

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC**



LƯƠNG VĂN PHÚC

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP
TIẾT KIỆM ĐIỆN NĂNG CHO HỘ GIA ĐÌNH
SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT PHỤ TẢI
KHÔNG XÂM NHẬP**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ QUẢN LÝ NĂNG LƯỢNG

HÀ NỘI, 2025

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC

LƯƠNG VĂN PHÚC

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP
TIẾT KIỆM ĐIỆN NĂNG CHO HỘ GIA ĐÌNH
SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT PHỤ TẢI
KHÔNG XÂM NHẬP

Ngành : Quản lý Năng lượng
Mã số : 8510602

Người hướng dẫn khoa học: TS. Vũ Minh Pháp
TS. Ngô Phương Lê

HÀ NỘI, 2025

LỜI CẢM ƠN

Đề tài: “Nghiên cứu giải pháp tiết kiệm điện năng cho hộ gia đình sử dụng công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập” được thực hiện trên cơ sở thực hiện bởi tác giả dưới sự hướng dẫn chỉ bảo tận tình của TS.Vũ Minh Pháp cùng TS.Ngô Phương Lê và các thầy cô của Khoa QLCN&NL – Trường ĐH Điện lực và các chuyên gia trong lĩnh vực năng lượng đã tư vấn và hỗ trợ tác giả trong quá trình làm đề án. Trong quá trình hoàn thiện đề án khó có thể tránh khỏi những sai sót, tác giả rất mong nhận được sự góp ý của thầy cô giáo, đồng nghiệp, bạn đọc để đề án được hoàn thiện hơn.

Xin chân thành cảm ơn!

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Tác giả

Lương Văn Phúc

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề án là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của Tiến sĩ Vũ Minh Pháp và Tiến sĩ Ngô Phương Lê. Tôi cũng xin cam đoan rằng mọi dữ liệu được sử dụng cho việc thực hiện đề án này là chính xác và các thông tin trích dẫn trong đề án này đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Tôi xin chân thành cảm ơn!

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Tác giả

Lương Văn Phúc

MỤC LỤC

MỤC LỤC.....	i
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT	iii
DANH MỤC BẢNG BIỂU	iv
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	v
I. MỞ ĐẦU	6
1. Lý do chọn đề tài	6
2. Mục đích nghiên cứu	8
3. Nhiệm vụ nghiên cứu:	9
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	9
5. Phương pháp nghiên cứu.....	10
II. NỘI DUNG	10
CHƯƠNG 1: CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT PHỤ TẢI KHÔNG XÂM NHẬP CHO CÁC MẠNG ĐIỆN HỘ GIA ĐÌNH.....	11
1.1. Tổng quan về công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM)	11
1.1.1. Khái niệm và nguyên lý hoạt động.	11
1.1.2. So sánh NILM với các phương pháp khác.....	15
1.1.3. Ứng dụng của NILM trong giám sát và tiết kiệm điện năng.	16
1.2. Tổng hợp các nghiên cứu về NILM trên thế giới và trong nước	18
1.2.1. Thế giới	19
1.2.2. Việt Nam	24
1.3. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập	25
1.3.1. Mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập.....	25
1.3.2. Kịch bản và bộ dữ liệu đầu vào phục vụ nghiên cứu	32
1.3.3. Hiệu ích thu được từ ứng dụng mô hình nghiên cứu đề xuất	38
KẾT LUẬN CHƯƠNG I.....	40
CHƯƠNG 2: HIỆN TRẠNG GIÁM SÁT QUẢN LÝ TIÊU THỤ ĐIỆN HỘ GIA ĐÌNH.....	41
2.1. Tổng quan về tiêu thụ điện trong hộ gia đình	41
2.1.1. Đặc điểm tiêu thụ điện trong hộ gia đình.....	41

2.1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến mức tiêu thụ điện.....	43
2.1.3. Xu hướng sử dụng điện trong bối cảnh hiện nay	44
2.2. Các giải pháp tiết kiệm điện phổ biến hiện nay.....	45
2.2.1. Các giải pháp truyền thống	45
2.2.2. Ứng dụng công nghệ thông minh trong tiết kiệm điện	47
2.2.3. Giới thiệu công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM).....	48
2.3. Hiện trạng công tác giám sát và quản lý thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình hiện nay.....	49
2.3.1. Hiện trạng.....	49
2.3.2. Phân tích, đánh giá tồn tại.....	49
2.3.3. Đề xuất các vấn đề cần nghiên cứu.....	50
KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	52
CHƯƠNG 3: ỨNG DỤNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT PHỤ TẢI KHÔNG THÂM NHẬP TIẾT KIỆM ĐIỆN NĂNG CHO HỘ GIA ĐÌNH	53
3.1. Kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo bộ NILM	53
3.2. Thí nghiệm bộ NILM	56
3.3. Đánh giá kết quả tiết kiệm điện năng của bộ NILM.....	49
3.3.1. Phương pháp đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện	49
3.3.2. Dữ liệu phục vụ đánh giá	53
3.3.3. Kết quả đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện năng	58
3.3.4. Đề xuất	61
KẾT LUẬN CHƯƠNG 3	63
III. KẾT LUẬN	65
IV. KHUYẾN NGHỊ	66
DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO	68

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

STT	Từ viết tắt	Nguyên nghĩa
1	HTĐ	Hệ thống điện
2	NILM	Non-Intrusive Load Monitoring
3	QLNL	Quản lý năng lượng
4	TN	Thí nghiệm

DANH MỤC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 1-1: Các loại đặc trưng phổ biến.....</i>	<i>13</i>
<i>Bảng 1-2: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về cấu trúc lắp đặt</i>	<i>15</i>
<i>Bảng 1-3: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về độ chính xác</i>	<i>15</i>
<i>Bảng 1-4: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về chi phí triển khai và vận hành.....</i>	<i>15</i>
<i>Bảng 1-5: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về ứng dụng và tính mở rộng.....</i>	<i>16</i>
<i>Bảng 1-6: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về khả năng tích hợp công nghệ mới</i>	<i>16</i>
<i>Bảng 1-7: Số lượng tham số của mô hình phụ thuộc vào l</i>	<i>32</i>
<i>Bảng 1-8: Tổng hợp một số bộ dữ liệu NILM công khai quan trọng.....</i>	<i>34</i>
<i>Bảng 1-9: Tổng hợp một số bộ dữ liệu NILM công khai quan trọng.....</i>	<i>37</i>
<i>Bảng 2-1: Tiêu thụ điện theo nhóm chức năng</i>	<i>41</i>
<i>Bảng 3-1: Thông số phần cứng cơ bản của NVIDIA Jetson Nano</i>	<i>54</i>
<i>Bảng 3-2: Các thí nghiệm ứng với cấu trúc mạng nơ ron S1, S2, S3</i>	<i>56</i>
<i>Bảng 3-3: Bảng so sánh kết quả thí nghiệm.....</i>	<i>56</i>
<i>Bảng 3-4: Bảng tỷ lệ tiêu thụ điện theo nhóm thiết bị.....</i>	<i>54</i>
<i>Bảng 3-5: Hoạt động của người dùng với các thiết bị điện trong ngày làm việc</i>	<i>54</i>
<i>Bảng 3-6: Tổng hợp điện năng nhu cầu, thực tế và triển vọng tiết kiệm của từng thiết bị</i>	<i>58</i>

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1-1: Sơ đồ nguyên lý hoạt động công nghệ NILM.....	12
Hình 1-2: Tổng công suất theo thời gian và các Dấu hiệu công suất của các thiết bị phụ tải riêng biệt.....	19
Hình 1-3: S1-Mô hình kết hợp hồi quy và phân loại.....	28
Hình 1-4: S2-Mô hình chỉ dùng hồi quy.....	29
Hình 1-5: S3-Hồi quy và phân loại sử dụng kết quả từ cơ chế attention.....	30
Hình 3-1: Sơ đồ thiết bị NILM đề xuất.....	53
Hình 3-2: Phần công tơ thông minh.....	55
Hình 3-3: Phần máy tính nhúng NVIDIA Jetson Nano	55
Hình 3-4: Kết quả thí nghiệm	58
Hình 3-5: Hàm công suất nhu cầu điển hình với thiết bị phụ thuộc nhiệt độ	52
Hình 3-6: Hàm công suất nhu cầu điển hình của đèn theo độ sáng	53
Hình 3-7: Công suất tiêu thụ điện theo thời gian và nhóm thiết bị chính.....	56
Hình 3-8: Đường cong công suất của hộ gia đình trong một ngày mùa hè.....	57
Hình 3-9: Đường cong công suất hoạt động của các thiết bị được phân tách từ tổng công suất	57
Hình 3-10 Triển vọng tiết kiệm năng lượng – điều hòa	59
Hình 3-11: Triển vọng tiết kiệm năng lượng – tivi.....	60
Hình 3-12: Triển vọng tiết kiệm năng lượng – đèn	60

I. MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng điện năng ngày càng gia tăng cùng với quá trình đô thị hóa và sự phổ biến của các thiết bị điện trong hộ gia đình, bài toán sử dụng điện tiết kiệm và hiệu quả đang trở thành một yêu cầu cấp thiết đối với hệ thống điện quốc gia. Khu vực hộ gia đình hiện chiếm tỷ trọng đáng kể trong tổng điện năng tiêu thụ, đồng thời có đặc điểm phụ tải phân tán, khó kiểm soát và chịu ảnh hưởng lớn từ thói quen sử dụng điện của người dân. Vì vậy, việc nâng cao hiệu quả quản lý và giám sát tiêu thụ điện trong hộ gia đình có ý nghĩa quan trọng đối với mục tiêu tiết kiệm điện năng và giảm phụ tải cho hệ thống điện.

Tuy nhiên, thực tế cho thấy công tác giám sát tiêu thụ điện trong hộ gia đình hiện nay vẫn còn nhiều hạn chế. Phần lớn các hộ gia đình chỉ được trang bị công tơ điện tổng phục vụ mục đích đo đếm điện năng để thanh toán, không cung cấp thông tin chi tiết về mức tiêu thụ điện của từng thiết bị hay theo từng thời điểm trong ngày. Việc thiếu thông tin minh bạch và kịp thời khiến người sử dụng điện khó nhận biết được các thiết bị tiêu thụ điện lớn, các thời điểm sử dụng điện không hợp lý cũng như tiềm năng tiết kiệm điện trong sinh hoạt hằng ngày. Do đó, các biện pháp tiết kiệm điện hiện nay chủ yếu mang tính tự phát, dựa vào kinh nghiệm và ý thức cá nhân, chưa dựa trên cơ sở dữ liệu và phân tích khoa học.

Các phương pháp giám sát tiêu thụ điện truyền thống theo hướng xâm nhập, như lắp đặt công tơ phụ hoặc cảm biến cho từng thiết bị, tuy có thể cung cấp thông tin chi tiết nhưng đòi hỏi chi phí đầu tư lớn, can thiệp sâu vào hệ thống điện và khó triển khai đại trà cho hộ gia đình. Điều này đặt ra yêu cầu cần có một giải pháp giám sát vừa cung cấp được thông tin chi tiết về tiêu thụ điện theo thiết bị, vừa đảm bảo tính kinh tế, dễ triển khai và phù hợp với điều kiện hạ tầng hiện có.

