưỡng giá trị $T_s = 84,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

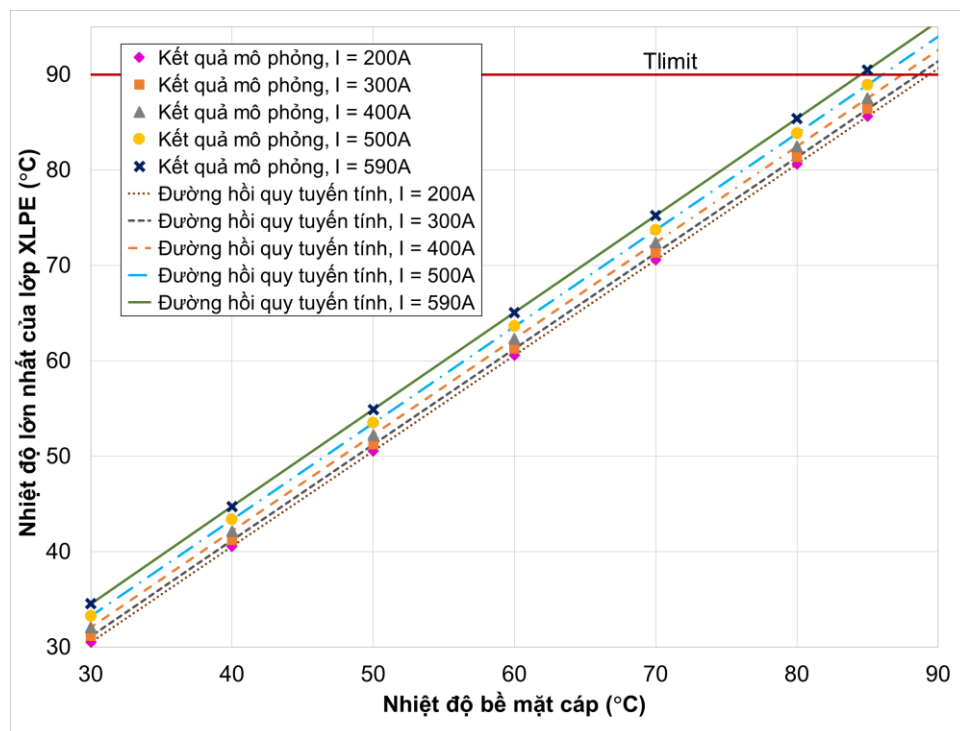
3.3.3. Xác định ngưỡng cảnh báo nhiệt độ của cảm biến tại các dòng điện vận hành khác nhau

Hình 3.12 thể hiện mối quan hệ giữa giá trị nhiệt độ T_s và giá trị nhiệt độ $T_{\max}$, khi I thay đổi tại các giá trị T_s khác nhau. Sự tương quan này được mô tả thông qua phương trình hồi quy tuyến tính, có dạng như phương trình (3.18) (mục 3.3.2). Mối quan hệ này chỉ ra sự biến động nhiệt phức tạp trong cáp, chủ yếu được hình thành do sự thay đổi điện trở suất của lõi dẫn khi nhiệt độ thay đổi, kết hợp với giới hạn trong khả năng truyền nhiệt của các lớp vật liệu.

Trong phạm vi nghiên cứu, các trường hợp dòng điện từ 200 A đến 590 A đã được mô phỏng nhằm đánh giá toàn diện ảnh hưởng của dòng điện đến các thông số nhiệt. Tuy nhiên, để đảm bảo tính tập trung và làm rõ các đặc điểm điển hình, kết quả phân tích được lựa chọn trình bày tại 5 mức dòng điện tiêu biểu: 200 A, 300 A, 400 A, 500 A và 590 A. Việc lựa chọn các mức dòng điện này cũng có liên hệ trực tiếp với phụ tải thực tế khi mà vận hành cáp ngầm MV điện áp danh định pha - pha 20 kV hoặc 22 kV. Theo đó, các mức dòng điện phản ánh các trạng thái vận hành thực tế từ tải nhẹ, trung bình đến tải nặng, tương ứng với mức tải theo các thời điểm sử dụng của hệ thống như tải tăng dần hoặc giảm dần. Hơn nữa, mức dòng điện 590 A giúp đánh giá hành vi nhiệt với giới hạn dòng điện định mức vận hành của mẫu cáp.

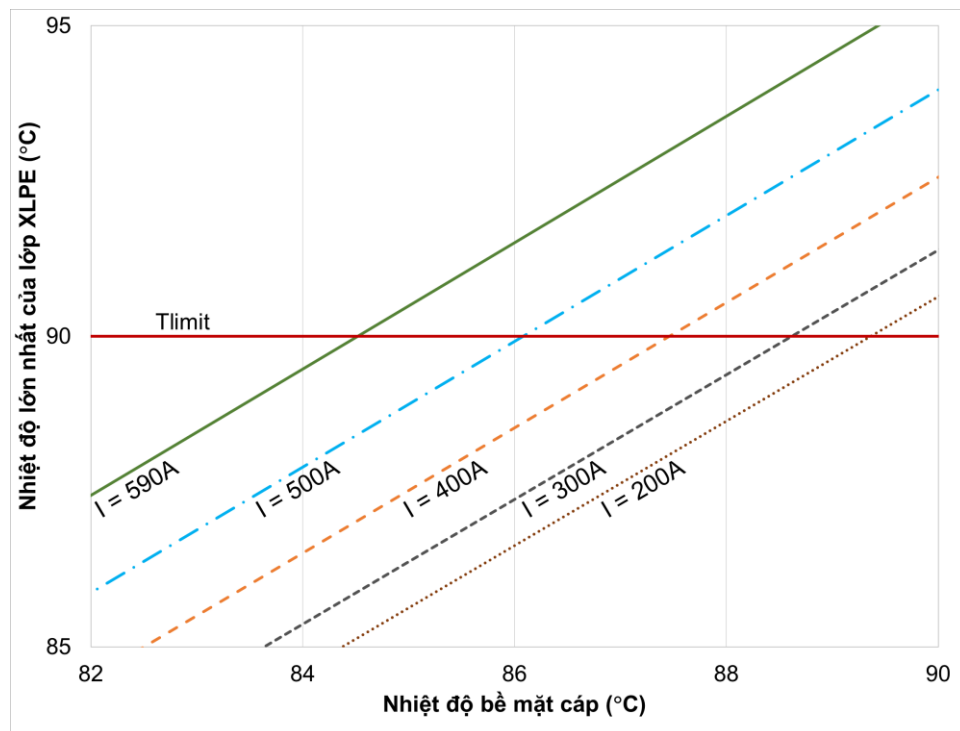
Với các khoảng điều chỉnh dòng điện, mặc dù xuất hiện tính chất truyền nhiệt phi tuyến theo hướng xuyên tâm, dẫn đến sự chênh lệch của nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$, kết quả mô phỏng vẫn cho thấy mối tương quan gần như tuyến tính giữa nhiệt độ T_s và nhiệt độ $T_{\max}$. Trên cơ sở đó, phương pháp có khả năng mang đến ứng dụng thực tiễn, khi nhiệt độ $T_{\max}$ có thể được tính

toán dựa vào dữ liệu thu thập từ cảm biến nhiệt độ T_s , cho phép dự đoán sự phân bố nhiệt độ bên trong cáp. Để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình dự đoán nhiệt độ T_{max} , sai số tương đối của nhiệt độ T_{max} từ phương trình hồi quy tuyến tính và kết quả mô phỏng được tính toán tại các mức dòng điện vận hành khác nhau. Tại các giá trị nhiệt độ T_s lần lượt là 50 °C, 30 °C, 85 °C, 85 °C và 50 °C, sai số tương đối lớn nhất xảy ra lần lượt tại các mức dòng điện 200 A, 300 A, 400 A, 500 A và 590 A là 0,008%; 0,033%; 0,027%; 0,012% và 0,002%. Độ lớn của sai số thu được có giá trị tương đối nhỏ, cho thấy rằng trong điều kiện thay đổi các mức dòng điện vận hành, phương trình hồi quy tuyến tính có thể cung cấp một công cụ dự đoán hiệu quả và tương đối chính xác cho việc ước lượng nhiệt độ T_{max} của lớp cách điện. Phương pháp này vẫn hoàn toàn khả thi ngay cả khi xét đến tính phi tuyến trong quá trình truyền nhiệt của cáp.



Hình 3.12. Mối quan hệ giữa giá trị nhiệt độ T_s và nhiệt độ T_{max} , khi I thay đổi tại các giá trị T_s khác nhau

Qua các kết quả mô phỏng, việc ứng dụng đường hồi quy tuyến tính để xác định cặp giá trị nhiệt độ (T_s , T_{max}) là một phương pháp hữu hiệu để dự đoán ngưỡng cảnh báo cho thông số nhiệt độ, tương ứng với từng mức vận hành xác định của dòng điện. Hình 3.13 trình bày chi tiết các giao điểm giữa đường hồi quy tuyến tính nhiệt độ và trục ngưỡng giới hạn $T_{limit} = 90^\circ\text{C}$, được phóng to từ đồ thị gốc ở hình 3.12, nhằm làm rõ tọa độ của các giao điểm này và cho phép xác định chính xác các giá trị nhiệt độ T_s cảnh báo.



Hình 3.13. Các điểm giao nhau giữa các đường hồi quy tuyến tính và trục ngưỡng sự cố T_{limit}

Dựa trên các kết quả mô phỏng và ứng dụng phương pháp hồi quy tuyến tính, giá trị $T_{s,warning}$ được định nghĩa để xác định nhiệt độ bề mặt vỏ cáp khi nhiệt độ T_{max} đạt đến giới hạn nhiệt độ T_{limit} . Giá trị $T_{s,warning}$ được tính toán và trình bày trong bảng 3.3, cho phép xác định nhiệt độ tối đa của bề mặt cáp, tại thời điểm mà hệ thống cần kích hoạt cảnh báo để kịp thời ngăn ngừa hiện tượng quá nhiệt.

Việc tính toán chính xác $T_{s,\text{warning}}$ rất quan trọng trong các hệ thống giám sát nhiệt độ cáp, giúp hệ thống có thể phát hiện sớm nguy cơ nhiệt độ cao quá mức trước khi T_{max} chạm ngưỡng nguy hiểm. Điều này đồng nghĩa với việc phòng ngừa các tình huống hỏng hóc do nhiệt độ vượt quá giới hạn điện môi của vật liệu cách điện, trên cơ sở đó cải thiện độ ổn định, tin cậy và kéo dài tuổi thọ của cáp.

Bảng 3.3. Giá trị $T_{s,\text{warning}}$ trong các trường hợp mức dòng điện khác nhau

I (A)	200	300	400	500	590
a	1,002	1,004	1,008	1,012	1,017
b	0,457	1,030	1,839	2,889	4,046
$T_{s,\text{warning}}$ (°C)	89,364	88,616	87,461	86,078	84,517

Những số liệu trong bảng đã thể hiện rõ mối quan hệ giữa dòng điện vận hành I ; phương trình hồi quy tuyến tính: tham số a , tham số b ; và nhiệt độ cảnh báo $T_{s,\text{warning}}$. Giá trị tham số a tăng nhẹ từ 1,002 đến 1,017 khi mức dòng điện tăng từ 200 A đến 590 A. Kết quả này cho thấy sự gia tăng dòng điện làm tăng độ dốc của phương trình hồi quy tuyến tính, phản ánh xu hướng ổn định trong việc thay đổi nhiệt độ theo dòng điện, đảm bảo khả năng dự báo của hệ thống.

Giá trị tham số b tăng đáng kể, từ 0,457 tại mức dòng điện 200 A lên 4,046 tại mức dòng điện 590 A. Khi dòng điện lớn hơn, tổn thất nhiệt tăng nhanh, làm nhiệt độ trong lõi cáp gia tăng đáng kể. Tuy nhiên, khả năng tản nhiệt ra môi trường xung quanh của hệ thống cáp bị giới hạn bởi đặc tính dẫn nhiệt của các lớp vật liệu và điều kiện làm mát. Điều này dẫn đến sự chênh

lệch nhiệt độ lớn hơn giữa các phần khác nhau của hệ thống, làm cho tham số b tăng mạnh.