Trong bối cảnh đó, công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (Non-Intrusive Load Monitoring – NILM) được xem là một hướng tiếp cận có nhiều tiềm năng. NILM cho phép phân tách mức tiêu thụ điện của các thiết bị sử dụng điện chỉ từ dữ liệu đo tại công tơ tổng, mà không cần lắp đặt thêm cảm biến cho từng thiết bị. Nhờ đó, NILM không chỉ giúp giảm chi phí đầu tư và đơn giản hóa quá trình triển khai, mà còn mở ra khả năng giám sát tiêu thụ điện theo thời gian thực và theo từng thiết bị trong hộ gia đình.

Những thông tin chi tiết về mức tiêu thụ năng lượng của các thiết bị trong nhà còn có thể dùng cho những ứng dụng khác như đáp ứng nhu cầu của lưới điện thông

minh, giám sát hoạt động của người già hoặc người bệnh, v.v. Các ứng dụng NILM tiềm năng có thể kể đến như:

1) Tiết kiệm năng lượng: NILM cho phép người sử dụng biết được chính xác lượng điện mà các thiết bị tiêu thụ và giúp họ tìm ra những vật dụng tiêu thụ năng lượng nhiều để có thể đưa ra những quyết định tiết kiệm năng lượng hợp lý. NILM có thể giúp người dùng nhận biết các thiết bị tiêu thụ nhiều năng lượng và đưa ra quyết định để thay thế hoặc sử dụng chúng ít hơn, giảm đáng kể lượng năng lượng tiêu thụ. Ngoài ra, NILM có thể giúp xác định các mẫu tiêu thụ điện của các thiết bị và đưa ra các giải pháp để giảm thiểu tiêu thụ điện trong thời gian dài.

2) Phát hiện sự cố về điện: NILM cũng có thể được sử dụng để kiểm tra thiết bị điện, như phát hiện các thiết bị bị lỗi hoặc cần được bảo trì. Khi có sự cố về điện, thường sẽ có sự thay đổi trong dòng điện và phụ tải của các thiết bị. Sử dụng NILM, các thay đổi này có thể được theo dõi và phát hiện, giúp phát hiện các sự cố và thực hiện các biện pháp khắc phục. Ví dụ, nếu có sự cố về điện trong một hệ thống mạng lưới điện, thường sẽ có các thay đổi trong dòng điện và phụ tải. Sử dụng NILM, các thay đổi này có thể được theo dõi và phát hiện, giúp nhà cung cấp điện xác định được vị trí của sự cố và thực hiện các biện pháp khắc phục. Tương tự, trong một hệ thống điện gia đình, nếu có sự cố về điện như thiết bị bị hỏng hoặc quá tải, sử dụng NILM cũng có thể phát hiện các thay đổi trong dòng điện và phụ tải, từ đó giúp xác định vị trí của sự cố và thực hiện các biện pháp khắc phục.

3) Giám sát các hoạt động sinh hoạt hàng ngày: giám sát hoạt động của người bệnh hoặc người cao tuổi [7]. Theo thời gian, sức khỏe và khả năng vận động của người già thường giảm, họ có thể gặp khó khăn trong việc sử dụng các thiết bị trong nhà, như bếp, máy giặt, máy sưởi, v.v. Bằng cách sử dụng NILM, các thiết bị điện trong gia đình có thể được theo dõi để xác định các hoạt động của người già. Ví dụ, nếu họ thường xuyên bật máy sưởi vào những giờ sáng sớm, đó có thể là dấu hiệu của việc họ dậy sớm. Nếu hoạt động bếp được theo dõi, có thể nhận thấy việc người già thường xuyên nấu ăn vào một thời gian nhất định. Những thông tin này có thể cung cấp cho gia đình hoặc nhà chăm sóc thông tin về hoạt động của người già, giúp họ đưa ra các quyết định hỗ trợ và chăm sóc tốt hơn. Hơn nữa, NILM cũng có thể giúp người già tự quản lý năng lượng tiêu thụ của mình và tiết kiệm năng lượng. Nếu người già không thể nhớ khi nào họ đã bật hoặc tắt thiết bị, NILM có thể giúp họ theo dõi tiêu thụ điện và đưa ra các giải pháp để tiết kiệm điện và tiền bạc.

4) Ứng dụng cho hệ thống quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS): Trong các hệ thống EMS, NILM được sử dụng để giám sát tiêu thụ năng lượng của các thiết bị và hệ thống khác nhau trong hệ thống, từ đó đưa ra những

quyết định thông minh về việc tối ưu hóa và tiết kiệm năng lượng. Ví dụ, thông qua việc phát hiện các thiết bị tiêu thụ năng lượng không cần thiết hoặc có hiệu suất thấp, hệ thống EMS có thể đề xuất các biện pháp để tiết kiệm năng lượng, tăng cường hiệu suất và giảm chi phí. Ngoài ra, NILM cũng có thể được sử dụng để phát hiện các sự cố trong hệ thống tiêu thụ năng lượng, như mất điện, tình trạng quá tải hoặc các vấn đề kỹ thuật khác. Thông qua việc giám sát phụ tải và phân tích dữ liệu tiêu thụ năng lượng, NILM có thể giúp hệ thống EMS phát hiện và khắc phục sự cố một cách nhanh chóng và hiệu quả.

5) Ứng dụng cho đáp ứng nhu cầu trong lưới điện thông minh: Trong lưới điện thông minh, các thiết bị và hệ thống khác nhau được kết nối với nhau để tạo thành một hệ thống thông minh, cho phép việc giám sát và điều khiển hệ thống năng lượng trở nên hiệu quả hơn. Tuy nhiên, để quản lý lượng điện cung cấp và tiêu thụ, các nhà cung cấp điện cần phải biết được lượng điện tiêu thụ của khách hàng của họ.

Lợi ích và tiềm năng ứng dụng trên của Công nghệ NILM đã được nói đến từ lâu, nhưng phải tới thập kỷ vừa qua và nhất là một vài năm qua, nhờ có sự phát triển bùng nổ của Công nghệ trí tuệ nhân tạo nói chung và Công nghệ Máy học nói riêng, cùng với phần cứng thiết bị nhúng ngày càng mạnh mẽ hơn, khả năng triển khai công nghệ NILM đến từng công tơ mới có thể khả thi. Do đó, đây là thời điểm thích hợp để tận dụng làn sóng công nghệ này để nghiên cứu phát triển hoàn thiện Công nghệ NILM.

Xuất phát từ (1) những lợi ích về hỗ trợ tiết kiệm năng lượng và ứng dụng tiềm năng của NILM trong các lĩnh vực khác nhau, trong bối cảnh công nghệ này còn nhiều dư địa nghiên cứu phát triển; (2) sự phát triển của Công tơ thông minh và những đột phá trong công nghệ Máy học và cả các thiết bị nhúng có năng lực tính toán cao trong thời gian qua; học viên đề xuất thực hiện nội dung nghiên cứu “Nghiên cứu giải pháp tiết kiệm điện năng cho hộ gia đình sử dụng công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập”.

2. Mục đích nghiên cứu

Mục đích nghiên cứu của đề án là nghiên cứu, xây dựng và đánh giá một giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập nhằm theo dõi và phân tích tiêu thụ điện năng của các thiết bị trong hộ gia đình từ dữ liệu đo tại công tơ tổng. Trên cơ sở kết quả giám sát và phân tích, đề tài hướng tới việc cung cấp thông tin minh bạch về hành vi sử dụng điện, hỗ trợ người sử dụng điều chỉnh thói quen tiêu thụ điện theo hướng tiết kiệm và hiệu quả, đồng thời góp phần giảm phụ tải vào giờ cao điểm của hệ thống điện.

Thông qua việc ứng dụng các thuật toán học máy và học sâu trong nhận dạng thiết bị và ước lượng công suất tiêu thụ, đề tài kỳ vọng nâng cao độ chính xác của kết quả phân tách phụ tải, bảo đảm tính khả thi trong triển khai và mở rộng ứng dụng trong quản lý năng lượng hộ gia đình.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu:

Tổng quan và hệ thống hóa cơ sở lý luận về quản lý năng lượng, giám sát tiêu thụ điện và công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập trong hộ gia đình.

Phân tích hiện trạng công tác giám sát và quản lý thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình, đánh giá những tồn tại và hạn chế trong việc sử dụng điện tiết kiệm và hiệu quả.

Nghiên cứu các phương pháp và thuật toán giám sát phụ tải không xâm nhập, lựa chọn mô hình phù hợp cho bài toán phân tách tiêu thụ điện trong hộ gia đình.

Xây dựng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập dựa trên dữ liệu đo tại công tơ tổng, phục vụ nhận dạng thiết bị và ước lượng công suất tiêu thụ điện.

Thực hiện mô phỏng, kiểm thử và đánh giá hiệu quả của mô hình đề xuất thông qua các chỉ tiêu phù hợp.

Phân tích kết quả nghiên cứu nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của giải pháp đề xuất trong hỗ trợ quản lý năng lượng và tiết kiệm điện năng cho hộ gia đình.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: là quá trình tiêu thụ điện năng của các thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình và các phương pháp, mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) dựa trên dữ liệu đo điện năng tại điểm đo tổng. Ngoài ra, đề án tập trung nghiên cứu các thuật toán học máy và học sâu được ứng dụng trong bài toán nhận dạng thiết bị và phân tách phụ tải điện năng.

Phạm vi nghiên cứu:

- Nghiên cứu áp dụng giám sát phụ tải không xâm nhập cho mạng điện cục bộ của hộ gia đình, không xét đến các đối tượng tiêu thụ điện quy mô công nghiệp hoặc thương mại.

- Dữ liệu nghiên cứu tập trung vào các thông số điện cơ bản như công suất tiêu thụ theo thời gian, được thu thập tại công tơ điện tổng hoặc từ các bộ dữ liệu tiêu thụ điện tương đương.

- Nghiên cứu tập trung vào việc nhận dạng và phân tách một số thiết bị điện phổ biến trong hộ gia đình có ảnh hưởng lớn đến tổng mức tiêu thụ điện.

- Đề án không đi sâu vào thiết kế phần cứng đo đếm điện năng mà tập trung vào mô hình, thuật toán và khả năng ứng dụng của giải pháp giám sát đề xuất.

Thời gian nghiên cứu: Từ năm 2023 – 2025

5. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết: Tổng hợp, phân tích các tài liệu khoa học, công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến quản lý năng lượng, giám sát phụ tải và công nghệ NILM nhằm xây dựng cơ sở lý luận cho đề tài.

Phương pháp phân tích và đánh giá thực trạng: Phân tích hiện trạng công tác giám sát và quản lý tiêu thụ điện trong hộ gia đình, xác định các tồn tại và nhu cầu thực tiễn cần giải quyết.

Phương pháp mô hình hóa và mô phỏng: Xây dựng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập dựa trên các thuật toán học máy và học sâu; mô phỏng và kiểm thử mô hình trên dữ liệu tiêu thụ điện.

Phương pháp so sánh và đánh giá: Đánh giá hiệu quả của mô hình đề xuất thông qua các chỉ tiêu phù hợp, so sánh với một số phương pháp hoặc mô hình tham khảo.

Phương pháp phân tích kết quả: Phân tích kết quả phân tách phụ tải nhằm đánh giá tiềm năng tiết kiệm điện năng và khả năng hỗ trợ quản lý năng lượng hộ gia đình.

II. NỘI DUNG

Đề án tốt nghiệp thạc sĩ bao gồm: Phần mở đầu, kết luận, phụ lục, danh mục tài liệu tham khảo, và nội dung của đề tài có **03 chương** sau:

Chương 1: Công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập cho các mạng điện hộ gia đình.

Chương 2: Hiện trạng giám sát quản lý tiêu thụ điện hộ gia đình.

Chương 3: Ứng dụng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập tiết kiệm điện năng cho hộ gia đình.

CHƯƠNG 1: CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT PHỤ TẢI KHÔNG XÂM NHẬP CHO CÁC MẠNG ĐIỆN HỘ GIA ĐÌNH

1.1. Tổng quan về công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM)

1.1.1. Khái niệm và nguyên lý hoạt động.

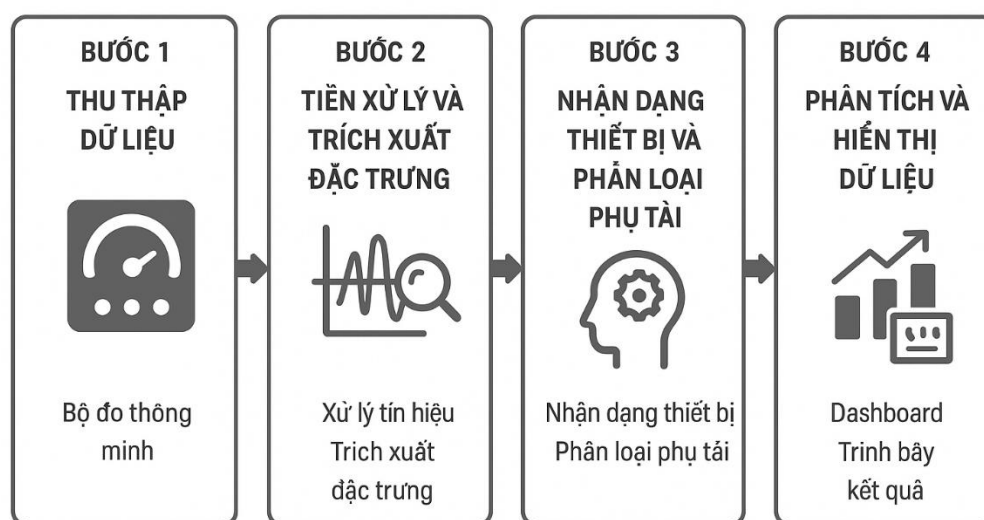
1.1.1.1. Khái niệm

Giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) là một phương pháp giám sát và phân tích việc tiêu thụ điện năng của từng thiết bị điện riêng lẻ trong một hệ thống điện, mà không cần phải gắn cảm biến trực tiếp vào từng thiết bị. Thay vào đó, NILM chỉ cần một thiết bị đo lường đặt tại điểm đo tổng, thường là sau công tơ điện của hộ gia đình hoặc hệ thống điện trong doanh nghiệp. Từ đó, hệ thống sử dụng các thuật toán xử lý tín hiệu và trí tuệ nhân tạo (AI) để phân tích dữ liệu điện và phân biệt các thiết bị khác nhau dựa trên “dấu vết tiêu thụ” đặc trưng. Phương pháp này được giới thiệu lần đầu tiên bởi George Hart vào cuối những năm 1980 tại MIT.

1.1.1.2. Nguyên lý hoạt động

Công nghệ NILM hoạt động dựa trên nguyên tắc phân tích tín hiệu điện tổng của toàn bộ hệ thống để nhận diện và tách riêng mức tiêu thụ của từng thiết bị mà không cần gắn cảm biến lên từng tải. Thay vì đo trực tiếp tại từng thiết bị, NILM chỉ cần một điểm đo duy nhất — thường đặt tại công tơ tổng hoặc bảng điện chính — để thu thập các thông số điện như dòng điện, điện áp, công suất, hệ số công suất và dạng sóng. Dữ liệu thu được sẽ được xử lý thông qua các thuật toán nhận dạng mẫu (pattern recognition). Mỗi thiết bị điện khi bật, tắt hay thay đổi trạng thái đều tạo ra các “dấu hiệu đặc trưng” (electrical signatures) trên đường dây, ví dụ như mức thay đổi công suất, dạng sóng khởi động, sự dao động dòng điện hoặc đặc tính hài. Các thuật toán của NILM, kết hợp với trí tuệ nhân tạo và học máy, sẽ phân tích những dấu hiệu này để phân tách, xác định và ước tính mức tiêu thụ của từng thiết bị theo thời gian thực. Nhờ cơ chế này, NILM có thể cung cấp thông tin chi tiết về hành vi sử dụng điện trong hộ gia đình hoặc doanh nghiệp mà không làm thay đổi hệ thống điện hiện có. Công nghệ này giúp giám sát năng lượng chính xác, phát hiện bất thường, đánh giá hiệu suất thiết bị và hỗ trợ tối ưu hóa tiêu thụ điện một cách hiệu quả, linh hoạt và tiết kiệm chi phí.

NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CÔNG NGHỆ NILM



Hình 1-1: Sơ đồ nguyên lý hoạt động công nghệ NILM

Nguyên lý hoạt động: Công nghệ NILM hoạt động dựa trên 4 bước chính

Bước 1: Thu thập dữ liệu điện năng tại điểm đo tổng

- Một thiết bị đo duy nhất (thường là smart meter) sẽ ghi lại các thông số như: dòng điện, điện áp, công suất tiêu thụ (real & reactive power), hệ số công suất, sóng hài,...

- Dữ liệu được thu thập theo thời gian thực, với tần suất từ 1Hz đến hàng kHz.

Mục tiêu:

Ghi lại toàn bộ tín hiệu điện năng tiêu thụ tại một điểm duy nhất — thường là đầu vào chính của hệ thống điện (sau công tơ điện).

Dữ liệu thu thập gồm:

- + Dòng điện (I)
- + Điện áp (V)
- + Công suất tác dụng (P)
- + Công suất phản kháng (Q)
- + Hệ số công suất (PF)
- + Dạng sóng dòng và điện áp

+ Sóng hài (harmonics)

Thiết bị sử dụng:

+ Cảm biến dòng (CT – Current Transformer)

+ Cảm biến điện áp

+ Bộ chuyển đổi tín hiệu và thiết bị thu thập dữ liệu (data acquisition unit)

Bước 2: Tiền xử lý và trích xuất đặc trưng (Feature Extraction)

Mỗi thiết bị điện có một “dấu vết điện năng” đặc trưng (signature).

Các kỹ thuật xử lý tín hiệu và nhận dạng mẫu (pattern recognition) được dùng để phát hiện các thay đổi đặc biệt khi thiết bị bật/tắt hoặc thay đổi trạng thái hoạt động.

Mục tiêu:

Lọc nhiễu, chuẩn hóa và trích xuất các đặc trưng tín hiệu điện có thể dùng để nhận dạng thiết bị.

Các loại đặc trưng phổ biến được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 1-1: Các loại đặc trưng phổ biến

Loại đặc trưng	Mô tả	Ví dụ
Steady-State	Giá trị ổn định của công suất hoặc điện áp	Bóng đèn LED: 9W ổn định
Transient	Dấu hiệu lúc bật/tắt thiết bị	Máy lạnh khởi động tạo dòng đột biến
Waveform shape	Hình dạng tín hiệu dòng điện	Thiết bị cảm ứng có sóng dạng đặc biệt
Harmonics	Phân tích sóng hài bậc cao	Thiết bị dùng biến tần như máy g
Loại đặc trưng	Mô tả	Ví dụ

Xử lý bằng:

+ Biến đổi Fourier (FFT)

+ Biến đổi Wavelet

+ Bộ lọc thông cao/thấp

+ Phân tích chuỗi thời gian

Bước 3: Nhận dạng thiết bị và phân loại phụ tải

Dựa vào đặc trưng đã học từ trước hoặc bằng thuật toán học máy (machine learning, deep learning), hệ thống sẽ tách riêng dữ liệu tổng thành tiêu thụ của từng thiết bị.

Ví dụ: phân biệt được tủ lạnh, điều hòa, máy giặt và đèn đang hoạt động bao lâu, tiêu thụ bao nhiêu điện.

Mục tiêu:

Sử dụng AI/ML để xác định thiết bị nào đang hoạt động dựa trên chữ ký điện đã trích xuất.

Thuật toán sử dụng:

- + Học có giám sát (supervised learning): Cần có dữ liệu huấn luyện từ trước
Decision Tree, SVM, Random Forest, ANN
- + Học không giám sát (unsupervised learning): Không cần gán nhãn
Clustering, k-Means, HMM (Hidden Markov Models)
- + Học sâu (deep learning): CNN, RNN để nhận dạng trực tiếp từ dạng sóng

Quá trình:

- + Ghi nhận sự thay đổi công suất hoặc tín hiệu → Xác định "sự kiện"
- + So sánh với thư viện mẫu phụ tải → Nhận dạng thiết bị
- + Tính toán công suất tiêu thụ của thiết bị đó trong khoảng thời gian hoạt động

Bước 4: Phân tích và hiển thị dữ liệu

Kết quả được trình bày thông qua ứng dụng hoặc bảng điều khiển (dashboard).

Người dùng hoặc hệ thống có thể đưa ra quyết định tối ưu hóa, cảnh báo tiêu thụ bất thường, phát hiện lỗi thiết bị, v.v.

Mục tiêu:

- + Trình bày kết quả cho người dùng và hệ thống quản lý.

Giao diện cung cấp:

- + Danh sách thiết bị đang hoạt động
- + Lượng điện tiêu thụ theo từng thiết bị

- + Biểu đồ thời gian thực (real-time monitoring)
- + Cảnh báo khi thiết bị bất thường (vượt công suất, hoạt động ngoài giờ)

1.1.2. So sánh NILM với các phương pháp khác.

Công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) có một số điểm khác biệt so với các phương pháp giám sát tải truyền thống, dưới đây là một số so sánh chính:

So sánh chi tiết theo từng tiêu chí

1.1.2.1. Về cấu trúc lắp đặt

Bảng 1-2: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về cấu trúc lắp đặt

Phương pháp	Thiết bị lắp đặt	Can thiệp hệ thống điện
NILM	1 điểm đo tổng	Không xâm nhập, dễ triển khai
ILM	Gắn vào từng thiết bị	Xâm nhập mạnh, thay đổi hệ thống
Sub-metering	Công tơ phụ theo vùng	Can thiệp vừa phải

Nhận xét: NILM là đơn giản và tiết kiệm không gian thiết bị nhất.

1.1.2.2. Về độ chính xác

Bảng 1-3: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về độ chính xác

Phương pháp	Thiết bị lắp đặt	Can thiệp hệ thống điện
NILM	Trung bình – cao	Thuật toán AI, dữ liệu huấn luyện
ILM	Rất cao	Đo trực tiếp từng thiết bị
Sub-metering	Cao	Độ phân giải công tơ, nhóm thiết bị

Nhận xét: ILM chính xác nhất, nhưng NILM đang được cải thiện nhờ AI học sâu và mô hình học máy.

1.1.2.3. Về chi phí triển khai và vận hành

Bảng 1-4: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về chi phí triển khai và vận hành

Phương pháp	Thiết bị lắp đặt	Can thiệp hệ thống điện
NILM	Rất thấp	Thấp

ILM	Rất cao	Cao (nhiều cảm biến)
Sub-metering	Trung bình – cao	Trung bình

Nhận xét: NILM phù hợp cho triển khai quy mô lớn hoặc hộ gia đình với ngân sách hạn chế.