Nhiệt độ cảnh báo $T_{s,\text{warning}}$ có xu hướng giảm dần từ 89,364 °C tại mức dòng điện 200 A xuống 84,517 °C tại mức dòng điện 590 A. Xu hướng này cho thấy rằng khi mức dòng điện tăng, nhiệt độ trong hệ thống cũng tăng nhanh hơn, đòi hỏi hệ thống phải kích hoạt cảnh báo sớm hơn để ngăn chặn nguy cơ quá nhiệt.

3.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG

Chương 3 đã cung cấp một cách tiếp cận toàn diện về quá trình mô phỏng và đánh giá kết quả mô phỏng. Các nội dung tổng quan của phương pháp đã được trình bày, bao gồm mô hình truyền nhiệt, phương pháp số và mẫu cáp.

Kết quả mô phỏng đã chỉ ra mối tương quan giữa giá trị nhiệt độ T_s và T_{max} của cáp ngầm MV với các điều kiện mô phỏng thay đổi, khi xuất hiện sự biến thiên của mức dòng điện vận hành và giá trị nhiệt độ đo lường tại bề mặt cáp. Xuất phát từ đó, nghiên cứu đã biểu diễn sự tương quan này bằng các phương trình hồi quy tuyến tính có độ tin cậy cao, căn cứ vào giá trị sai số tương đối nhỏ so với kết quả mô phỏng. Sự tuyến tính được giải thích thông qua sự cộng hưởng của tổng điện trở nhiệt từ các lớp vật liệu, kết hợp đặc tính ổn định của dòng điện và điều kiện môi trường xung quanh.

Phân tích chi tiết dựa trên định luật Fourier về truyền nhiệt, kết hợp với các phương pháp tính toán phân bố nhiệt độ theo một số nghiên cứu và tiêu chuẩn trước đó, đã cung cấp một nền tảng lý thuyết vững chắc cho việc đánh giá và dự đoán nhiệt độ hoạt động của cáp ngầm MV. Nghiên cứu không chỉ khẳng định tính đúng đắn của mô hình tuyến tính mà còn đưa ra các ngưỡng

cảnh báo nhiệt độ T_s phù hợp, nhằm đảm bảo nhiệt độ lớp cách điện luôn dưới mức giới hạn của điều kiện làm việc lâu dài cho phép, bảo vệ cách điện cáp khỏi nguy cơ quá nhiệt và kéo dài tuổi thọ. Ngoài ra, nghiên cứu đã cung cấp một phương pháp tiếp cận kết hợp mô hình số - mô phỏng trong việc tính toán và phân tích sự phân bố nhiệt độ bên trong cấu trúc cáp ngầm MV.

KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Đề án đã xây dựng cấu hình một hệ thống giám sát tự động dành cho đường dây cáp ngầm MV, dựa trên việc theo dõi điều kiện môi trường lắp đặt và các thông số liên quan trực tiếp đến trạng thái vận hành của cáp. Hệ thống giám sát đề xuất đã cung cấp một phương pháp tiếp cận kết hợp cảm biến - mô phỏng trong việc quản lý và kiểm soát tình trạng cáp ngầm MV, đảm bảo khả năng phát hiện sớm các nguy cơ tiềm ẩn, từ đó nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ của hệ thống phân phối điện. Những phát hiện này cung cấp một cơ sở khoa học để cải thiện khả năng giám sát tình trạng cáp, đồng thời mở ra phương pháp giám sát với chi phí thấp và không gây ra ảnh hưởng đến cấu trúc kỹ thuật của cáp.

Đề án đã thực hiện nghiên cứu trên mẫu cáp ngầm MV của hãng CADIVI: loại một lõi đồng không giáp bảo vệ, có cấp điện áp tiêu chuẩn 12/20 (24) kV hoặc 12,7/22 (24) kV, với giả định có chiều dài vô hạn và nhiệt độ đồng nhất tại mọi điểm trên bề mặt cáp. Kết quả mô phỏng và các phân tích tính toán đã chỉ ra mối tương quan chặt chẽ giữa nhiệt độ bề mặt cáp và nhiệt độ lớn nhất của lớp cách điện XLPE. Mối quan hệ này được mô tả bằng phương trình hồi quy tuyến tính có dạng: $T_{max} = aT_s + b$, cho phép xác định các ngưỡng cảnh báo cho thông số nhiệt độ của cảm biến đặt trên bề mặt cáp. Với mẫu cáp sử dụng, điển hình tại mức dòng điện định mức tối đa cho phép 590 A, nghiên cứu thu được biểu thức hàm: $T_{max} = 1,017T_s + 4,046$. Phương pháp đánh giá và dự đoán nhiệt độ này hoàn toàn có thể áp dụng cho nhiều loại đường dây cáp ngầm MV khác nhau, bao gồm sự khác biệt về thông số kỹ thuật, đặc tính vật liệu và điều kiện vận hành.

Hơn nữa, đề án đã xác định các ngưỡng cảnh báo nhiệt độ tại bề mặt mẫu cáp trong nghiên cứu. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị nhiệt độ cảnh

báo này giảm dần khi mức dòng điện tăng. Theo đó, tại mức dòng điện 200 A, nhiệt độ cảnh báo là 89,364 °C; tại 300 A là 88,616 °C; tại 400 A là 87,461 °C; tại 500 A là 86,078 °C; và khi vận hành với dòng điện định mức tối đa cho phép 590 A, nhiệt độ cảnh báo giảm xuống 84,517 °C.

Các kết quả nghiên cứu của đề án đã được trình bày tại **Hội nghị khoa học quốc gia về Năng lượng, Điện tử và Tự động hóa lần thứ nhất (EEA 2024)** và **Diễn đàn sinh viên nghiên cứu khoa học (SF2024)**. Sau đó, các kết quả này đã được đăng trong **Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội** và **Kỷ yếu SF2024**. Đồng thời, nghiên cứu cũng đã được gửi đến một số tạp chí khoa học quốc tế để phản biện và chờ xét duyệt công bố.

Để đảm bảo tính khả thi và độ chính xác của cấu hình hệ thống giám sát, cần tiến hành xác thực bằng phương pháp thực nghiệm trên mẫu cáp ngầm trong điều kiện vận hành thực tế. Hơn nữa, mô hình mô phỏng nhiệt độ hiện tại cần được phát triển và mở rộng phạm vi thực hiện, tương ứng với các trường hợp vận hành phức tạp khác nhau của cáp như điều kiện lắp đặt thực tế, điều kiện dòng điện vận hành không ổn định (ngắn mạch, phụ tải biến thiên hoặc quá trình chuyển mạch), điều kiện môi trường thay đổi, ... Ngoài ra, nhằm nâng cao độ khái quát và tính khách quan của kết quả nghiên cứu, đồng thời khắc phục những hạn chế do giới hạn về thời gian và phạm vi nghiên cứu, các giả định lý tưởng hóa như chiều dài cáp vô hạn, nhiệt độ bề mặt cáp đồng nhất, ... cần được xem xét loại bỏ trong các nghiên cứu tiếp theo. Việc xây dựng mô hình mô phỏng với các điều kiện thực tế hơn sẽ giúp phản ánh chính xác hơn quá trình truyền nhiệt trong cáp.

Trong giai đoạn đầu, nghiên cứu đề xuất lắp đặt các “nút thu thập, xử lý tín hiệu” tại các vị trí đường dây cáp ngầm có độ uốn cong và độ gấp khúc

lớn, đồng thời áp dụng tại các vị trí môi nối cáp. Tuy nhiên, trong tương lai cần nghiên cứu và đề xuất phương án tối ưu trong việc xác định vị trí đặt và số lượng tối thiểu các “nút thu thập, xử lý tín hiệu” trên đường dây cáp ngầm MV. Việc bố trí hợp lý các nút này sẽ giúp cải thiện hiệu quả thu thập dữ liệu, giảm thiểu sai số đo lường và đảm bảo độ chính xác trong theo dõi trạng thái vận hành cáp của hệ thống giám sát.

Ngoài ra, cần thực hiện phân tích các yếu tố đặc thù trong giám sát môi nối cáp ngầm MV, được coi là thành phần dễ bị tổn thương nhất trên hệ thống truyền tải điện ngầm. Những môi nối này phải chịu tác động đồng thời của các yếu tố cơ học, nhiệt độ, điện trường và điều kiện môi trường ngầm khắc nghiệt. Việc giám sát môi nối cáp ngầm đóng vai trò quan trọng nhằm phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm chất lượng cách điện, giảm thiểu nguy cơ phát sinh sự cố và đảm bảo tính ổn định trong vận hành lưới điện.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Hoàng Việt, Duy Tấn (2022), “Hệ thống DTS - giải pháp hỗ trợ giám sát cáp ngầm 110kV”, Tổng công ty Điện lực Miền Trung. <https://cpc.vn/vi-vn/Tin-tuc-su-kien/Tin-tuc-chi-tiet/articleId/51005>. Ngày truy cập: 12/01/2022.
- [2] Nguyễn Tấn Đạt, Võ Sỹ Danh (2022), “PTC4 nghiên cứu ứng dụng thành công công nghệ giám sát phóng điện cục bộ và nhiệt độ trực tuyến”, *Chuyển đổi số - Khoa học Công nghệ*, Công ty Truyền tải Điện 4. <http://ptc4.npt.evn.vn/d6/vi-VN/news/PTC4-nghien-cuu-ung-dung-thanh-cong-cong-nghe-giam-sat-phong-dien-cuc-bo-va-nhiet-do-truc-tuyen-6-1291-1547>. Ngày truy cập: 20/06/2022.
- [3] TCVN 9208 : 2012 (2012), Lắp đặt cáp và dây dẫn điện trong các công trình công nghiệp, Tiêu chuẩn Quốc gia, xuất bản lần 1, Hà Nội.
- [4] Trần Đức Hải, Trịnh Trọng Chương, Hoàng Mai Quyền, Nguyễn Vũ Gia Bảo, Vũ Thị Thu Nga (2024), “Đề xuất cấu hình hệ thống giám sát tự động đường dây cáp ngầm trung thế”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 60(7), tr. 54-61.
- [5] Xuân Phú (2021), “Trạm 500kV Tân Uyên ứng dụng chuyển đổi số trong công tác quản lý vận hành”, *Chuyển đổi số - Khoa học Công nghệ*, Công ty Truyền tải Điện 4. <http://ptc4.npt.evn.vn/d6/vi-VN/news/Tram-500kV-Tan-Uyen-ung-dung-chuyen-doi-so-trong-cong-tac-quan-ly-van-hanh-6-1291-982>. Ngày truy cập: 06/04/2021.

Tiếng Anh

- [6] Alghamdi, A. S., Desuqi, R. K. (2020), “A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing”, *Heliyon*, 6(1), e03120.
- [7] Althaf, J., Imthiaz, M., Raj, R. (2013), “Underground Cable Fault Detection using Robot”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 3(2), pp. 145-151.
- [8] Álvarez, F., Garnacho, F., Ortego, J., Gonzalez, M. A. S. U. (2015), “Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment”, *Sensors*, 15(4), 7360-87.
- [9] Anders, G. J. (1997), *Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications*, IEEE Press, New York.
- [10] AP Sensing (2023), *Fiber-based Current Monitoring*, AP Sensing, Switzerland.
- [11] Ardila-Rey, J. A., Montaña, J., De Castro, B. A., Schurch, R., Ulson, J. A. C., Muhammad-Sukki, F., Bani, N. A. (2018), “A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique”, *Sensors*, 18(4), 1021.
- [12] Bonilla, V., Campoverde, B., Yoo, S. G. (2023), “A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications”, *Sensors*, 23(20), 8440.
- [13] Boukezzi, L., Boubakeur, A. (2018), “Effect of Thermal Aging on the Electrical Characteristics of XLPE for HV Cables”, *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 19(1), pp. 344-351.