1.1.2.4. Về ứng dụng và tính mở rộng

Bảng 1-5: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về ứng dụng và tính mở rộng

Phương pháp	Thiết bị lắp đặt	Can thiệp hệ thống điện
NILM	Rất dễ	Rất phù hợp
ILM	Rất khó mở rộng	Không phù hợp nếu hệ thống có quá nhiều thiết bị
Sub-metering	Có thể mở rộng theo từng khu vực	Phù hợp doanh nghiệp, trung tâm thương mại

Nhận xét: NILM có tính linh hoạt cao, dễ tích hợp thêm thiết bị mà không cần thay đổi phần cứng.

1.1.2.5. Về khả năng tích hợp công nghệ mới

Bảng 1-6: So sánh chi tiết theo từng tiêu chí về khả năng tích hợp công nghệ mới

Phương pháp	Thiết bị lắp đặt	Can thiệp hệ thống điện
NILM	Rất mạnh	Có thể phát hiện lỗi, dự đoán hành vi
ILM	Hạn chế (không cần AI)	Chủ yếu phân tích cơ bản
Sub-metering	Trung bình	Có thể thống kê, dự báo nhưng ít thông minh

Nhận xét: NILM là nền tảng lý tưởng cho các ứng dụng nhà thông minh, hệ thống giám sát thông minh, hệ thống điều khiển tối ưu năng lượng.

1.1.3. Ứng dụng của NILM trong giám sát và tiết kiệm điện năng.

1.1.3.1. Ứng dụng trong hộ gia đình và nhà thông minh

Theo dõi tiêu thụ điện của từng thiết bị

+ Người dùng có thể biết thiết bị nào tiêu thụ nhiều điện nhất, vào thời điểm nào trong ngày.

+ Giúp điều chỉnh hành vi sử dụng như: tắt thiết bị khi không dùng, thay thế thiết bị cũ tiêu tốn điện.

Ví dụ: NILM xác định máy nước nóng dùng quá nhiều điện vào ban ngày → người dùng lập lịch hẹn giờ để chỉ bật buổi tối khi cần → tiết kiệm ~20% điện/tháng.

Cảnh báo tiêu thụ bất thường

+ Phát hiện thiết bị hoạt động ngoài giờ bình thường (ví dụ: TV hoạt động lúc 2 giờ sáng).

+ Phát hiện thiết bị lỗi hoặc hao điện ngầm, như tủ lạnh tiêu thụ cao hơn do mất hiệu suất làm lạnh.

Ví dụ: NILM phát hiện máy lạnh tiêu thụ cao hơn bình thường → cảnh báo người dùng kiểm tra hoặc bảo trì sớm, tránh hóa đơn điện tăng cao.

Tích hợp với hệ thống điều khiển nhà thông minh (Smart Home)

+ Khi biết thiết bị nào đang hoạt động, hệ thống có thể tự động điều chỉnh tải, như: Tắt đèn khi không có người; Hạn chế bật máy lạnh và bếp điện cùng lúc vào giờ cao điểm;

Ví dụ: Tích hợp NILM với Google Home/Alexa để tự động tắt các thiết bị tiêu thụ cao khi phát hiện không có người trong nhà.

1.1.3.2. Ứng dụng trong tòa nhà và doanh nghiệp

Quản lý năng lượng theo khu vực và theo thời gian thực

+ Giúp ban quản lý tòa nhà giám sát được phụ tải tổng và phân bổ điện năng theo từng tầng, từng khu vực mà không cần lắp công tơ phụ khắp nơi.

Ví dụ: Một tòa nhà văn phòng phát hiện tầng 5 (ít người) vẫn có tiêu thụ điện cao mỗi đêm → xử lý tắt hệ thống đèn/camera không cần thiết.

Phát hiện tải ẩn – tiêu thụ không cần thiết

+ Nhận diện thiết bị đang chạy nền hoặc bị bỏ quên không tắt.

Ví dụ: NILM phát hiện máy in văn phòng chạy cả đêm → lập lịch tự động ngắt điện vào 18h → tiết kiệm điện ~5–7% mỗi tháng.

Hỗ trợ đánh giá đầu tư tiết kiệm năng lượng

+ Doanh nghiệp có thể xác định thiết bị nào nên được thay thế bằng loại tiết kiệm điện hơn, dựa trên phân tích dữ liệu lâu dài.

Ví dụ: Sau 6 tháng phân tích, NILM cho thấy 3 máy lạnh đời cũ tiêu thụ 40% tổng điện năng khu vực → đề xuất thay bằng máy inverter mới → giảm tiêu thụ ~25%.

1.1.3.3. Ứng dụng trong ngành năng lượng và điện lực

Hỗ trợ chương trình điều chỉnh phụ tải (Demand Response)

+ Nhà cung cấp điện có thể dùng NILM tại hộ dân để dự báo phụ tải theo thiết bị và đề xuất giảm tải khi cần thiết.

Ví dụ: Khi có cảnh báo thiếu điện, công ty điện lực có thể gửi thông báo khuyến nghị người dân hạn chế dùng thiết bị công suất cao vào giờ cao điểm, dựa trên dữ liệu từ NILM.

Xây dựng mô hình tiêu thụ điện theo hành vi người dùng

+ Phục vụ cho nghiên cứu, lập kế hoạch năng lượng đô thị, tối ưu hóa sản xuất và phân phối điện.

Ví dụ: Dữ liệu từ hàng ngàn hộ gia đình có tích hợp NILM giúp thành phố xây dựng bản đồ tiêu thụ điện theo giờ và mùa → tối ưu hóa vận hành nhà máy điện.

1.1.3.4. Ứng dụng trong giáo dục, nghiên cứu và phát triển (R&D)

Mô phỏng, huấn luyện AI và học máy

+ NILM là công cụ lý tưởng để thu thập dữ liệu thực tế dùng trong huấn luyện mô hình AI nhận diện thiết bị, tối ưu hóa lưới điện thông minh.

Dạy học kỹ thuật năng lượng

+ Các trường đại học, trung tâm đào tạo sử dụng NILM để dạy sinh viên về quản lý năng lượng, thiết kế nhà thông minh, IoT, AI trong năng lượng.

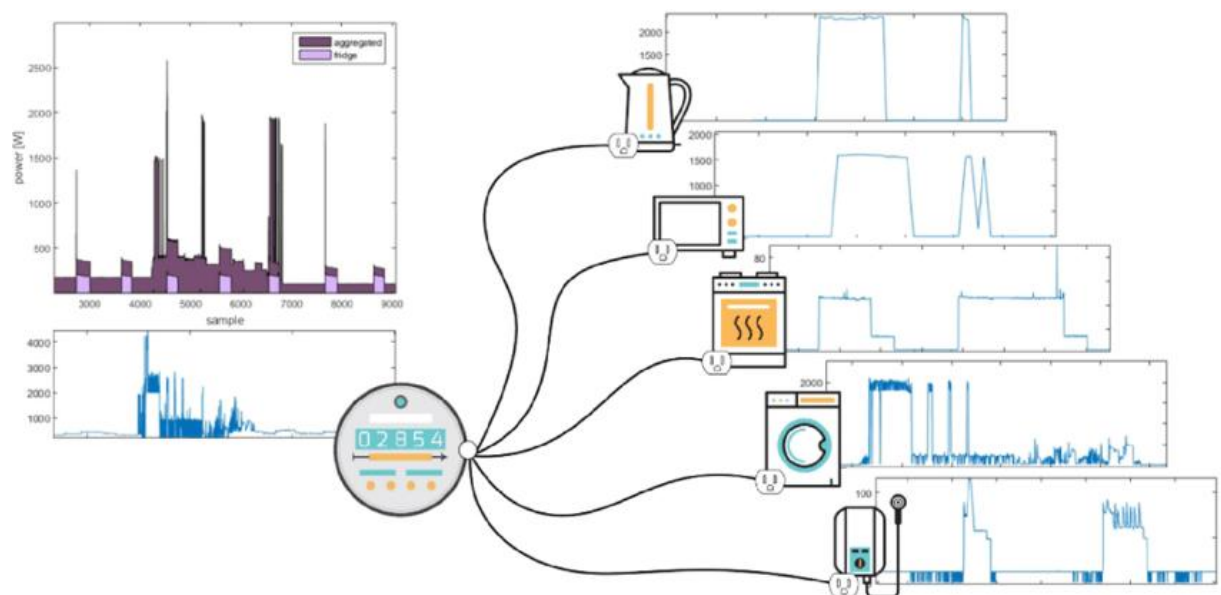
1.2. Tổng hợp các nghiên cứu về NILM trên thế giới và trong nước

Trong hai thập kỷ qua, nhu cầu cấp thiết trong việc giải quyết khủng hoảng năng lượng và hiện tượng nóng lên toàn cầu đã thúc đẩy sự ra đời của nhiều sáng kiến cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng và các chương trình giảm phát thải nhằm hạn chế tiêu thụ điện năng và lượng khí CO₂. Tuy nhiên, sự gia tăng dân số đã kéo theo nhu cầu sử dụng điện ngày càng cao, đặt ra nhiều thách thức lớn. Dự án Năng lượng Quốc tế dự báo rằng đến năm 2040, nhu cầu năng lượng toàn cầu sẽ tăng 25% và riêng nhu cầu điện sẽ tăng tới 58% so với năm 2018. Đáp ứng được mức tăng trưởng này đòi hỏi việc mở rộng công suất phát điện, một quá trình vốn phức tạp, tốn kém

và phụ thuộc nhiều vào nguồn năng lượng sẵn có cũng như hạ tầng truyền tải. Do đó, quản lý năng lượng hiệu quả trở thành yếu tố then chốt trong chiến lược tiết kiệm và sử dụng điện hợp lý. Trong bối cảnh đó, công nghệ NILM (Non-Intrusive Load Monitoring) – hay còn gọi là giám sát tải không xâm nhập – nổi lên như một giải pháp hiện đại. Thay vì phải lắp đặt cảm biến riêng cho từng thiết bị điện, NILM chỉ cần một cảm biến tại điểm đo tổng (như đồng hồ điện thông minh) để phân tích và ước lượng mức tiêu thụ điện của từng thiết bị riêng lẻ trong hệ thống. Công nghệ này giúp nâng cao tính minh bạch trong sử dụng điện và hỗ trợ hiệu quả cho các chiến lược tiết kiệm năng lượng cả trong hộ gia đình và môi trường công nghiệp [2].

1.2.1. Thế giới

NILM sử dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu để giám sát, phân tích và ước tính lượng điện năng tiêu thụ của các thiết bị điện trong một hệ thống mạng điện mà không cần cắt nguồn hay can thiệp trực tiếp vào thiết bị. Khái niệm ban đầu về phân tổ thông tin phụ tải điện dân dụng được đề xuất bởi Hart từ những năm 1980 [3]. Ông đã chứng minh cách các thiết bị điện khác nhau tạo ra các Dấu hiệu Công suất (power signature) riêng biệt, bao gồm công suất hoạt động, dòng điện và điện áp (Hình 1-2).