- [14] Chen, K., Yue, Y., Tang, Y. (2021), “Research on Temperature Monitoring Method of Cable on 10 kV Railway Power Transmission Lines Based on Distributed Temperature Sensor”, *Energies*, 14(12), 3705, pp. 2-15.
- [15] Chen, X., Xu, Y., Cao, X., Gubanski, S. M. (2015), “Electrical Treeing Behavior at High Temperature in XLPE Cable Insulation Samples”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(5), pp. 2841-2851.
- [16] Cho, Y. S., Hong, T. Y., You, Y. W., Sun, J. H., Lee, S. H. (2020), “Study on the Correlation between Partial Discharge Energy and SF6 Decomposition Gas Generation”, *Energies*, 13(18), 4655.
- [17] Chung, D. D. L (2002), “Composites get smart”, *Materials Today*, 5(1), pp. 30-35.
- [18] Dalal, S. B., Gorur, R. S., Dyer, M. L. (2005), “Aging of distribution cables in service and its simulation in the laboratory”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(1), pp. 139-146.
- [19] Densley, J. (2001), “Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - An overview”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 17(1), pp. 14-22.
- [20] Dukanac, D. (2018), “Application of UHF method for partial discharge source location in power transformers”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(6), pp. 2266-2278.
- [21] Eastham, C. W., Vander Eyken, K. J. (2023), “Practical Application of On-line Partial Discharge Monitoring for the Improvement of Long-

- Term Power Network Reliability”, *2023 CIGRE Canada Conference & Exhibition*, CIGRE-576.
- [22] El Khoury, D., Gentils, F., Lesaint, O., Bonifaci, N. (2020), “Analysis of Chemical By-products from Partial Discharges in Air”, *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*.
- [23] Enescu, D., Colella, P., Russo, A. (2020), “Thermal assessment of power cables and impacts on cable current rating: An overview”, *Energies*, 13(20), 5319.
- [24] Fruth, B. (1992), “Partial discharge mechanisms in solid insulation systems”, *Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Sestri Levante, Italy, 22-25 June 1992; IEEE: Piscataway, NJ, USA.
- [25] Garros, B. (1999), “Ageing and reliability testing and monitoring of power cables: Diagnosis for insulation systems: The ARTEMIS program”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 15(4), pp. 10-12.
- [26] Han, T., Du, B., Gao, Y., Xia, Y. (2012), “Partial discharge pattern recognition based on Transient Earth Voltage for 10 kV switchgear in smart grid”, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (2012)*, pp. 1-4.
- [27] Haynes, W. M., Ed. (2014), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th ed., CRC Press, Boca Raton.
- [28] He, D., Zhang, T., Ma, M., Gong, W., Wang, W., Li, Q. (2020), “Research on Mechanical, Physicochemical and Electrical Properties of

- XLPE-Insulated Cables under Electrical-Thermal Aging”, *Journal of Nanomaterials*, 2020(1), 3968737, pp. 1-13.
- [29] Hu, Y., Zhang, W., Wang, J. (2018), “Design of a Distributed UHF Sensor Array System for PD Detection and Location in Substation”, *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*.
- [30] Huebner K. H. , Dewhirst D. L. , Smith D. E. , Byrom T. G. (2001), *The Finite Element Method for Engineers*, 4th ed., Wiley-Interscience.
- [31] Hwang, C. C., Jiang, Y. H., (2003), “Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems”, *Electric Power Systems Research*, 64(2), pp. 159-164.
- [32] International Electrotechnical Commission (2001), *High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements*, IEC Standard 60270:2000, Geneva, Switzerland.
- [33] International Electrotechnical Commission (2023), *Electric Cables - Calculation of the Current Rating*, IEC Standard 60287-1 and 60287-2-1, Geneva, Switzerland.
- [34] International Electrotechnical Commission (2014), *Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*, IEC 60502-2, Geneva, Switzerland.
- [35] Jiang, B., Sample, A. P., Wistort, R. M., Mamishev, A. V. (2005), “Autonomous Robotic Monitoring of Underground Cable Systems”,

- ICAR '05. Proceedings.*, 12th International Conference on Advanced Robotics, pp. 673-679.
- [36] Karahan, M., Kalenderli, Ö. (2011), “Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method”, *Heat Transfer - Engineering Applications*, Vyacheslav S. Vikhrenko. ed., pp 205-230.
- [37] Karrer, N., Hofer-Noser, P. (2000), “PCB Rogowski coils for high di/dt current measurement”, *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018)*, 3, pp. 1296-1301.
- [38] Kehtarnavaz, N. (2008), *Digital Signal Processing System Design: LabVIEW-Based Hybrid Programming*, 2nd ed., Academic Press, pp. 57-91.
- [39] Khan, A. A., Malik, N., Al-Arainy, A., Alghuwainem, S. (2012), “A Review of Condition Monitoring of Underground Power Cables”, *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, A-23, pp. 909-912.
- [40] Kocar, I., Ertas, A., (2004), “Thermal analysis for determination of current carrying capacity of PE and XLPE insulated power cables using finite element method”, *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, MELECON 2004, pp. 905-908.
- [41] Kundu, P., Kishore, N. K., Sinha, A. K. (2006), “Simulation and analysis of acoustic wave propagating due to partial discharge activity”, *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 607- 610.

- [42] Kutz, M., Ed. (2011), “20 - Process Monitoring and Process Control: An Overview”, *Applied Plastics Engineering Handbook*, William Andrew, pp. 359-373.
- [43] Lalle, Y., Chaari Fourati, L., Fourati, M., Barraca, J. P. (2019), “A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid”, *2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, pp. 1-6.
- [44] Lee, C. Y., Lee, G. B. (2005), “Humidity Sensors: A Review”, *Sensor Letters*, 3(1-4), pp. 1-15.
- [45] Lee, K., Fereydoonian, M., Benson, M., Lee, W. (2022), “Partial Discharge and Electromagnetic Interference Under Repetitive Voltage Pulses with High Slew Rate in AC Machine Drives”, *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, pp. 917–922.
- [46] LEM (2022), *Datasheet ARU series*, LEM.
- [47] Li, J., Han, X., Liu, Z., Yao, X. (2018), “A Novel GIS Partial Discharge Detection Sensor with Integrated Optical and UHF Methods”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), pp. 2047-2049.
- [48] Li, Y., Zhen, G., Liu, Y., Song, H., Liang, Y., Liu, X., Meng, S., Liu, Y., Li, S. (2024), “Effect of temperature on partial discharges activity and electrical trees propagation in XLPE”, *IET Science, Measurement & Technology*, 18(6), pp. n/a–n/a.
- [49] Liang, B., Lan, R., Zang, Q., Liu, Z., Tian, L., Wang, Z., Li, G. (2023), “Influence of Thermal Aging on Dielectric Properties of High Voltage Cable Insulation Layer”, *Coatings*, 13(3), 527.

- [50] Lienhard, J. H. (2003), *A Heat Transfer Textbook*, 3rd ed., Phlogiston Press, Cambridge.
- [51] Liu, Y., Xiong, H., Xiao, H. (2022), “Detecting XLPE cable insulation damage based on distributed optical fiber temperature sensing”, *Optical Fiber Technology*, 68(6), 102806.
- [52] Mark, J. E., Ed. (2009), *Polymer Data Handbook*, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, U.K.
- [53] Markalous, S. M., Tenbohlen, S., Feser, K. (2008), “Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(6), pp. 1576-1583.
- [54] Mecheri, Y., Nedjar, M., Lamure, A., Aufray, M., Drouet, C. (2010), “Influence of Moisture on the Electrical Properties of XLPE Insulation”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, October 2010, West Lafayette, United States, pp. 1-4.
- [55] Montanari, G. C., Fabiani, D., Morshuis, P., Dissado, L. (2016), “Why residual life estimation and maintenance strategies for electrical insulation systems have to rely upon condition monitoring”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3), pp. 1375-1385.
- [56] Ochieng, A. O., Megahed, T. F., Ookawara, S., Hassan, H. (2022), “Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation”, *Process Safety and Environmental Protection*, 162, pp. 134-154.

- [57] Panagi, G., Katzis, K. (2020), “Towards 3-Lead Electrocardiogram Monitoring over LoRa: A Conceptual Design”, *IEEE International Conference on Communications (IEEC ICC 2020)*, June 2020, Dublin, Ireland, pp. 1-5.
- [58] Pilgrim, J. A. (2011), *Circuit Rating Methods for High Temperature Cables*, Doctoral Thesis, University of Southampton, Electronics and Computer Science: EEE.
- [59] Shafiq, M. (2014), *Design and Implementation of Partial Discharge Measurement Sensors for On-Line Condition Assessment of Power Distribution System Components*, Doctoral Dissertation, Aalto University, Espoo, Finland.
- [60] Shafiq, M., Hussain, G. A., Kütt, L., Lehtonen, M. (2014), “Effect of Geometrical Parameters on High-Frequency Performance of Rogowski Coil for Partial Discharge Measurements”, *Measurement*, 49(3), pp. 126-137.
- [61] Shchebeniuk, L. A., Antonets, T. Y. (2016), “Investigation of losses in insulation of high-voltage cables with XLPE insulation”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), pp. 58-62.
- [62] Siddiqui, B. A., Pakonen, P., Verho, P. (2017), “Novel Inductive Sensor Solutions for On-line Partial Discharge and Power Quality Monitoring”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), pp. 209-216.
- [63] SONBEST (n.d.), *SM7820B RS485 Temperature and Humidity Sensor*, User Manual, SONBEST.

- [64] Steennis, F., Buys, P., Mehairjan, R. P. Y., van der Wielen, P. C. J. M. (2014), “Smart Cable Guard for PD-online Monitoring of MV Underground Power Cables in Stedin’s Network”, *Proceedings – 2014 International Conference on Condition Monitoring & Diagnosis*, JY. Koo ed., pp. 525-528.
- [65] Topolski, Ł., Warecki, J., Hanzelka, Z. (2018), “Methods for determining power losses in cable lines with non-linear load”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 9, pp. 85-90.
- [66] Vietnam Electric Cable Corporation - CADIVI (2022), *Instructions of Choosing & Using Medium-Voltage Cables*, CADIVI.
- [67] Wang, Y., Li, G., Wu, J., Yin, Y. (2016), “Effect of temperature on space charge detrapping and periodic grounded DC tree in cross-linked polyethylene”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(6), pp. 3704-3711.
- [68] Wiecek, B., De Mey, G., Chatziathanasiou, V., Papagiannakis, A., Theodosoglou, I. (2014), “Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 58, pp. 199-205.
- [69] Zhang, Y., Yu, F., Ma, Z., Li, J., Qian, J., Liang, X., Zhang, J., Zhang, M. (2022), “Conductor Temperature Monitoring of High-Voltage Cables Based on Electromagnetic-Thermal Coupling Temperature Analysis”, *Energies*, 15(2), 525.
- [70] Zhou, C., Yi, H., Dong, X. (2017), “Review of Recent Research Towards Power Cable Life Cycle Management”, *High Voltage*, 2(3), pp. 179-187.