Hình 1-2: Tổng công suất theo thời gian và các Dấu hiệu công suất của các thiết bị phụ tải riêng biệt

NILM mới chỉ có lịch sử phát triển khoảng 30 năm, và có thể chia thành 2 giai đoạn chính [4]:

- Giai đoạn thứ nhất từ năm 1992-2014. Đây là giai đoạn dựa trên các phương pháp toán học truyền thống. Hart là người đầu tiên đề xuất phương pháp phân tách tải điện thông qua việc nhóm các sự kiện tương tự dựa trên đặc điểm của thiết bị [3]. Cách tiếp cận này sử dụng tối ưu hóa tổ hợp (CO), mà vào thời điểm đó, là kỹ thuật tiêu chuẩn cho các vấn đề phân tổ. Cách tiếp cận đầu tiên này có một thiếu sót lớn: tối ưu hóa tổ hợp thực hiện phân tách công suất trên từng thời điểm độc lập với các thời điểm khác mà không xem xét sự phát triển của tải theo thời gian. Các phương pháp phổ biến để giải quyết vấn đề NILM đều dựa trên phát hiện sự kiện trong tín hiệu tổng hợp và sử dụng bộ phân loại để gán các thiết bị đã biết cho các sự kiện được phát hiện nhằm tính toán tiêu thụ điện của từng thiết bị. Các công cụ phân loại khác nhau đã được sử dụng rộng rãi, bao gồm máy vectơ hỗ trợ (SVM), mạng thần kinh, cây quyết định (DT) và phương pháp phân loại lai [4].

- Giai đoạn thứ hai từ 2015 đến nay. Đây là giai đoạn dựa trên Máy học. Với sự gia tăng của các thiết bị đo thông minh tại từng hộ gia đình [5] giúp tăng cường lượng dữ liệu. Bên cạnh đó với sự bùng nổ của deep learning, các thuật toán NILM tần số thấp đã sử dụng kỹ thuật deep learning từ 2015 [6]. Hiện nay, có nhiều công nghệ máy học tiên tiến đã được áp dụng vào NILM. Các phương pháp này không chỉ mang lại độ chính xác cạnh tranh với các phương pháp truyền thống, mà còn đưa ra các giải pháp khả thi để giải quyết các thách thức đối với NILM.

Công nghệ giám sát tải không xâm nhập (NILM) có thể được phân loại thành hai nhóm chính: NILM trực tuyến (online) và NILM ngoại tuyến (offline), tùy thuộc vào khả năng cung cấp phản hồi thời gian thực về chi tiết tiêu thụ năng lượng cho người dùng:

NILM ngoại tuyến cho phép phân tích mức tiêu thụ điện của từng thiết bị trong một khoảng thời gian nhất định trước đó—from vài phút, vài giờ cho đến vài ngày. Dữ liệu này giúp người dùng hiểu được thói quen sử dụng điện của mình trong quá khứ, từ đó điều chỉnh hành vi nhằm tiết kiệm năng lượng và tối ưu chi phí.

NILM trực tuyến cung cấp thông tin tiêu thụ năng lượng và trạng thái hoạt động của từng thiết bị gần như theo thời gian thực. Bên cạnh khả năng giám sát, hệ thống còn hỗ trợ chẩn đoán sự cố, phát hiện tức thời các hoạt động bất thường, qua đó góp phần ngăn chặn những rủi ro vận hành có thể dẫn đến hư hỏng thiết bị hoặc gián đoạn dịch vụ.

Về mặt kỹ thuật, các phương pháp phân tách tải trong NILM được chia thành ba nhóm chính:

Học máy (Machine Learning - ML): Đây là nhóm phương pháp phổ biến nhất, dựa trên việc phân tích các đặc trưng đã được trích xuất từ tín hiệu điện tổng hợp để nhận dạng thiết bị riêng lẻ.

+ Học có giám sát: Yêu cầu dữ liệu huấn luyện có nhãn, gồm các thuật toán như: Mạng Bayes (Bayesian Networks), K-láng giềng gần nhất (KNN), Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), Máy vector hỗ trợ (SVM), Cây quyết định (DT), Mô hình Markov ẩn (HMM) và Rừng ngẫu nhiên (Random Forest).

+ Học sâu (Deep Learning): Bao gồm các mạng nơ-ron tích chập (CNN), mạng nơ-ron hồi tiếp (RNN), bộ nhớ dài ngắn hạn (LSTM), Bi-directional LSTM (Bi-LSTM), bộ tự mã hóa khử nhiễu (dAE), và các đơn vị hồi quy công (GRU).

+ Học không giám sát: Không yêu cầu dữ liệu gán nhãn, sử dụng các thuật toán như k-means, fuzzy c-means, và Mean-Shift Clustering.

Khớp mẫu (Pattern Matching - PM): Phương pháp này tạo ra tập hợp đặc trưng hoặc mẫu đặc trưng từ các thiết bị và so sánh chúng với dữ liệu đầu vào để tìm sự khớp gần nhất. Một số kỹ thuật tiêu biểu bao gồm:

- + Dynamic Time Warping (DTW),
- + Factorial Hidden Markov Models (FHMM),
- + Multi-Variance Matching (MVM),
- + Graph Signal Processing (GSP)

Tách nguồn (Source Separation - SS): Các phương pháp tách nguồn tìm cách tái tạo tín hiệu tổng tiêu thụ thành các tổ hợp tín hiệu riêng lẻ tương ứng với từng thiết bị, thông qua việc giải một bài toán tối ưu hóa. Những kỹ thuật thường được sử dụng gồm:

- + Phân tích thành phần độc lập (ICA),
- + Phân tích ma trận không âm (NMF),
- + Phân tích thành phần thưa thớt (SCA).

Việc triển khai công nghệ giám sát tải không xâm nhập (NILM) trong môi trường công nghiệp đặt ra những thách thức riêng biệt so với ứng dụng trong khu dân cư. Trong khi thiết bị điện dân dụng thường có hành vi vận hành rõ ràng với các trạng thái bật/tắt hoặc đa trạng thái cố định, thì phần lớn các thiết bị công nghiệp lại thể hiện đặc điểm tiêu thụ điện liên tục và phức tạp. Đặc biệt, các tải loại III – tức các thiết bị có mức tiêu thụ biến đổi theo thời gian và không theo một mô hình trạng thái

rõ ràng – chiếm ưu thế trong sản xuất công nghiệp, mặc dù tải loại I (bật/tắt) và tải loại II (đa trạng thái) cũng được ghi nhận.

Trong các bối cảnh công nghiệp cụ thể như:

Chế biến thực phẩm (máy nghiền, máy ép viên, hệ thống thông gió).

Sản xuất điện tử (máy in màn hình, lò nung nhiệt độ cao, máy hàn).

Ngành năng lượng và khai thác (máy bơm chìm, lò hồ quang điện, bộ đổi nguồn).

Việc áp dụng NILM có thể mang lại nhiều lợi ích như giám sát vận hành, tối ưu hóa hiệu suất sử dụng năng lượng và phát hiện bất thường để bảo trì dự đoán. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất khi triển khai NILM trong môi trường công nghiệp nằm ở khâu trích xuất đặc trưng và huấn luyện thuật toán. Các thiết bị công nghiệp thường có mẫu tiêu thụ điện riêng biệt, mang tính chu kỳ hoặc biến thiên liên tục, đồng thời thiếu các điểm chuyển trạng thái rõ ràng như trong thiết bị dân dụng. Điều này làm tăng độ phức tạp trong việc nhận diện tải và yêu cầu các phương pháp học máy tiên tiến hơn, đồng thời đòi hỏi dữ liệu có chất lượng cao và độ phân giải phù hợp để đảm bảo khả năng phân tách chính xác.

Các phương pháp triển khai giám sát tải không xâm nhập theo thời gian thực (NILM trực tuyến) được phân loại dựa trên cấu hình hệ thống xử lý thành ba nhóm chính: hiệu suất đám mây (cloud performance), hiệu suất biên (edge performance) và hiệu suất mô phỏng trực tuyến (simulated online performance):

Hiệu suất đám mây (Cloud-based NILM): Phương pháp này tận dụng khả năng tính toán mạnh mẽ và lưu trữ lớn của máy chủ đám mây để thực hiện các thuật toán NILM có độ phức tạp cao. Đây là lựa chọn phù hợp cho những ứng dụng yêu cầu xử lý dữ liệu khối lượng lớn, nhiều thiết bị và tính toán nâng cao, dù phải đánh đổi với chi phí tài nguyên và độ trễ nhất định

Một số nghiên cứu tiêu biểu bao gồm:

- + Mô hình phân rã tải trực tuyến dựa trên Factorial Hidden Markov Model (FHMM) kết hợp với phân tích sự kiện không giám sát (unsupervised event-based profiling).

- + Hệ thống phân tách năng lượng trực tuyến có tính bảo mật thông qua việc sử dụng thuật toán học sâu với gradient ngẫu nhiên riêng tư (Differential Privacy SGD - DP-SGD).

- + Phương pháp NILM không giám sát hoàn toàn dành cho các thiết bị hai trạng thái sử dụng Gaussian Mixture Model (GMM) cùng thuật toán phát hiện sự kiện tự động.

+ Mô hình eFHMM – phiên bản cải tiến của FHMM, được tối ưu nhằm giảm độ phức tạp tính toán và hỗ trợ xử lý dữ liệu có độ phân giải cao.

Hiệu suất biên (Edge-based NILM): Phương pháp này hướng tới việc thực hiện phân tích và phân tách dữ liệu tiêu thụ điện năng trực tiếp trên các thiết bị có khả năng tính toán hạn chế như đồng hồ điện tử thông minh, vi điều khiển, hoặc máy tính nhúng. Ưu điểm nổi bật là khả năng xử lý thời gian thực tại hiện trường, giảm độ trễ và không phụ thuộc vào kết nối mạng hoặc hạ tầng đám mây. Điều này đặc biệt phù hợp trong môi trường công nghiệp hoặc khu vực hạn chế kết nối.

Các nghiên cứu tiêu biểu trong nhóm này bao gồm:

+ Hệ thống sử dụng Karhunen-Loève Expansion (KLE) để trích xuất thành phần phổ không tương quan từ tín hiệu công suất.

+ Mô hình sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) với tốc độ lấy mẫu thấp (1 Hz) để xác định thiết bị tiêu thụ điện.

+ Hệ thống mô hình hóa tải thay đổi thời gian không giám sát bằng phương pháp ước lượng mật độ kernel (KDE) và mô hình Gaussian.

+ Giải pháp giám sát quy trình sản xuất thời gian thực Smart Connected Worker (SCW) kết hợp dữ liệu từ camera và cảm biến với mạng LSTM.

+ Hệ thống đa luồng sử dụng thuật toán CUMSUM kết hợp với MLP để tăng tốc độ nhận dạng và độ chính xác.

+ Các mô hình học sâu đa nhiệm được triển khai trên thiết bị nhúng như Raspberry Pi, vi điều khiển (MCU) hoặc FPGA cho phép ứng dụng thực tế ở môi trường giới hạn tài nguyên.

Hiệu suất mô phỏng trực tuyến (Simulated Online NILM): Đây là nhóm phương pháp được phát triển và thử nghiệm trong môi trường mô phỏng, nhằm đánh giá hiệu quả của các thuật toán NILM trước khi triển khai thực tế. Những mô hình này thường dùng để tối ưu hóa kiến trúc mạng, lựa chọn đặc trưng phù hợp và kiểm tra khả năng phản hồi thời gian thực trong điều kiện lý tưởng.

Một số phương pháp tiêu biểu bao gồm:

+ Mô hình học sâu sử dụng Factored Four-Way Conditional Restricted Boltzmann Machines (FFW-CRBMs) để nhận diện tải.