ĐỀ XUẤT CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT TỰ ĐỘNG ĐƯỜNG DÂY CÁP NGẦM TRUNG THỂ

PROPOSAL FOR AUTOMATIC MONITORING SYSTEM CONFIGURATION OF MEDIUM-VOLTAGE UNDERGROUND CABLE LINES

Trần Đức Hải¹, Trịnh Trọng Chương², Hoàng Mai Quyên^{2,*},
Nguyễn Vũ Gia Bảo³, Vũ Thị Thu Nga⁴

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.238>

TÓM TẮT

Sự cố xảy ra trên đường dây cáp ngầm trung thể (MV) có thể dẫn đến những hậu quả nghiêm trọng, bao gồm sự gián đoạn cung cấp điện, đe dọa đến an toàn cộng đồng và gây ra thiệt hại kinh tế lớn. Việc xác định và theo dõi các lỗi phát sinh sớm là rất cần thiết. Tuy nhiên, các giải pháp giám sát cáp ngầm tự động trong nước xuất hiện với số lượng ít, đơn giản và chủ yếu tập trung vào giám sát vận hành của cáp cao áp. Do vậy, nghiên cứu này đề xuất cấu hình hệ thống giám sát tự động đường dây cáp ngầm MV. Mẫu chốt của hệ thống là một bộ thiết bị bao gồm các cảm biến và nút thu thập, xử lý tín hiệu đặt tại các điểm yếu của đường cáp và mối nối cáp. Các bộ thiết bị thực hiện đo đặc giá trị nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và sự phát xạ âm thanh gây ra bởi phóng điện cục bộ (PD). Dữ liệu thu thập được gửi tới máy chủ thông qua hệ thống mạng không dây LoRaWAN. Trong bài báo này, thuật toán thu thập và xử lý dữ liệu cùng thuật toán cảnh báo linh hoạt sự cố cho cáp ngầm theo mùa trong năm và điều kiện thời tiết được xây dựng, giúp hoàn thiện hoạt động của cấu hình giám sát tự động đường dây cáp ngầm MV được đề xuất.

Từ khóa: Cáp ngầm trung thể; mối nối cáp; giám sát tự động; phóng điện cục bộ; sự cố cáp ngầm.

ABSTRACT

Faults occur on medium-voltage (MV) underground cable lines can have serious consequences, including power supply interruptions, threats to community safety, and significant economic losses. Identifying and monitoring emerging faults early is crucial. The availability of automatic underground cable monitoring solutions domestically is limited, simple, and mainly focus on high-voltage cable. Therefore, this study proposes configuring an automatic monitoring system for MV underground cable lines. The key of the system is a set of devices comprising sensors, signal acquisition and processing nodes placed at vulnerable points along the cable route and cable joints. These devices measure temperature, humidity, current, and acoustic emissions caused by partial discharge (PD). The collected data is transmitted to a server through a LoRaWAN wireless network system. In this paper, algorithms for data acquisition and processing, as well as flexible fault alert algorithms tailored to seasonal variations and weather conditions are developed to enhance the performance of the proposed automatic monitoring configuration for MV underground cable lines.

Keywords: Medium-voltage underground cable; cable joint; automated monitoring; partial discharge; underground cable incident.

¹Học viên KTD-K13, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Sinh viên K64-ET-LUH, Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

⁴Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện Lực

*Email: quyenhm@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

CHỮ VIẾT TẮT

MV	Medium Voltage (Trung thế)
PD	Partial Discharge (Phóng điện cục bộ)
DC	Direct Current (Dòng điện một chiều)
DSO	Distribution System Operator (Nhà điều hành hệ thống phân phối)
DTS	Distributed Temperature Sensing (Cảm biến nhiệt độ phân tán)
RC	Rogowski Coil (Cuộn dây Rogowski)
DAC	Damped AC
ADC	Analog to Digital Converter
SPI	Serial Peripheral Interface

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Với sự phát triển của xã hội và nhu cầu sử dụng điện năng ngày càng cao, hệ thống truyền tải điện, phân phối điện ngày càng phức tạp. Để giảm độ nhạy của mạng lưới điện trước những ảnh hưởng của môi trường, cáp ngầm được sử dụng ngày càng nhiều. Chúng không bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết, mưa lớn, bão, băng tuyết cũng như ô nhiễm. Nhu cầu năng lượng điện ngày càng đòi hỏi chất lượng và ổn định, vì vậy, sự cố trong hệ thống cáp ngầm phải được phát hiện, định vị và sửa chữa nhanh chóng.

Nguyên nhân gây ra các hỏng hóc tại cáp và mối nối cáp xuất phát chủ yếu từ các yếu tố ứng suất: PD, nhiệt độ, dòng tải cao, lão hóa vật liệu cách điện. PD gây ra tác động và lão hóa trong vật liệu cách điện của cáp, dẫn đến làm giảm tuổi thọ của cáp [1, 2]. Trong [3, 4], nhiệt độ được coi là nguyên nhân chính gây ra hỏng mối nối cáp. Trong [5], dòng tải cao và chu kỳ dòng điện tác động tàn phá đến khớp nối. Theo [6, 7], kết quả của các cơ chế lão hóa là thuộc tính của vật liệu bị suy giảm và độ cách điện giảm ở mức cục bộ, dẫn đến lan rộng qua lớp cách điện giữa các phần dẫn điện.

Hiện tại, trong và ngoài nước đã và đang nghiên cứu ứng dụng nhiều phương pháp giám sát cáp ngầm tại chỗ hoặc ngoài hiện trường bằng các thử nghiệm trực tuyến hoặc ngoại tuyến, như phương pháp giám sát dòng rò, giám sát nhiệt độ, phương pháp điện áp AC tắt dần (DAC), phương pháp điện áp một chiều (DC), phương pháp điện áp xung, phương pháp giám sát PD [8],... để phát hiện sớm các hiện tượng bất thường của cáp ngầm, chủ động trong công tác sửa chữa, bảo trì và thay thế cáp ngầm, làm tăng độ tin cậy của hệ thống.

1.1. Thế giới

Với sự phát triển của công nghệ, rất nhiều phương pháp giám sát và phát hiện sự cố cáp ngầm đã được nghiên cứu ứng dụng trên thế giới.

Sử dụng robot tự động để giám sát hệ thống cáp ngầm cũng đã được một số nước châu Âu sớm nghiên cứu và ứng dụng [9]. Robot phát hiện lỗi bao gồm bộ phận tạo tín hiệu và bộ phận robot. Cáp ngầm mạch được kiểm tra tính liên tục bằng cách truyền tín hiệu tần số thấp 3kHz. Một bộ tạo tín hiệu có thể được sử dụng để tạo ra tín hiệu này. Tín hiệu AC truyền qua dây tạo ra một từ trường xung quanh nó. Từ trường này được robot cảm nhận bằng mạch điện cảm. Tín hiệu AC được robot cảm nhận sau đó được khuếch đại bằng mạch LM386. Tín hiệu khuếch đại này sau đó được chỉnh lưu và chuyển đổi thành DC. Mức DC được cung cấp cho đầu vào tương tự của vi điều khiển. Bộ vi điều khiển chuyển đổi đầu vào tương tự này thành tín hiệu số. Dựa trên chương trình được lập trình trong bộ vi điều khiển, chuyển động của robot được điều khiển. Khi robot đạt đến điểm gián đoạn, từ trường sẽ bằng không. Trong trường hợp đó, tín hiệu đầu vào tại cổng đầu vào analog sẽ thấp đáng kể. Khi cường độ tín hiệu đầu vào nhỏ hơn 10 (đọc nhị phân), PIC - Dòng vi điều khiển của công ty Microchip Technology được lập trình để hiển thị, phát hiện đoạn mạch và hiển thị trên màn hình LCD [10].

Trong số các hiện tượng hư hỏng, hiện tượng quan trọng nhất là hoạt động PD. PD có thể được coi là dấu hiệu báo trước cho hư hỏng cách điện. Phép đo PD là một công cụ chẩn đoán quan trọng, đặc biệt phổ biến đối với cáp trung thế và cao thế, nơi cường độ ứng suất điện cục bộ có thể đạt đến giá trị đánh thủng. Giám sát cáp ngầm được thực hiện thông qua các phép đo PD trực tuyến dựa vào dòng điện của cách điện cáp điện khi có khuyết tật [11]. Sự giải phóng năng lượng này tương đương với hiện tượng PD, giải phóng các xung tần số cao truyền dọc theo chiều dài của dây cáp điện. Các xung tần số cao có thể được phát hiện bằng cách sử dụng máy biến dòng cao tần. Giám sát dòng điện vỏ bọc được triển khai bởi công ty AP sensing [12]. Giải pháp bao gồm các máy biến dòng thông thường, bộ chuyển đổi tín hiệu điện - quang, sau đó được xử lý. Stedin - Nhà điều hành hệ thống phân phối (DSO) ở Hà Lan, đang áp dụng Smart Cable Guard [13]. Một hệ thống có hai cảm biến PD cảm ứng được đặt trong mạng cáp, sóng điện từ từ các xung PD truyền dọc theo cáp theo hai hướng, cách xa điểm khiếm khuyết X. Mỗi cảm biến trong số hai cảm biến sẽ phát hiện xung PD truyền qua.

Trong số các phương pháp giám sát trực tuyến khác nhau, giám sát nhiệt độ là phương pháp trực tiếp nhất để phản ánh tình trạng của cáp. Cảm biến nhiệt độ phân tán (DTS) qua sợi quang được sử dụng phổ biến bởi có ưu điểm là chống nhiễu điện từ và nhiều cơ học cũng như đo liên tục trong không gian, phù hợp để theo dõi nhiệt độ của cáp đường dài. DTS kết hợp với mô hình phần tử hữu hạn (FEM - Finite Element Model) đã được nghiên cứu ứng dụng bởi Kai Chen để giám sát trực tuyến cáp trong RPTL (Railway Power Transmission Lines) tại Trung Quốc, qua đó tính toán đặc tính phân bố của trường nhiệt độ của cáp bị sự cố [14].

Trên thế giới đã xuất hiện nhiều giải pháp để có thể giám sát, chẩn đoán tình trạng cáp ngầm MV. Tuy nhiên, các giải pháp thường tập trung thu thập vào một yếu tố hoặc một ứng suất cụ thể, vì vậy, sẽ gặp nhiều hạn chế trong việc giám sát, chẩn đoán tình trạng cáp.

1.2. Trong nước

Để nâng cao khả năng giám sát các tuyến cáp ngầm cao và trung áp trong các chế độ vận hành, các đơn vị quản lý đã sử dụng nhiều phương pháp khác nhau nhằm phán đoán trước các nguy cơ dẫn đến sự cố trên đường dây cáp ngầm.

Hệ thống DTS được PC Đà Nẵng ứng dụng vào giám sát tuyến cáp ngầm nối từ trạm biến áp 110kV An Đồn đến trạm biến áp 110kV Cảng Tiên Sa với tổng chiều dài hơn 5km [15]. DTS là hệ thống quang điện tử, sử dụng sợi quang cảm biến để giám sát dòng điện và nhiệt độ cáp ngầm, đặc biệt là khả năng kết nối với hệ thống SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) để kịp thời cảnh báo và xử lý các hiện tượng bất thường xảy ra trong quá trình vận hành của một tuyến cáp ngầm. Hệ thống giám sát có ý nghĩa rất quan trọng, góp phần hỗ trợ trong việc phát hiện các nguy cơ dẫn đến sự cố cáp ngầm, giúp công tác quản lý vận hành lưới điện 110kV của đơn vị ngày càng hiệu quả và tin cậy hơn. Hệ thống DTS cũng được một số đơn vị quản lý lưới điện cao áp sử dụng như: Công ty truyền tải điện 4 đã lắp đặt trên 4 tuyến cáp ngầm thuộc hai đường dây mạch kép Tân Uyên - Thủ Đức và Tân Uyên - Long Bình [16].

Ngoài ra, công ty truyền tải điện 4 đã nghiên cứu thành công và ứng dụng công nghệ giám sát từ xa phóng điện cục bộ và nhiệt độ cho tủ hợp bộ tại trạm biến áp 220kV Thủ Đức. Tín hiệu sóng âm di chuyển trên bề mặt của tinh thể để lấy thông tin nhiệt độ. Các giá trị nhiệt độ và PD đo được đã được biên dịch và lưu trong bộ nhớ của bộ xử lý trung tâm, được giám sát trực tiếp thông qua HMI (Human Machine Interface), SCADA và

máy tính qua các chuẩn Modbus, Ethernet,... Người vận hành cập nhật các dữ liệu được hiển thị để theo dõi, đánh giá và đưa ra các phương án vận hành cho phù hợp hiện trạng của thiết bị [17].

Các giải pháp giám sát cáp ngầm tự động trong nước xuất hiện với số lượng ít và chủ yếu tập trung vào giám sát vận hành của cáp cao áp, chưa ứng dụng chẩn đoán trước sự cố của cáp và mối nối cho cáp ngầm MV. Mặt khác, việc nghiên cứu để cập đến giám sát tình trạng cáp và mối nối cáp chưa được chú trọng.

2. ĐỀ XUẤT CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT CÁP NGẦM TỰ ĐỘNG

Cấu trúc chung của hệ thống đề xuất được trình bày trên hình 1. Bộ phận thu thập thông tin trực tiếp từ đường dây và mối nối cáp là các cảm biến đo dòng điện, nhiệt độ, độ ẩm và phát xạ âm thanh từ hoạt động PD. Các cảm biến này được kết nối đến "Nút" thu thập, xử lý tín hiệu. Qua nút này, tín hiệu được thu thập, xử lý và truyền đến máy chủ thông qua một giao thức không dây. Máy chủ là đơn vị trung tâm của hệ thống, thực hiện các chức năng thu thập, xử lý dữ liệu và cảnh báo sự cố.

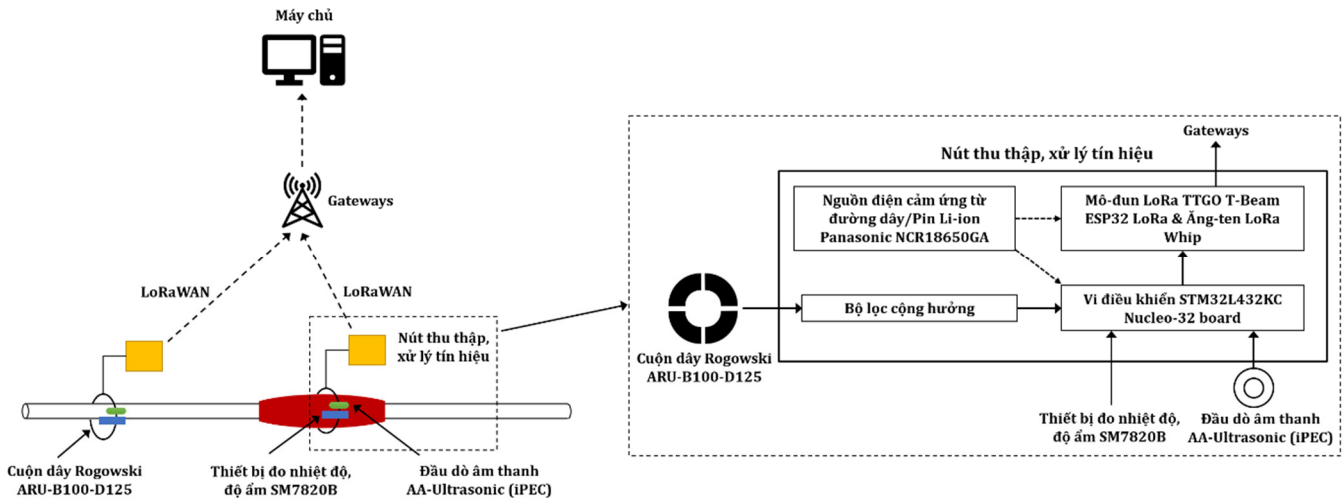
2.1. Các cảm biến

- Cảm biến đo dòng điện: một cuộn dây RC đặt bao quanh dây dẫn, đo cả dòng điện xoay chiều và dòng điện xung tốc độ cao, dựa trên định luật Ampe và Faraday [18], được xem như một giải pháp đo dòng điện hiệu quả. Khả năng đo nhiều tần số và biên độ tín hiệu giúp RC trở thành cảm biến thuận lợi để đánh giá hoạt động cũng như lỗi của hệ thống. Ngoài ra, RC có chi phí thấp, độ tuyến tính tốt và đo cách ly không xâm nhập. Trong đề xuất, sử dụng cuộn RC ARU-B100-D125 của LEM (Thụy Sĩ) để đo dòng điện [19]. Đường kính ngoài tối đa của cáp cần đo dòng điện là 125mm, cảm biến có độ chính xác 1% và tín hiệu đầu ra là 100mV/kA.

- Cảm biến nhiệt độ, độ ẩm: trong nghiên cứu này để xuất giải pháp dùng thiết bị tích hợp cả hai loại cảm biến nhiệt độ và độ ẩm, nhằm đơn giản hóa quá trình lắp đặt và sử dụng. Thiết bị được sử dụng là SM7820B (SONBEST, Shanghai) [20]. SM7820B sử dụng giao thức MODBUS-RTU bus RS485 tiêu chuẩn, dễ dàng kết nối với bộ vi điều khiển. Hơn nữa, thiết bị hoàn toàn có thể tồn tại trong môi trường khắc nghiệt.

- Cảm biến phát xạ âm thanh từ PD: là một đầu dò âm thanh siêu âm. Sự phát xạ âm thanh với dải tần số phát xạ từ 20kHz đến 1MHz tạo ra khi PD được hình thành và vật liệu xung quanh nó bị bay hơi, gây ra sự giải phóng nhanh chóng năng lượng cơ học, dẫn tới sự truyền dưới dạng

của một trường áp suất. Khi sóng áp suất được phát hiện trong hoạt động PD, cảm biến âm thanh sẽ tạo ra các xung điện có tần số và biên độ thích hợp [21]. Đầu dò âm thanh siêu âm AA của iPEC (Vương quốc Anh) được đề xuất sử dụng. Phạm vi đo lường từ -6dBμV đến +70dBμV với sai số đo lường $\pm 1\text{dB}\mu\text{V}$. Cảm biến cực kỳ nhạy và có thể phát hiện hoạt động dưới 10pC.



Hình 1. Cấu hình đề xuất của hệ thống giám sát cáp ngầm MV

2.2. Nút thu thập, xử lý tín hiệu

Nút thu thập, xử lý tín hiệu là bộ phận trung gian giữa các cảm biến và máy chủ, giúp DSO giám sát các thông số của mối nối và đường dây cáp ngầm. Để đáp ứng việc bảo trì và mở rộng trong tương lai, nút này được khuyến nghị đặt trong các hố ga cùng với mối nối cáp và một vài điểm yếu trên đường cáp ngầm. Một nút thu thập, xử lý tín hiệu sẽ kết nối trực tiếp với các cảm biến để thu thập tín hiệu và kết nối không dây với máy chủ để truyền dữ liệu. Một nút thu thập, xử lý tín hiệu bao gồm các linh kiện được thể hiện trên hình 1.

- Bộ lọc cộng hưởng: gồm điện trở, tụ điện và cuộn cảm, được ghép nối với nhau. Tín hiệu điện áp phản ứng với dòng điện trong dây dẫn được xử lý để đo và phân tích dòng điện. Nhờ việc thiết kế để tạo ra một tần số cộng hưởng tại tần số mong muốn của dòng điện cần đo, bộ lọc cộng hưởng được sử dụng cùng với RC để tăng độ nhạy và giảm nhiễu trong quá trình đo.

- Hệ thống vi điều khiển: quản lý toàn bộ chức năng được mô tả của nút: quản lý giao tiếp, thực hiện đo dòng điện, độ ẩm, nhiệt độ và sự phát xạ âm thanh liên tục. Bộ vi điều khiển STM32L432KC Nucleo-32 board được đề xuất sử dụng. Vi điều khiển này có thể kết nối với tất cả các thiết bị ngoại vi cần thiết, và với một chế độ tiêu thụ điện năng thấp. Tín hiệu đo dòng điện và âm thanh được kết nối vào cổng ADC của vi điều khiển. Trong khi, giá trị

tham số nhiệt độ, độ ẩm kết nối vào cổng SPI của bộ vi điều khiển, để cung cấp tín hiệu số cho đầu vào.

- Mô-đun LoRa: truyền dữ liệu từ nút thu thập, xử lý tín hiệu tới máy chủ. LoRaWAN được lựa chọn nhờ: hiệu quả sử dụng năng lượng cao, vùng phủ sóng rộng và khả năng gửi dữ liệu xuyên qua chướng ngại vật [22]; không bị kiểm soát bởi một nhà cung cấp duy nhất và có thể

được nhiều công ty, tổ chức sử dụng [23]; chủ yếu sử dụng với các cảm biến, việc trao đổi thông tin với máy chủ ở tốc độ truyền thấp và khoảng thời gian truyền tương đối dài [24]. Cấu hình sử dụng mô-đun TTGO T-Beam ESP32 LoRa kết hợp với anten Anten LoRa Whip cho cả phía phát và phía nhận tín hiệu. Ăng-ten LoRa Whip thường có kích thước nhỏ gọn và dễ lắp đặt, được thiết kế để cung cấp hiệu suất tốt trong môi trường không gian hẹp và giúp tăng cường phạm vi truyền dữ liệu xa.

- Nguồn cấp: Nút thu thập, xử lý tín hiệu phải có nguồn cung cấp đủ năng lượng để hoạt động. Mỗi nút được kết nối với một máy biến áp nguồn, cho phép khai thác năng lượng thông qua khớp nối cảm ứng và một mạch cầu chỉnh lưu. Tuy nhiên, máy biến áp chỉ có thể thu năng lượng khi có dòng điện chạy qua đường dây điện, vì vậy trong thời gian mất điện khi xảy ra sự cố, nút sẽ không có nguồn cung cấp năng lượng bổ sung. Để giải quyết vấn đề này, nút được trang bị 2 pin Li-ion Panasonic NCR18650GA mắc song song, dung lượng tổng khoảng 6800 mAh, pin có thể được sạc lại khi có đủ năng lượng hoặc xả khi cần.

2.3. Máy chủ

Máy chủ nhận dữ liệu từ nút thu thập, xử lý tín hiệu. Hoạt động của cấu hình đề xuất được tổ chức thành hai quá trình chính, do chương trình trong máy chủ điều khiển. Quá trình đầu tiên được thiết kế để giám sát và thu thập dữ liệu theo thời gian thực, trong khi quá trình thứ

hai được dùng để chuẩn bị và phân tích dữ liệu để đưa ra các cảnh báo cho đường dây cáp ngầm. Việc giám sát thời gian thực được thực hiện bằng các lệnh đo các thông số hoạt động tại cáp và mối nối cáp ngầm MV. Trong khi đó, việc xử lý và phân tích dữ liệu được thực hiện bởi một thuật toán, có vai trò đối chiếu các dữ liệu thu thập được với biên độ cho phép của chúng, từ đó đưa ra các cảnh báo cần thiết. Trong phần 3 và 4 của bài báo này, chúng tôi trình bày hoạt động và thuật toán của hai chương trình trong máy chủ.