+ Giải pháp phân tích nhu cầu tiêu thụ linh hoạt theo thời gian thực, áp dụng các thuật toán phân loại như Naive Bayes, KNN, SVM, AdaBoost kết hợp với Restricted Boltzmann Machine (RBM) để trích xuất đặc trưng.

- + Hệ thống NILM thời gian thực hiệu quả trên bộ xử lý nhúng chi phí thấp, sử dụng super-state HMM cùng với thuật toán Viterbi tối ưu hóa.
- + Thuật toán học trực tuyến Dynamic Fixed Share (DFS) kết hợp học máy tuyến tính để tách riêng nhu cầu điều hòa và tải nền trong lưới phân phối.
- + Mô hình học có giám sát Conditional HMM (CHMM) ứng dụng trong phân tích hành vi sử dụng thiết bị dựa trên thời gian và trạng thái tiêu thụ.
- + Phương pháp FPHMM (Factorial Particle-based HMM) sử dụng đặc trưng quá độ nhằm tăng khả năng nhận diện thiết bị có hành vi tiêu thụ phức tạp.

Xu hướng nghiên cứu NILM hiện nay dựa trên Máy học, cụ thể là Mạng nơ ron học sâu (DNN - Deep Neural Network) ngày càng phát triển, vì DNN có thể giải quyết các vấn đề của NILM với hiệu năng cao [7]. Đi cùng với các nghiên cứu NILM dựa trên Máy học, có nhiều bộ dữ liệu đo điện đã được chia sẻ công khai trên internet để hỗ trợ cộng đồng nghiên cứu trong việc đa dạng hóa mẫu thử.

Với mục tiêu ứng dụng NILM ở quy mô lớn thì lượng dữ liệu thu thập, lưu trữ, truyền tải và năng lực tính toán là một yếu tố quan trọng vì DNN yêu cầu lượng dữ liệu và năng lực tính toán rất lớn. Có nhiều nghiên cứu đã nghiên cứu cách thức để giảm bớt lượng dữ liệu bằng các chiến lược nén dữ liệu khác nhau [7]. Một lựa chọn khác là xử lý dữ liệu trực tiếp hoặc gần ngay Công tơ điện và chỉ gửi dữ liệu đã phân tổ phụ tải lên cấp cao hơn. Điều đó có nghĩa là NILM phải làm việc được ở thiết bị nhúng. Hướng nghiên cứu này đã được nghiên cứu ở một số nghiên cứu, sử dụng Raspberry Pi [1], FPGA [8], v.v.

Những hiệu quả do NILM mang lại được một số nhà nghiên cứu tính toán, mô phỏng. Theo mô phỏng của [9], từ những thông tin NILM mang lại, trong bối cảnh giá điện phụ thuộc theo thời gian, người dùng có thể tiết kiệm được từ 16-26% chi phí. Khi người dùng chịu khó thay đổi thói quen sử dụng thiết bị điện, cũng sẽ góp san bằng đỉnh phụ tải, từ đó mang lại hiệu quả cho cả hệ thống điện.

1.2.2. Việt Nam

Các tác giả Việt Nam đang hợp tác nghiên cứu cùng các tác giả nước ngoài về vấn đề này. Ví dụ như trong [10], các tác giả phát triển phương pháp NILM cho ứng dụng thương mại và công nghiệp mà sử dụng thiết bị điện thông dụng và dạng mạch RLC. Sau đó, sử dụng giá trị biến thiên công suất dP, công suất phản kháng dQ để nhận diện các thiết bị điện và công suất tiêu thụ của chúng. Một mô hình ứng dụng NILM đã [8] thực hiện bằng SoC (System on chip) và tăng tốc bằng FPGA (Field-Programmable Gate Array), làm việc với tần số đo 2kHz, xử lý và phát hiện sự kiện

ở 50Hz và phân tổ công suất ở tần số 5Hz. NILM dựa trên Stacked LSTM (Long Short-Term Memory) đã được các tác giả [11] vận dụng để cải thiện khả năng phát hiện sự kiện từ các giá trị đo ở trạng thái xác lập.

Trong phạm vi các đề tài nghiên cứu được cấp kinh phí trong nước, các tác giả của trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội (VNU) đề xuất một giải pháp chi phí thấp để phát hiện sự kiện bất thiết bị điện thông qua việc phân tích Fourier nhanh (FFT) để trích xuất đặc tính tần số của dòng điện và đưa vào mạng nơ ron truyền thẳng (FNN) để xác định loại thiết bị điện [12] với độ chính xác rất cao. Tuy nhiên nghiên cứu chưa phân tổ được công suất tiêu thụ của thiết bị và cũng chưa thử nghiệm rộng rãi.

Nhìn chung số lượng các nghiên cứu về NILM ở Việt Nam vẫn còn chưa đủ lượng để có sự biến đổi về chất nhằm đưa công nghệ này vào ứng dụng thực tế và phát triển trong lĩnh vực quản lý năng lượng, quản lý tài nguyên và giảm thiểu lượng phát thải khí nhà kính. Những nghiên cứu hướng tới sử dụng Máy học trong việc nhận dạng thiết bị điện với hiệu năng cao và hướng tới việc triển khai vào trong các thiết bị nhúng còn chưa được quan tâm nhiều.

1.3. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập

1.3.1. Mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập

1.3.1.1. Các thuật toán phổ biến

Sự phát triển của học máy đã mang lại những công cụ mạnh mẽ cho bài toán NILM, giúp các hệ thống có khả năng "học" từ dữ liệu và cải thiện hiệu suất theo thời gian.

Các thuật toán học máy cổ điển (Classical Machine Learning Algorithms): Nhiều thuật toán học máy truyền thống đã được áp dụng thành công trong NILM. Các phương pháp học có giám sát (supervised learning) như Máy Vector Hỗ Trợ (Support Vector Machines - SVM), k Láng Giềng Gần Nhất (k-Nearest Neighbors - k-NN), Cây Quyết Định (Decision Trees), và Rừng Ngẫu Nhiên (Random Forests) thường được sử dụng cho các tác vụ phân loại sự kiện hoặc nhận dạng thiết bị. Các mô hình xác suất như Mô hình Markov Ẩn (HMM) và Trường Ngẫu Nhiên Có Điều Kiện (Conditional Random Fields - CRF) rất phù hợp để mô hình hóa chuỗi trạng thái hoạt động của thiết bị theo thời gian. Các thuật toán học không giám sát (unsupervised learning) như K-means clustering cũng được sử dụng để nhóm các sự kiện hoặc các đoạn tín hiệu có đặc điểm tương tự nhau. Hiệu suất của các phương

pháp này thường phụ thuộc nhiều vào chất lượng của dữ liệu huấn luyện và kỹ thuật trích xuất đặc trưng.

Các thuật toán học sâu (Deep Learning Algorithms): Trong những năm gần đây, học sâu đã nổi lên như một hướng tiếp cận mang lại hiệu suất vượt trội cho nhiều bài toán NILM phức tạp [13]. Các kiến trúc mạng nơ-ron sâu có khả năng tự động học các đặc trưng phức tạp từ dữ liệu thô, giảm bớt sự phụ thuộc vào việc thiết kế đặc trưng thủ công.

Mạng Nơ-ron Tích Chập (Convolutional Neural Networks - CNNs): Ban đầu được thiết kế cho xử lý ảnh, CNNs (đặc biệt là CNN một chiều) đã được điều chỉnh để trích xuất các đặc trưng cục bộ và bất biến theo thời gian từ chuỗi dữ liệu năng lượng. Mô hình sequence-to-point (seq2point), một kiến trúc dựa trên CNN, là một ví dụ điển hình và được coi là một trong những mô hình hứa hẹn cho NILM.

Mạng Nơ-ron Hồi Quy (Recurrent Neural Networks - RNNs) và các biến thể LSTM/GRU: Do bản chất chuỗi thời gian của dữ liệu năng lượng, RNNs, Long Short-Term Memory (LSTM) và Gated Recurrent Units (GRUs) rất hiệu quả trong việc nắm bắt các phụ thuộc tuần tự và dài hạn trong tín hiệu. Chúng thường được sử dụng để dự đoán trạng thái hoặc công suất của thiết bị dựa trên lịch sử quan sát [13].

Các kiến trúc khác: Nhiều kiến trúc học sâu khác cũng đã được khám phá, bao gồm Bộ Tự Mã Hóa Khử Nhiễu (Denoising Autoencoders - DAEs) để tách tín hiệu thiết bị khỏi nhiễu từ tín hiệu tổng, Mạng Đối Nghịch Sinh (Generative Adversarial Networks - GANs) để tạo dữ liệu hoặc cải thiện khả năng chống nhiễu, và gần đây là các mô hình Transformer với cơ chế tự chú ý (self-attention) để xử lý hiệu quả các chuỗi dài [14]. Một số nghiên cứu còn đề xuất các kiến trúc lai, ví dụ kết hợp CNN và LSTM, hoặc sử dụng các kỹ thuật như Independent Component Analysis (ICA) làm bước tiền xử lý hoặc trích xuất đặc trưng cho mạng nơ-ron.

1.3.1.2. Lựa chọn thuật toán nghiên cứu

Mô hình mạng nơ-ron được lựa chọn nghiên cứu trong đề án này là Mạng nơ-ron sâu dựa trên cơ chế Attention (Attention-Based Deep Neural Network) cho tác vụ NILM, lấy cảm hứng từ “Improving Non-Intrusive Load Disaggregation through an Attention-Based Deep Neural Network” [5] và “Non-intrusive Load Disaggregation” [6].

Bài báo thứ nhất của Veronica Piccialli và Antonio M. Sudoso (2021) với tiêu đề “Improving Non-Intrusive Load Disaggregation through an Attention-Based Deep Neural Network” [5] đề xuất một mạng nơ-ron sâu có cơ chế attention được thiết kế riêng cho bài toán phân rã tải không xâm nhập (NILM).

Kiến trúc cơ bản của mô hình này là một mạng hồi quy cổ điển, bao gồm các thành phần bộ mã hóa-bộ giải mã, và một cơ chế attention được thêm vào giữa chúng. Bên cạnh mạng hồi quy chính, một mạng con phân loại hỗ trợ cũng được ghép nối vào. Cơ chế attention đóng vai trò quan trọng trong việc gán trọng số quan trọng cho mọi vị trí trong tín hiệu tổng hợp, cho phép mô hình tập trung vào các bước thời gian hoặc cửa sổ đã chọn, thay vì các thiết bị không phải mục tiêu. Cụ thể, nhánh hồi quy được giao nhiệm vụ dự đoán mức tiêu thụ tối đa dự kiến, trong khi nhánh phân loại giúp điều chỉnh kết quả để khớp với mẫu tải thực tế của thiết bị (ví dụ: xác định trạng thái bật/tắt).

Bài báo thứ hai của Inesilla [6], thực tế là mô tả trên trang Github của tác giả, dựa trên mô hình của Piccialli, và thử nghiệm thêm 02 mô hình khác. Ba kiến trúc mô hình dựa trên cơ chế Attention được nghiên cứu trong [6]:

S1: Mô hình kết hợp hồi quy và phân loại

S2: Chỉ sử dụng hồi quy

S3: Hồi quy và phân loại sử dụng kết quả từ cơ chế attention.