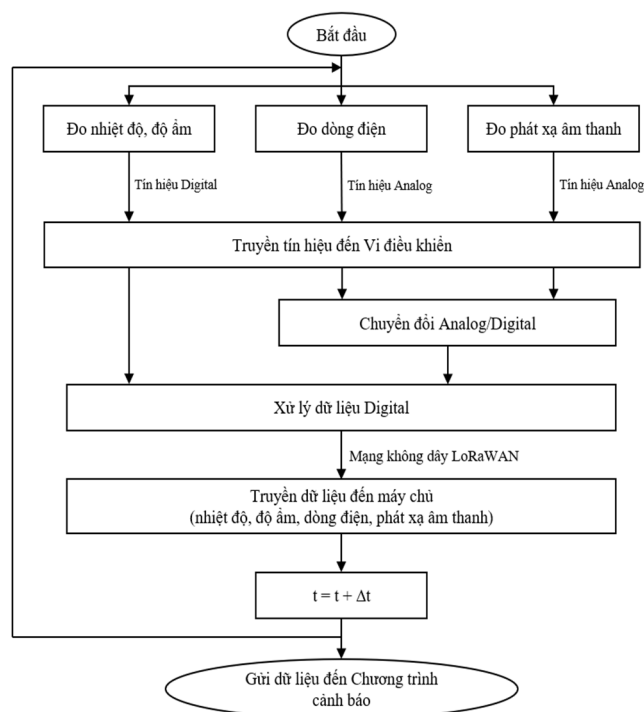
3. HOẠT ĐỘNG THU THẬP VÀ XỬ LÝ DỮ LIỆU

Hình 2 trình bày hoạt động thu thập và xử lý dữ liệu nhằm phục vụ giám sát và cảnh báo sự cố cho cáp ngầm MV. Bước khởi đầu, hệ thống thực hiện các phép đo nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và phát xạ âm thanh tại vị trí cáp hoặc mối nối cáp đặt hệ thống giám sát. Chu kỳ đo là Δt . Tín hiệu nhiệt độ và độ ẩm thu được từ thiết bị SM7820B sẽ là tín hiệu digital, trong khi tín hiệu dòng điện nhận được nhờ cuộn RC ARU-B100-D125 và phát xạ âm thanh từ đầu dò âm thanh siêu âm AA là tín hiệu analog. Những tín hiệu analog và digital này truyền đến vi điều khiển. Khác với tín hiệu digital, tín hiệu analog truyền đến cổng ADC của vi điều khiển, cần thêm quá trình chuyển đổi thành dạng tín hiệu digital. Quá trình chuyển đổi tín hiệu sẽ có ba bước chính: lấy mẫu, số hóa và mã hóa [25]. Trong bước lấy mẫu, thực đo và ghi lại tín hiệu tại các thời điểm nhất định. Tần số lấy mẫu và độ phân giải của ADC quyết định độ chính xác của tín hiệu digital cuối cùng. Tiếp theo, trong quá trình số hóa, giá trị của mỗi mẫu được làm tròn hoặc gán gần nhất với một số nguyên cụ thể. Cuối cùng, tín hiệu được mã hóa thành các bit, giữ nguyên thông tin về biên độ và biến thiên của tín hiệu analog gốc. Kết quả là một tín hiệu digital mà vi điều khiển có thể xử lý, truyền tải và lưu trữ. Khi các tín hiệu đã được đồng bộ về dạng digital, vi điều khiển tiến hành quá trình xử lý dữ liệu gồm: Tín hiệu dòng điện, phát xạ âm thanh đã được chuyển đổi sang dạng digital; và tín hiệu digital nhiệt độ, độ ẩm. Trong quá trình xử lý dữ liệu digital, thực hiện hai giai đoạn chính là tiền xử lý và phân tích. Tiền xử lý tập trung vào làm sạch và chuẩn hóa dữ liệu để loại bỏ nhiễu và đảm bảo tính nhất quán. Phân tích dữ liệu sử dụng các thuật toán thống kê và máy học để khám phá cấu trúc và mối quan hệ trong dữ liệu. Cuối cùng, thông tin được trích xuất và tổng hợp.

Sau quá trình xử lý dữ liệu digital, vi điều khiển truyền thông dữ liệu đến máy chủ thông qua mạng không dây LoRaWAN nhờ vào mô-đun được mô tả trong mục 2.2.

Một thông số quan trọng cần được xác định trong thuật toán của cấu hình hệ thống giám sát để xuất, đó là

chu kỳ thu thập dữ liệu Δt . Khoảng thời gian giữa các phép đo cần được tính toán một cách chính xác và khoa học. Thời gian thực hiện phép đo có thể có ảnh hưởng lớn đến tần số lấy mẫu trong việc thu thập dữ liệu. Khi thời gian giữa các phép đo kéo dài, cần phải điều chỉnh tần số lấy mẫu để đảm bảo không bỏ lỡ các biến động quan trọng. Nếu thời gian giữa các phép đo quá lớn so với tần số lấy mẫu, sẽ có nguy cơ bị mất thông tin quan trọng trong dữ liệu. Trong trường hợp này, việc giảm tần số lấy mẫu là cần thiết để đảm bảo dữ liệu thu thập đủ chi tiết và chính xác. Ngược lại, nếu thời gian giữa các phép đo ngắn hơn so với tần số lấy mẫu, có thể gây lãng phí tài nguyên. Do đó, cần nhắc kỹ lưỡng giữa thời gian thực hiện phép đo và tần số lấy mẫu là quan trọng để đảm bảo hiệu quả và chính xác trong việc thu thập dữ liệu.



Hình 2. Hoạt động thu thập và xử lý dữ liệu. Δt - thời gian giữa 2 lần thực hiện phép đo

4. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN CẢNH BÁO SỰ CỐ CHO CÁP NGẦM

Thuật toán cảnh báo sự cố cho cáp ngầm MV được mô tả trong hình 3, đóng vai trò then chốt trong cấu hình để xuất, giúp khai thác hiệu quả các thiết bị được lựa chọn trong phần cứng của cấu hình. Việc xử lý dữ liệu dựa trên phân tích biên độ giá trị tham số ứng suất vừa được đo từ điểm “nóng” cáp và mối nối cáp, bao gồm giá trị nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện và phát xạ âm thanh. Các giá trị đo này đã được biên dịch từ các dữ liệu gửi lên từ nút thu thập, xử lý tín hiệu. Để phát hiện dấu hiệu bất thường của cáp

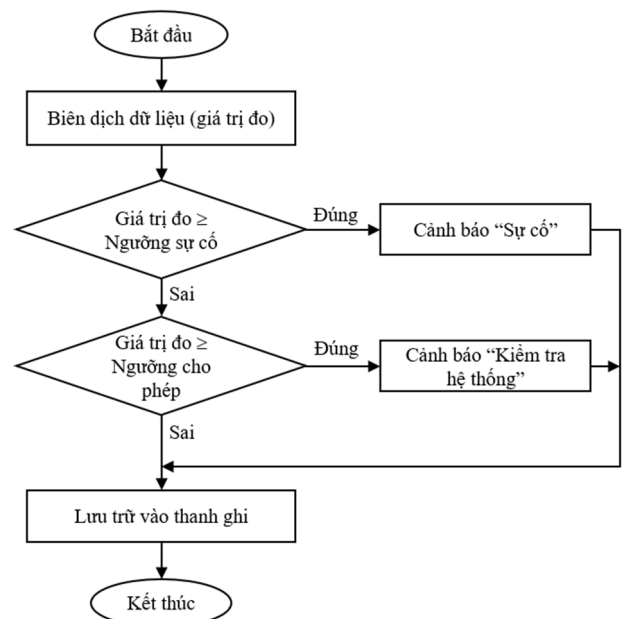
hoặc mỗi nối cáp, biên độ giá trị đo của các ứng suất được so sánh với giá trị ngưỡng cho phép và ngưỡng sự cố:

- Nếu biên độ giá trị của ứng suất lớn hơn giá trị “Ngưỡng sự cố” và xuất hiện thay đổi không tương quan với sự thay đổi của cáp và mối nối cáp, thì cảnh báo “Sự cố” sẽ được kích hoạt. Từ đó, các biện pháp khẩn cấp có thể được thực hiện để giảm thiểu hậu quả của sự cố và bảo vệ an toàn cho hệ thống.

- Khi biên độ giá trị của ứng suất chỉ dừng ở mức lớn hơn giá trị “Ngưỡng cho phép”, thì cảnh báo “Kiểm tra hệ thống” sẽ được kích hoạt. Tuy có mức độ thấp hơn cảnh báo sự cố, cảnh báo kiểm tra vẫn mang lại nhiều giá trị. Cảnh báo kiểm tra được kích hoạt khi các cảm biến đo lường phát hiện ra các dấu hiệu, biểu hiện không bình thường, đảm bảo việc kiểm tra và đánh giá sớm trạng thái của đường dây. Điều này cung cấp cơ hội để kiểm tra và đánh giá trạng thái của đường dây cáp ngầm, từ đó phòng tránh sự cố và bảo vệ hệ thống. Hơn nữa, các thông số được ghi lại có tương quan với sự thay đổi tương đối nhằm tương quan với các yếu tố khác nhau, và với sự suy giảm cách điện của cáp và mối nối cáp.

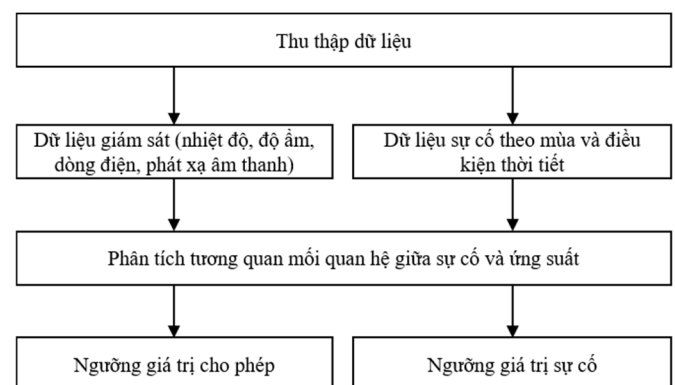
Sự kết hợp giữa cảnh báo kiểm tra và cảnh báo sự cố giúp duy trì hoạt động an toàn và liên tục của hệ thống đường dây cáp ngầm, từ đó giảm thiểu nguy cơ tai nạn và thiệt hại. Đồng thời, cung cấp cơ hội cho DSO tiến hành các biện pháp dự phòng và cải thiện tính ổn định của hệ thống trong tương lai. Các dữ liệu thu thập được ở trạng thái bình thường và bất thường của cáp ngầm MV đều được lưu trữ vào thanh ghi kỹ thuật số. Các bản ghi này là nơi chứa thông tin cần thiết về quá trình thu thập dữ liệu, giúp có thể hiểu rõ hơn về sự phát triển của dữ liệu theo thời gian. Bằng cách ghi chép thông tin, có thể dễ dàng theo dõi và phân tích các biến động quan trọng trong dữ liệu. Dữ liệu từ những sự kiện “Sự cố” hoặc “Kiểm tra hệ thống” sử dụng để DSO xem xét và đánh giá tình trạng đường dây cáp ngầm. Khi xuất hiện nhiều điểm nút thu thập, xử lý tín hiệu gửi đến cảnh báo trong cùng khoảng thời gian ngắn, đồng nghĩa với việc đường dây cáp ngầm đã xuống cấp, cần được sửa chữa, bảo dưỡng toàn diện. Với những sự kiện chỉ thực hiện phép đo, dữ liệu cũng sẽ được ghi lại nhằm mục đích thu thập để tạo lập biểu đồ thời gian, qua đó phân tích xu hướng, hiệu ứng vụ mùa, tính chu kỳ và phân tích biến động của các ứng suất. Để có thể xây dựng tương quan xu hướng, dữ liệu thu thập cần phải tích lũy trong một khoảng thời gian dài. Quá trình tích lũy này cần lặp lại với nhiều chu kỳ tuần hoàn, nhằm xây dựng biểu đồ thời gian chính xác nhất liên quan đến các tham số ứng suất. Cuối cùng, việc duy trì

các bản ghi quan trọng cũng đảm bảo rằng thông tin sẽ luôn sẵn sàng và dễ dàng truy cập khi cần thiết, giúp tăng cường hiệu suất và hiệu quả trong quản lý dữ liệu.



Hình 3. Thuật toán cảnh báo sự cố cáp ngầm

Trong thuật toán giám sát và cảnh báo sự cố cho cáp ngầm này, “Ngưỡng sự cố” và “Ngưỡng cho phép” đóng vai trò quan trọng hàng đầu. Việc xác định đúng các giá trị của các ngưỡng này giúp cho việc chẩn đoán và cảnh báo trở nên đáng tin cậy và giá trị. Hai ngưỡng giá trị này phụ thuộc theo mùa trong năm và điều kiện thời tiết, do đó việc đánh giá và cập nhật giá trị của chúng được thực hiện theo chu kỳ 1 năm. Trình tự thực hiện xác định “Ngưỡng sự cố” và “Ngưỡng cho phép” được mô tả trên hình 4.



Hình 4. Trình tự thực hiện để xác định ngưỡng ứng suất

Ban đầu, dữ liệu giám sát được ghi lại trong thanh ghi của hệ thống sẽ được biểu diễn trên biểu đồ thời gian, qua đó thể hiện xu hướng và sự biến động của dữ liệu qua các khoảng thời gian trong năm. Đối với dữ liệu sự cố theo mùa và điều kiện thời tiết, sẽ cần thu thập từ nguồn cơ sở

dữ liệu của các cơ quan quản lý điện lực của đường dây cáp ngầm MV. Bước kế tiếp, đối chiếu, so sánh giá trị của các ứng suất với sự cố theo mùa và điều kiện thời tiết. Từ đó, thực hiện phân tích tương quan mối quan hệ giữa các ứng suất và sự cố theo thời tiết để xác định “Ngưỡng sự cố” của các ứng suất. Phương pháp tiếp cận là sự kết hợp giữa phân tích thực tế và xây dựng mô hình dự đoán. Việc xác định ngưỡng cho phép của cáp ngầm MV từ dữ liệu thu thập, cũng sẽ tiến hành phân tích dữ liệu cẩn thận và chi tiết. Bằng cách nắm vững thông tin thực tế về hiệu suất của cáp trong các điều kiện khác nhau, xác định được phạm vi hoạt động an toàn và ổn định của cáp. Từ dữ liệu cơ sở này, đặt ra ngưỡng cho phép và giới hạn tối đa mà cáp có thể chịu đựng mà không gây ra sự cố. Điều này đảm bảo rằng quá trình vận hành và quản lý cáp được tiếp cận một cách khoa học và đáng tin cậy.

5. KẾT LUẬN

Kết quả của nghiên cứu là một đề xuất về cấu hình giám sát tự động đường dây và mối nối cáp ngầm trung thế. Đây là một giải pháp kỹ thuật toàn diện giúp giám sát các thông số có liên quan trực tiếp đến các nguyên nhân chính gây ra sự cố của đường dây cáp ngầm. Trong đề xuất, chúng tôi lựa chọn cuộn dây RC, thiết bị đo độ ẩm, nhiệt độ, đầu dò âm thanh phát xạ từ PD, vi điều khiển và mô-đun LoRa trong phần cứng của giải pháp, làm nhiệm vụ thu thập, xử lý và truyền dữ liệu. Một thuật toán cảnh báo sự cố và nguy cơ tiềm ẩn của đường dây cáp ngầm được phát triển dựa trên các dữ liệu giám sát và dữ liệu ghi nhận sự cố của đơn vị quản lý cáp điện. Điểm cốt lõi tạo nên tính hiệu quả của thuật toán này là việc xác định được các ngưỡng ứng suất theo điều kiện môi trường, tương ứng với tần suất xảy ra sự cố của đường dây cáp ngầm trung thế. Tuy nhiên, để triển khai và thử nghiệm giải pháp này trong thực tế cần phải thực hiện các công việc, trong đó điển hình như việc xác định chính xác ngưỡng cho phép và ngưỡng sự cố thay đổi theo điều kiện thời tiết, xác định chính xác chu kỳ lấy mẫu, xác định vị trí đặt và số lượng tối thiểu các nút thu thập, xử lý tín hiệu trên đường dây cáp ngầm MV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Fruth B., “Partial discharge mechanisms in solid insulation systems,” *In Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Sestri Levante, Italy, 22-25 June 1992; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 1992.
- [2]. D. M. Hopkins, D. E. Ragaller, “Partial Discharge in Power Cables,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1, 5, 810-820, 1994.

- [3]. R. A. Jongen, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit, A. L. J. Janssen, “Influence of ambient temperature on the failure behavior of cable joints,” in *2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2007.
- [4]. Raffaella Di Sante, Abbas Ghaderi, Alessandro Mingotti, Lorenzo Peretto, Roberto Tinarelli, “Effects of Thermal Cycles on Interfacial Pressure in MV Cable Joints,” *Sensors*, 20(1), 169, 2019. <https://doi.org/10.3390/s20010169>.
- [5]. Fred Steennis, Piet Soepboer, Jan Mosterd, Peter Buys, Piet Oosterlee, Leon Bokma, Ralf Meier, “The effect of high current loads on joints in MV cable systems,” in *21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 6-9 June 2011, Paper 0884.
- [6]. Densley J., “Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - An overview,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 17, 14-22, 2001.
- [7]. Zhou C., Yi H., Dong X., “Review of Recent Research Towards Power Cable Life Cycle Management,” *High Volt.*, 2, 179-187, 2017.
- [8]. Ammar Anwar Khan, Nazar Malik, Abdulrehman Al-Arainy, Saad Alghuwainem, “A Review of Condition Monitoring of Underground Power Cables,” in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, A-23, pp.909-912, 2012.
- [9]. Bing Jiang, Alanson P. Sample, Ryan M. Wistort, Alexander V. Mamishev, “Autonomous Robotic Monitoring of Underground Cable Systems,” *IEEE Xplore*, 2005. DOI: 10.1109/ICAR.2005.1507481.
- [10]. Jery Althaf, Muhammad Imthiaz, Rejith Raj, “Underground Cable Fault Detection using Robot,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 3, 2, 145-151, 2013.
- [11]. C. W. Eastham, K. J. Vander Eyken, “Practical Application of On-line Partial Discharge Monitoring for the Improvement of Long-Term Power Network Reliability,” *CIGRE-576, CIGRE Canada Conference & Exhibition*, 2023.
- [12]. *Fiber-based Current Monitoring*, 2023. AP sensing. Switzerland.
- [13]. Fred Steennis, Peter Buys, Ravish P. Y. Mehairjan, Peter C. J. M. van der Wielen, “Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin’s network,” DOI:10.13140/2.1.2144.1285.
- [14]. Kai Chen, Yi Yue, Yuejin Tang, “Research on Temperature Monitoring Method of Cable on 10 kV Railway Power Transmission Lines Based on Distributed Temperature Sensor,” *Energies*, 14, 3705, 2-15, 2021.
- [15]. Hoang Viet, Duy Tan, *DTS system - solution to support 110kV underground cable monitoring*. Viet Nam Power Corporation, Central Power Corporation, 2022. <https://cpc.vn/vi-vn/Tin-tuc-su-kien/Tin-tuc-chi-tiet/articleId/51005>.
- [16]. Xuan Phu, *Tan Uyen 500kV station applies digital transformation in operation management*. Digital transformation - Science and Technology, Power Transmission Company N04, 2021.
- [17]. Nguyen Tan Dat, Vo Sy Danh, PTC4 successfully researched and applied online partial discharge and temperature monitoring technology. National Power Transmission Corporation, Vietna, 2022. <http://ptc4.npt.evn.vn/d6/vi-VN/news/PTC4-nguyen-cuu-ung-dung-thanh-cong-cong-nghe-giam-sat-phong-dien-cuc-bo-va-nhiệt-do-truc-tuyen-6-1291-1547>.

- [18]. M. Marracci, B. Tellini, C. Zappacosta, G. Robles, "Critical parameters for mutual inductance between Rogowski coil and primary conductor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60, 2, 625-632, 2011.
- [19]. *Datasheet ARU series*, 2022, LEM.
- [20]. *SM7820B RS485 temperature and humidity sensor*, User Manual, SONBEST.
- [21]. Qian S., Chen H., Xu Y., Su L., "High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by sagnac fiber optic sensor," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 25, 2313-2320, 2018.
- [22]. Vicky Bonilla, Brandon Campoverde, Sang Guun Yoo, "A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications," *Sensors*, 23(20), 8440, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23208440>.
- [23]. Lalle Y., Fourati L.C., Fourati M., Barraca J. P., "A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid," in *Proceedings of the 2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium*, Paris, France, 1-6, 2019.
- [24]. Panagi G., Katzis K., "Towards 3-Lead Electrocardiogram Monitoring over LoRa: A Conceptual Design," in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops*, Dublin, Ireland, 71-5, 2020.
- [25]. Nasser Kehtarnavaz, *Digital Signal Processing System Design - Chapter 3 - Analog-to-Digital Signal Conversion*. Elsevier, 57-91, 2008.

AUTHORS INFORMATION

**Tran Duc Hai¹, Trinh Trong Chuong², Hoang Mai Quyen²,
Nguyen Vu Gia Bao³, Vu Thi Thu Nga⁴**

¹KTD-K13 Master Student, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

³K64-ET-LUH Student, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

⁴Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam

BẢN GIẢI TRÌNH CHỈNH SỬA ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: Nghiên cứu xây dựng cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm trung áp

Ngành đào tạo: Kỹ thuật điện

Mã ngành: 8520201

Họ và tên học viên: Trần Đức Hải

Họ và tên người hướng dẫn: Hoàng Mai Quyên

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Đơn vị công tác: Trường Điện – Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

NỘI DUNG GIẢI TRÌNH

TT	Ý kiến của Hội đồng	Ý kiến của học viên và nội dung chỉnh sửa
1	Chỉnh sửa các lỗi chính tả, hình thức trình bày hình vẽ trong báo cáo.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: - Đã chỉnh sửa các lỗi chính tả trong báo cáo như: “polyethylene” thành “polyetylen” (trang 7), “sạc lờ” thành “sặt lờ” (trang 21), ... - Đã tách hình 1.1 thành các hình 1.1a, 1.1b, 1.1c và 1.1d (trang 12-13).
2	Bổ sung phần nghĩa tiếng Việt đối với danh mục các ký hiệu và từ viết tắt.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: đã thêm phần nghĩa tiếng Việt như: “Polyetylen mật độ cao”, “Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số”, ... (Trang vi, vii)
3	Nêu rõ các thông số chính trong giám sát tình trạng vận hành của cáp.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: đã nêu rõ các thông số cốt lõi trong giám sát tình trạng vận hành của cáp, bao gồm “dòng điện, phóng điện cục bộ và nhiệt độ”. (Trang 36)
4	Nêu rõ các giả thiết vật lý sử dụng trong mô hình mô phỏng của nghiên cứu.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: đã nêu rõ các giả thiết vật lý sử dụng trong nghiên cứu bao gồm “chiều dài cáp vô hạn” và “nhiệt độ bề mặt cáp đồng nhất”. (Trang 67-68)

5	Bổ sung phần nhận xét cho bảng 3.3.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: đã thêm nội dung nhận xét, phân tích các giá trị mức dòng điện, tham số a, tham số b và $T_{s.warning}$ trong bảng 3.3. (Trang 86-87)
6	Chỉnh sửa hình thức, nội dung trình bày phần Kết luận và Khuyến nghị.	Học viên tiếp thu và chỉnh sửa theo góp ý của hội đồng. Nội dung chỉnh sửa: đã chỉnh sửa hình thức và nội dung trình bày phần Kết luận và Khuyến nghị. (Trang 89-91)

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

**Xác nhận của đại diện hội
đồng chấm đề án tốt nghiệp**

**Ý kiến của người
hướng dẫn**

Học viên ký tên

**BIÊN BẢN
HỌP HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP**

Căn cứ Quyết định số 54/QĐ-ĐHCN ngày 13/01/2025 của Hiệu trưởng Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội về việc thành lập Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp, Hội đồng đã họp vào hồi...8...giờ...00...phút, ngày...22.../01/2025, tại phòng ...1004... nhà A1, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội để đánh giá luận đề án tốt nghiệp cho học viên: **Trần Đức Hải**, mã học viên: 20237001191, ngành đào tạo: Kỹ thuật điện, mã ngành: 8520201.

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm trung áp.

Người hướng dẫn: TS. Hoàng Mai Quyền - Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội.

Các thành viên của Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp có mặt: ...5.../...5...

Stt	Họ và tên, học hàm/học vị	Cơ quan công tác	Nhiệm vụ
1	PGS.TS. Trịnh Trọng Chương	Trường ĐH Công nghiệp HN	Chủ tịch
2	TS. Nguyễn Mạnh Quân	Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Thư ký
3	TS. Hoàng Trung Kiên	Trường ĐH KH&CN Hà Nội	Phản biện 1
4	TS. Nguyễn Phi Long	Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Phản biện 2
6	TS. Lê Quang Sáng	Viện KHCN Năng lượng và MT	Ủy viên

Các nội dung thực hiện:

1- Chủ tịch Hội đồng điều khiển buổi họp. Công bố Quyết định của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội về việc thành lập Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp.