S1-Mô hình kết hợp hồi quy và phân loại: Kiến trúc được thiết kế để giải quyết bài toán NILM (Non-Intrusive Load Monitoring - Giám sát tải không xâm lấn) dựa trên một mạng hồi quy end-to-end cổ điển với các thành phần mã hóa (encoder) và giải mã (decoder). Cơ chế attention (chú ý) được thêm vào giữa phần encoder và decoder. Bên cạnh mạng hồi quy end-to-end chính, một mạng phụ phân loại end-to-end cũng được tích hợp. Mô hình dựa trên attention hỗ trợ tốt cho nhiệm vụ tách biệt năng lượng (energy disaggregation). Nó gán mức độ quan trọng – hay trọng số suy nghĩ – cho mỗi vị trí trong tín hiệu tổng hợp, mà sau khi được huấn luyện thành công, sẽ tương ứng với sự thay đổi trạng thái của thiết bị mục tiêu. Việc thêm cơ chế attention vào mạng hồi quy sẽ giúp mô hình tập trung vào các bước thời gian hoặc cửa sổ tín hiệu cụ thể thay vì các thiết bị không phải mục tiêu. Điểm số attention chính là cách mô hình đánh giá tầm quan trọng của từng vị trí trong chuỗi đầu vào để suy ra tín hiệu đã được tách biệt. Để biểu diễn chính xác các trọng số này, đầu ra của lớp attention được thiết kế là một vector 1 chiều có độ dài bằng với độ dài của chuỗi tín hiệu trong một cửa sổ.

Kiến trúc mô hình được tạo ra từ 02 mô hình con:

Mạng hồi quy: cho phép mạng “phát hiện và gán tầm quan trọng cao hơn cho một số sự kiện (ví dụ: bật hoặc tắt thiết bị) và cho các phần cụ thể trong tín hiệu”.

Mạng phân loại: hỗ trợ quá trình tách biệt bằng cách bắt buộc làm rõ trạng thái bật/tắt của thiết bị.

Kết quả đầu ra của cả hai mạng con sẽ được nối lại ở cuối để tạo thành tín hiệu tiêu thụ đã được tách biệt của từng thiết bị.

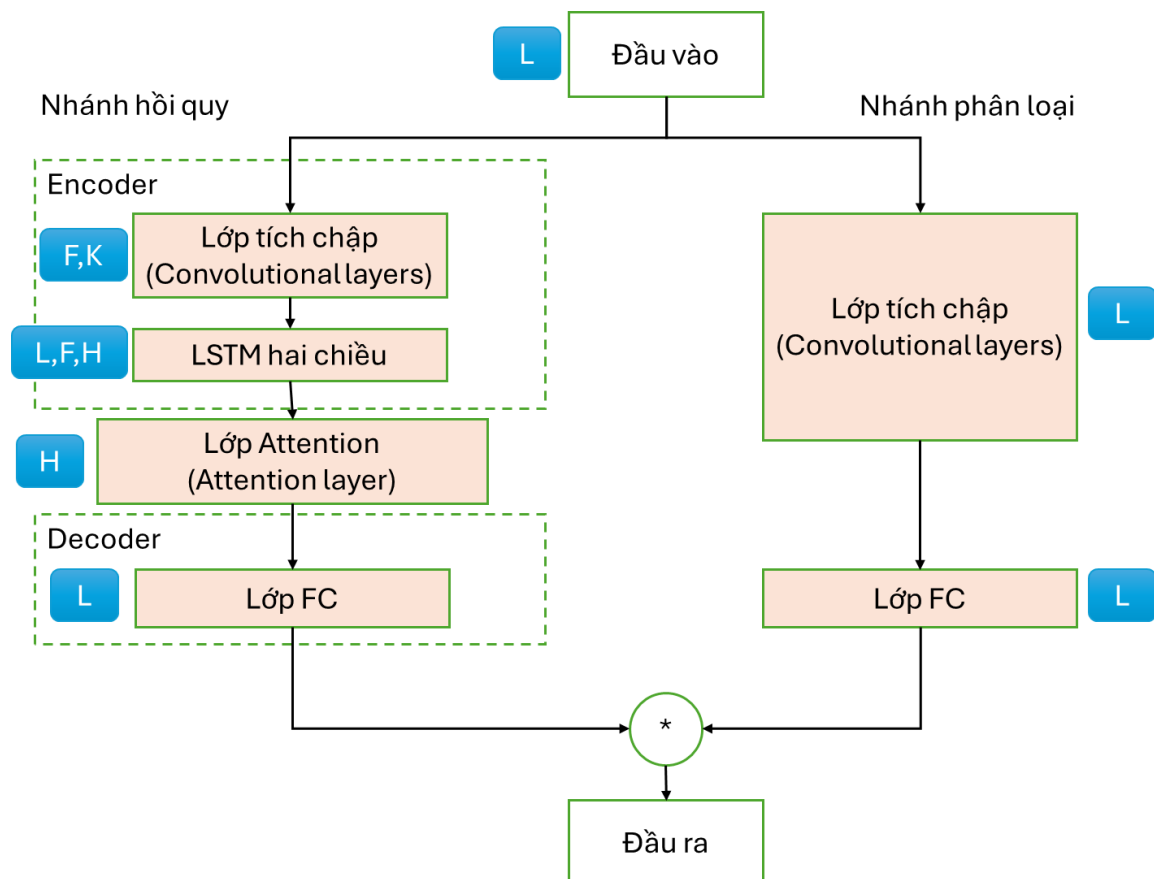
Các tham số cấu hình cho mô hình S1 gồm có:

L : Chiều dài chuỗi thời gian đầu vào/đầu ra

F : Số lượng filters trong các lớp Conv1D

K : Kích thước kernel cho Conv1D

H : Số hidden units trong LSTM



L, F, K, H là các tham số cấu trúc của mô hình

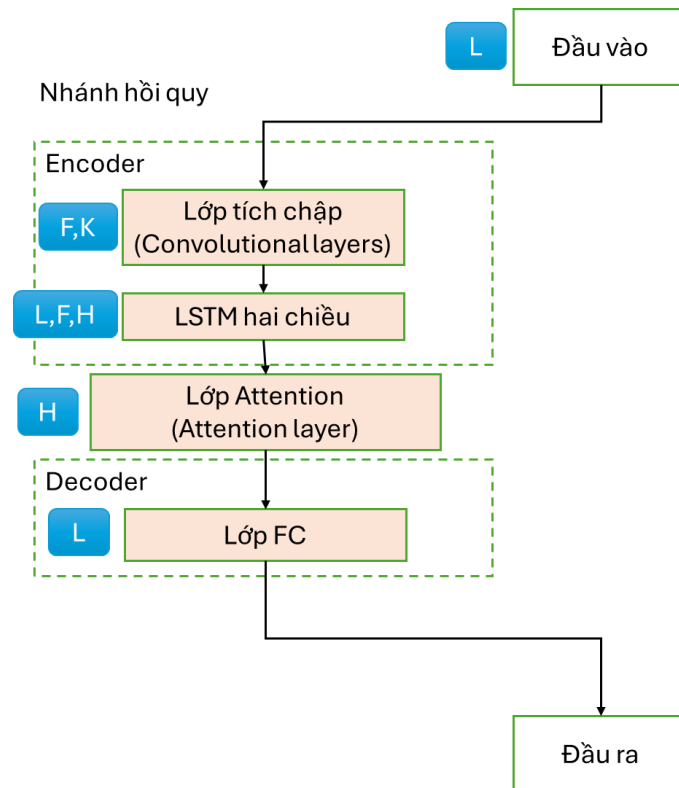
Hình 1-3: S1-Mô hình kết hợp hồi quy và phân loại

S2-Kiến trúc chỉ dùng Hồi quy

Kiến trúc này loại bỏ mạng con phân loại khỏi mô hình – mạng con này vốn không có lớp attention. Nhánh hồi quy vẫn được giữ nguyên như trong mạng gốc.

Mô hình này đơn giản hơn, nhưng thường có độ chính xác thấp hơn vì thiếu thông tin trạng thái rõ ràng.

Tương tự S1, các tham số cấu trúc của mô hình S2 là L, F, K, H.



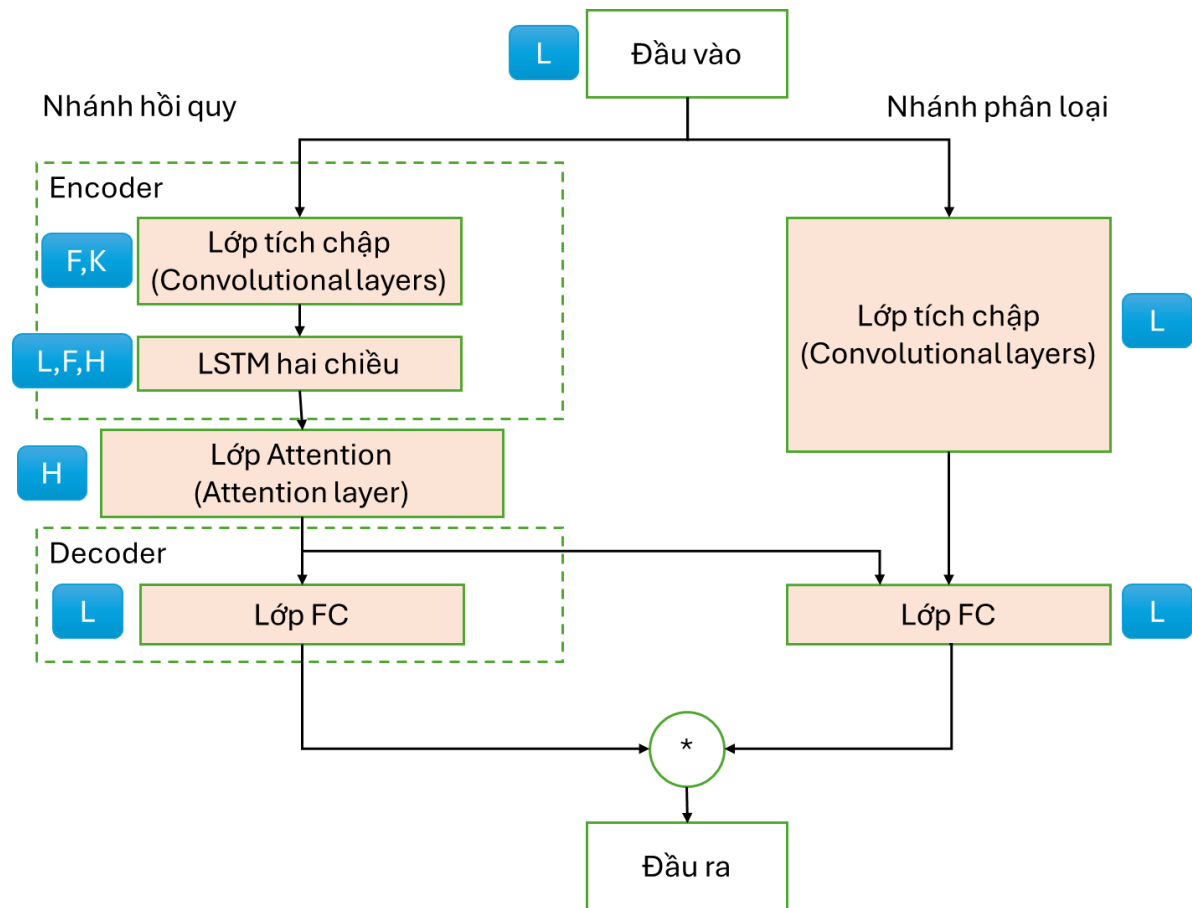
L, F, K, H là các tham số cấu trúc của mô hình

Hình 1-4: S2-Mô hình chỉ dùng hồi quy

S3-Hồi quy và phân loại sử dụng kết quả từ cơ chế attention

Trong phiên bản điều chỉnh cuối cùng của mô hình, đầu ra của lớp attention được sử dụng để tính toán kết quả của mạng con hồi quy (áp dụng cho tất cả các mô hình). Trong kiến trúc này, đầu ra của mạng con hồi quy được nối với đầu ra của chồng các lớp tích chập (convolutional layers) trong mạng con phân loại. Vector đã được nối này sau đó được đưa vào 2 lớp fully connected ở phần đầu của nhánh phân loại.