2- Thư ký Hội đồng đọc lý lịch khoa học và các điều kiện bảo vệ đề án tốt nghiệp của học viên (Có bản lý lịch khoa học và kết quả các học phần của học viên kèm theo).

3- Học viên trình bày tóm tắt đề án tốt nghiệp.

4- Phản biện đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)

5- Các câu hỏi của thành viên Hội đồng:

- Khi nhận tài liệu là như thế nào?

- Khi cấp tài liệu, phân bổ công việc như thế nào?

.....

.....

.....

.....

6. Trả lời của học viên:

- Đề án báo cáo các môn học
- Học bổng tốt nghiệp (chỉ tính toán tài liệu)

7. Người hướng dẫn hoặc thư ký đọc nhận xét về quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp của học viên (có văn bản kèm theo).

8. Ý kiến của Hội đồng (Cần nêu rõ các vấn đề của đề án tốt nghiệp cần chỉnh sửa (nếu có)):

- Cần chỉnh lại hình thức

Yêu cầu xác nhận của Hội đồng sau khi chỉnh sửa: Có: ☒

Không: ☐

Thành viên xác nhận: Nguyễn Mạnh Quân..... Nhiệm vụ trong HĐ: Thư ký

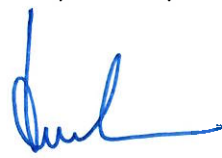
9. Tổng hợp kết quả

- Chủ tịch HĐ công bố điểm đánh giá đề án tốt nghiệp của từng thành viên và điểm trung bình đề án tốt nghiệp (có Phiếu đánh giá đề án tốt nghiệp và Phiếu tổng hợp điểm đánh giá đề án tốt nghiệp kèm theo);

- Điểm đề án tốt nghiệp: Bảng số: 89..... Bảng chữ: tám mươi chín.....

Kết luận: Đề án tốt nghiệp (đạt hoặc không đạt)..... Đạt..... yêu cầu là một đề án tốt nghiệp thạc sĩ theo Quy chế đào tạo trình độ thạc sĩ hiện hành./.

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG


Trịnh Trọng Chương

THƯ KÝ HỘI ĐỒNG


Nguyễn Mạnh Quân

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP
(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: **Nghiên cứu xây dựng cấu hình hệ thống giám sát tự động cho cáp ngầm tri**

Ngành đào tạo: Kỹ thuật điện

Mã ngành: 8520201

Họ và tên học viên: Trần Đức Hải

Họ và tên người phản biện: Nguyễn Phi Long

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Nơi công tác: Khoa điện, Trường Điện-Điện tử, Trường ĐHCN Hà Nội

Số điện thoại liên hệ: 0981188820

Nhiệm vụ trong hội đồng: Phản biện 2

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cấp thiết của đề tài:

- Đề tài nghiên cứu về giám sát và đánh giá nhiệt độ trong cáp ngầm MV có tính cấp thiết cao, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu tăng cường độ tin cậy và tuổi thọ của hệ thống phân phối điện. Cáp ngầm MV là một phần quan trọng trong hạ tầng điện năng, việc theo dõi và giám sát tình trạng của cáp là rất cần thiết để phòng ngừa sự cố do quá nhiệt, đảm bảo tính ổn định của hệ thống.
- Với sự phát triển của công nghệ cảm biến và mô phỏng số, việc kết hợp hai phương pháp này giúp cải thiện khả năng giám sát mà không cần can thiệp trực tiếp vào cấu trúc kỹ thuật của cáp, mang lại hiệu quả cao và tiết kiệm chi phí. Chính vì vậy, nghiên cứu này có giá trị thực tiễn lớn, đáp ứng yêu cầu cấp bách về cải tiến hệ thống giám sát và bảo trì cáp ngầm.vững.

2. Nội dung và kết quả nghiên cứu đạt được, những đóng góp mới của đề án tốt nghiệp:

- Đề tài đã tập trung vào việc mô phỏng và phân tích sự phân bố nhiệt độ trong cáp ngầm MV dưới các điều kiện dòng điện và nhiệt độ môi trường khác nhau. Nghiên cứu áp dụng các phương pháp mô phỏng nhiệt, kết hợp với phương trình hồi quy tuyến tính để dự đoán sự biến động của nhiệt độ trong cáp.
- Xác định được mối tương quan giữa nhiệt độ bề mặt cáp (T_s) và nhiệt độ lớp cách điện (T_{max}) giúp cải thiện khả năng dự đoán và phát hiện sự cố sớm.
- Xác định được ngưỡng cảnh báo nhiệt độ bề mặt cáp ($T_{s.warning}$), hỗ trợ việc phát hiện sớm các tình huống quá nhiệt. Đưa ra giải pháp giám sát tự động với sự kết hợp giữa cảm biến và mô phỏng, góp phần nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ của hệ thống phân phối điện.

3. *Những vấn đề hạn chế cần trao đổi:*

- Mặc dù phương pháp mô phỏng đã thể hiện hiệu quả trong việc dự đoán phân bố nhiệt độ trong cáp, mô hình vẫn có thể gặp phải sự không chính xác khi thay đổi điều kiện môi trường, đặc biệt trong các trường hợp có sự thay đổi lớn về độ ẩm, tác động của các yếu tố ngoại cảnh khác mà mô phỏng chưa tính đến.
- Các cảm biến nhiệt độ cần được lựa chọn và lắp đặt chính xác để đảm bảo thu thập dữ liệu chính xác, và việc triển khai hệ thống cảm biến trong môi trường thực tế có thể gặp khó khăn về chi phí và khả năng bảo trì.
- Nghiên cứu chủ yếu dựa trên các mô phỏng lý thuyết và điều kiện cụ thể. Việc kiểm nghiệm mô hình trong các điều kiện thực tế và các loại cáp ngầm đa dạng hơn có thể giúp cải thiện độ tin cậy của phương pháp.

4. *Sự phù hợp của tên đề tài và các yếu tố liên quan:*

- Tên đề tài: Đề tài phù hợp với chương trình đào tạo chuyên ngành kỹ thuật điện, đặc biệt là các khóa học về hệ thống phân phối điện và bảo trì thiết bị điện.
- Sự phù hợp với chương trình đào tạo: Nội dung đề án bám sát mục tiêu và yêu cầu đề cương đã được phê duyệt. Các phần nghiên cứu về mô phỏng nhiệt, phương pháp kết hợp cảm biến và mô phỏng, cũng như các kết quả thu được đều đáp ứng đúng yêu cầu ban đầu của đề tài.
- Sự trùng lặp: Nghiên cứu này không có sự trùng lặp đáng kể với các công trình trước đây, mà chủ yếu xây dựng dựa trên các phương pháp đã có, kết hợp với việc ứng dụng mô phỏng và cảm biến để cải thiện hiệu quả giám sát cáp ngầm.
- Tính hợp lý trong kết cấu: Kết cấu của luận văn hợp lý, từ phần lý thuyết cơ bản, phương pháp nghiên cứu, kết quả mô phỏng đến các phân tích và kết luận. Các phần trong luận văn được sắp xếp rõ ràng và dễ hiểu, phù hợp với quy trình nghiên cứu khoa học.

KẾT LUẬN

Tôi đồng ý đề tác giả Trần Đức Hải được bảo vệ đề án tốt nghiệp trước Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp.

Hà Nội, Ngày 20 tháng 2 năm 2025
Người nhận xét
(Ký, ghi họ và tên)


Nguyễn Phú Long

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP *(Dùng cho người phản biện)*

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: Nghiên cứu xây dựng cấu hình hệ thống giám sát tự động
cho cáp ngầm trung áp

Ngành đào tạo: Kỹ thuật điện

Mã ngành: 8520201

Họ và tên học viên: Trần Đức Hải

Họ và tên người phản biện: Hoàng Trung Kiên

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Nơi công tác: Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội

Số điện thoại liên hệ: 0985144586

Nhiệm vụ trong hội đồng: Phản biện

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cấp thiết của đề tài

Vấn đề giám sát và chẩn đoán sự cố đối với cáp ngầm ngày càng quan trọng, khi mà số tuyến cáp được hạ ngầm ngày càng nhiều. Điều đó giúp nâng cao đáng kể độ an toàn và tin cậy vận hành của các tuyến cáp ngầm.

2. Nội dung và kết quả nghiên cứu đạt được, những đóng góp mới của đề án tốt nghiệp

Luận văn đã đề xuất được một mô hình giám sát cáp ngầm và đặc biệt là thuật toán cảnh báo sự cố và cảnh báo kiểm tra hệ thống. Ngoài ra luận văn cũng đã thực hiện mô phỏng sự phân bố nhiệt độ trong cách điện cáp theo nhiệt độ bề mặt với ý tưởng nhằm giám sát và cảnh báo tình trạng của cáp điện.

3. Những vấn đề hạn chế cần trao đổi

- Rà soát lại lỗi chính tả: sặc lờ (trang 21), v.v.
- Kiểm tra lại đầy đủ phần tiếng Việt đối với danh mục các ký hiệu và từ viết tắt.
- Không để nhiều hình vẽ trong 1 hình, ví dụ hình 1.1 bao gồm 4 hình nhỏ.
- Làm rõ khái niệm “toàn diện” trong mục đích giám sát, cảnh báo sự cố.
- Hệ thống giám sát tập trung giám sát các thông số: dòng điện, nhiệt độ, độ ẩm, và đầu dò âm thanh (để kiểm tra PD). Thông số nhiệt độ và độ ẩm

- Việc lắp đặt các cuộn dây cũng như cảm biến được đặt ở đâu? và số lượng bao nhiêu thì đảm bảo độ tin cậy trong việc giám sát và cảnh báo sự cố? đặc biệt PD mang tính cục bộ thì sẽ xử lý như thế nào?
 - Việc giả thiết nhiệt độ bề mặt cáp đồng đều liệu có hợp lý không?
 - Thời gian ổn định nhiệt độ (6h) phụ thuộc vào yếu tố nào?
4. Sự phù hợp của tên đề tài với chương trình đào tạo, với nội dung đề án tốt nghiệp và sự trùng lặp với các công trình đã công bố; Nội dung đề án tốt nghiệp so với đề cương đã được phê duyệt; Tính hợp lý trong kết cấu đề án tốt nghiệp
- Luận văn có tên và nội dung phù hợp với chương trình đào tạo, kết cấu của luận văn hợp lý.

KẾT LUẬN

Tôi đồng ý (~~không đồng ý~~) đề tác giả Trần Đức Hải được bảo vệ đề án tốt nghiệp trước Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp.

Hà Nội, Ngày 20 tháng 01 năm 2024
Người nhận xét



Hoàng Trung Kiên

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT TỰ ĐỘNG CHO CẤP NGẦM TRUNG ÁP

by Hải Trần Đức

Submission date: 12-Dec-2024 11:55PM (UTC+0700)

Submission ID: 2537679561

File name:

42351_Hai_Tran_uc_NGHIEN_CUU_XAY_DUNG_CAU_HINH_HE_THONG_GIAM_SAT_TU_ONG_CHO_CAP_NGAM_TRUNG_AP_50117_1874542960.pdf
(3.17M)

Word count: 30138

Character count: 114526

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CẤU HÌNH HỆ THỐNG GIÁM SÁT TỰ ĐỘNG CHO CẤP NGẦM TRUNG ÁP

ORIGINALITY REPORT

10%	9%	4%	0%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	www.ctu.edu.vn	4%
	Internet Source	

2	Ton Duc Thang University	1%
	Publication	

3	pecc4.vn	1%
	Internet Source	

4	evn.com.vn	1%
	Internet Source	

5	idoc.pub	1%
	Internet Source	

6	khoadien.hau.edu.vn	<1%
	Internet Source	

7	tmu.edu.vn	<1%
	Internet Source	

8	vanbanphapluat.co	<1%
	Internet Source	

9	vjol.info.vn	<1%
	Internet Source	

10

Submitted to Vietnam Maritime University

Student Paper

<1 %

11

loga.vn

Internet Source

<1 %

12

dienelectric.com

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches < 100 words

Exclude bibliography On