Tương tự S1, các tham số cấu trúc của mô hình S3 là L, F, K, H



Hình 1-5: S3-Hồi quy và phân loại sử dụng kết quả từ cơ chế attention

1.3.1.3. Thuật toán đề xuất

Việc triển khai một hệ thống Học sâu (DL) như NILM vào môi trường thực tế, đặc biệt là trên các thiết bị biên có tài nguyên hạn chế như máy tính nhúng AI NVIDIA Jetson Nano, đòi hỏi phải có những đánh giá và tối ưu hóa nghiêm ngặt. Các nguồn thông tin cho thấy mô hình này, với độ phức tạp cao của quá trình chuyển tiếp (forward) và ngược (backward), cùng với lượng dữ liệu lớn, đã tiêu tốn một lượng thời gian đáng kể cho quá trình huấn luyện ngay cả trên môi trường Cloud Deep Learning VM với GPU NVIDIA Tesla K80. Độ phức tạp tính toán này là rào cản lớn đối với hiệu suất suy luận theo thời gian thực trên các nền tảng nhúng.

Do đó, mục tiêu tối ưu hóa cần tập trung vào việc giảm thiểu độ phức tạp của kiến trúc mô hình mà vẫn duy trì hiệu suất tách tải chấp nhận được. Chiến lược triển khai trên NVIDIA Jetson Nano sẽ bao gồm việc cân nhắc sử dụng kiến trúc đơn giản hóa, nơi mà cơ chế attention trở thành nhân tố chính để tổng quát hóa và nắm bắt các thay đổi trạng thái. Điều này giúp giảm tải tính toán trong quá trình suy luận mà vẫn tận dụng được khả năng của attention trong việc xác định các đặc trưng chuyên biệt và cụ thể trong cửa sổ tiêu thụ.

Về kiến trúc tổng thể, mô hình bao gồm các tầng tích chập một chiều (1D Convolutional Layers) dùng để trích xuất đặc trưng theo thời gian từ chuỗi tín hiệu điện. Các tầng này được sắp xếp tuần tự với số lượng bộ lọc (filters) tăng dần, giúp mô hình dần học được các đặc trưng phức tạp hơn của dạng sóng tiêu thụ. Sau khối tích chập là các tầng kết nối đầy đủ (Fully Connected Layers), đóng vai trò suy luận giá trị công suất tiêu thụ của từng thiết bị. Cấu trúc này có thể được bổ sung cơ chế attention nhằm tăng cường khả năng tập trung của mô hình vào các vùng thời gian có ý nghĩa đặc biệt trong tín hiệu đầu vào.

Để đảm bảo khả năng triển khai thực tế trên Jetson Nano, kích thước và độ phức tạp của mô hình được giới hạn trong phạm vi cho phép của phần cứng. Jetson Nano chỉ có 4 GB bộ nhớ RAM và GPU Maxwell 128 nhân, do đó mô hình cần duy trì số tham số (trainable parameters) dưới khoảng một triệu để đạt được tốc độ suy luận chấp nhận được trong khi vẫn đảm bảo độ chính xác hợp lý. Việc ước lượng cấu hình tham số được thực hiện dựa trên cân nhắc này.

Cấu hình tham số cho các mô hình S1, S2, S3 nêu trên gồm có:

l : Chiều dài chuỗi thời gian đầu vào/đầu ra

f : Số lượng filters trong các lớp Conv1D

k : Kích thước kernel cho Conv1D

h : Số hidden units trong LSTM

Với mô hình S1, số lượng tham số là:

$$N_{S1} = 3f^2k + fk + 4f + 8fh + 14h^2 + (52,226 + h)l + 13h - 1,643,646$$

Với mô hình S2, số lượng tham số là:

$$N_{S2} = 3f^2k + fk + 4f + 8fh + 14h^2 + hl + 13h + l$$

Với mô hình S3, số lượng tham số là:

$$N_{S3} = 3f^2k + fk + 4f + 8fh + 14h^2 + (52,226 + h)l + 2061h - 1,643,646$$

Trong mô hình S1 và S3, nhánh phân loại đã làm cho số lượng mô hình tăng đáng kể (thể hiện bằng hệ số 52226), và phụ thuộc chính vào giá trị l . l trở thành tham số quyết định và phải được kiểm soát chặt chẽ để mô hình có thể chạy trên Jetson Nano.

Khi biểu thức không có hệ số lớn nhân l (như S_2), thì h (số unit ẩn) thường là yếu tố gây tăng số tham số nhanh nhất do hạng tử $14h^2$ (độ tăng theo bình phương). Tham số f (số filter) ảnh hưởng theo bậc hai qua $3f^2k$ nên cũng có thể trở thành nút cổ chai nếu thiết lập nhiều filter (ví dụ $f > 64$) hoặc tăng k lớn; $8fh$ làm f và h tương tác, tức khi cả hai cùng tăng thì hiệu ứng tăng tham số là lớn hơn tổng riêng rẽ.

Với $f = 32$, $k = 5$, $h = 128$, ta có bảng số lượng tham số phụ thuộc l như sau:

Bảng 1-7: Số lượng tham số của mô hình phụ thuộc vào l

l	S1	S2	S3
128	6.7M	163K	6.9M
256	13.2M	229K	13.5M
512	25.4M	346K	25.7M
1024	50.3M	558K	50.6M

Như vậy, để mô hình mạng nơ-ron cho NILM chạy được trên Jetson Nano, với số lượng tham số tối đa như đã trình bày ở trên là 1 triệu tham số (1M) thì chỉ mô hình S2 là phù hợp.

1.3.2. Kịch bản và bộ dữ liệu đầu vào phục vụ nghiên cứu

1.3.2.1. Phương pháp huấn luyện, thử nghiệm

❖ Huấn luyện (Train)

Việc huấn luyện mô hình được thực hiện trên toàn bộ tập dữ liệu huấn luyện đã được tiền xử lý, với các batch có kích thước 64 thông qua một data loader. Ban đầu, số epoch được đặt là 10 – trong hầu hết các trường hợp, điều này là đủ để thực hiện phân tích ban đầu về phản hồi và hiệu suất của mô hình.

Một hàm mất mát tổng hợp được sử dụng để tối ưu hóa đồng thời cả hai mạng con hồi quy và phân loại:

$$L = L_{out} + L_{clas}$$

trong đó:

L_{out} là Mean Squared Error (MSE) giữa đầu ra tổng thể của mạng và giá trị thực tế (ground truth) của một thiết bị đơn lẻ.

L_{clas} là Binary Cross-Entropy (BCE), đo lường lỗi phân loại trạng thái bật/tắt cho mạng con phân loại.

❖ *Kiểm tra (Test)*

Việc kiểm tra mô hình được thực hiện trên toàn bộ tập dữ liệu kiểm tra đã tiền xử lý, với các batch có kích thước 64 thông qua data loader.

MAE (Mean Absolute Error) được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mạng nơ-ron. MAE được tính sau khi áp dụng bước hậu xử lý (postprocessing) được mô tả ở phần sau. MAE là chỉ số được sử dụng trong bài báo tham khảo và được dùng làm tiêu chí so sánh giữa các thí nghiệm khác nhau được mô tả bên dưới.

1.3.2.2. Bộ dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu

Có nhiều bộ dữ liệu (datasets) công khai, chất lượng cao đóng một vai trò cực kỳ quan trọng trong việc thúc đẩy nghiên cứu và phát triển công nghệ NILM. Chúng cho phép các nhà nghiên cứu trên toàn thế giới có thể so sánh, đánh giá và cải tiến các thuật toán của mình một cách công bằng và minh bạch, đồng thời tạo điều kiện cho việc tái lập kết quả nghiên cứu [15].

Các bộ dữ liệu này thường bao gồm hai thành phần chính: dữ liệu tổng công suất tiêu thụ (aggregate power data) được đo tại điểm vào chính của một hộ gia đình hoặc tòa nhà, và dữ liệu tiêu thụ của từng thiết bị điện riêng lẻ (ground truth sub-metered data) hoạt động bên trong cơ sở đó. Dữ liệu thường được thu thập trong một khoảng thời gian dài (từ vài tuần đến vài năm) với các tần số lấy mẫu khác nhau, từ tần số thấp (vài giây một mẫu hoặc thấp hơn) đến tần số rất cao (hàng chục kHz hoặc MHz). Thông tin về loại thiết bị, nhãn hiệu, và đôi khi cả ngữ cảnh sử dụng (ví dụ: số người trong nhà, hoạt động đang diễn ra) cũng có thể được ghi lại.

Bảng 1-8: Tổng hợp một số bộ dữ liệu NILM công khai quan trọng

Tên Bộ Dữ Liệu	Năm Công Bố	Quốc gia	Số lượng	Thời Gian Thu Thập	Tần Số Lấy Mẫu	Số Loại Thiết	Đặc Điểm Nội Bật	Link Truy Cập/DOI Tham Khảo
REDD	2011	Hoa Kỳ	6 hộ	Vài tuần/hộ	Tổng: 15kHz & 1/3Hz; Thiết bị: 1/3Hz	~10-20	Dữ liệu tần số cao và thấp, nhãn sự kiện.	http://redd.csail.mit.edu/
UK-DALE	2014, 2015	Vương quốc Anh	5 hộ	Đến 655 ngày	Tổng: 16kHz & 1/6Hz; Thiết bị: 1/6Hz	>50	Thời gian dài, nhiều loại thiết bị, cả dữ liệu tổng tần số cao.	https://jack-kelly.com/data/ (DOI: 10.1038/sdata.2015.7)
ECO	2012, 2014	Thụy Sĩ	6 hộ	~8 tháng/hộ	Tổng: 1Hz; Thiết bị: 1Hz	~10-15	Có dữ liệu về sự hiện diện của người.	https://www.vs.inf.ethz.ch/res/show.html?what=eco-data
PLAID	2014	Hoa Kỳ	>200 thiết bị riêng lẻ, 55 loại	Ngắn hạn/thiết bị	30kHz (dòng, áp)	55	Tập trung vào đặc trưng quá độ tần số cao của từng thiết bị.	http://plaidplug.com/
BLUED	2012	Hoa Kỳ	1 hộ	8 ngày	12kHz (dòng, áp tổng)	~10	Dữ liệu tổng tần số cao, nhãn sự kiện chi tiết.	https://doi.org/10.1145/2422253.2422260
AMPds	2013	Canada	1 hộ	2 năm	1 phút (điện, nước, gas)	~20	Dữ liệu đa năng lượng, thời gian dài, độ phân giải phút.	http://ampds.org/

Tập dữ liệu REDD (Reference Energy Disaggregation Data Set) đã được lựa chọn cho nghiên cứu này. Đây là một trong những tập dữ liệu tham khảo được sử dụng trong bài báo tham khảo về NILM và bao gồm dữ liệu từ sáu ngôi nhà khác nhau tại Hoa Kỳ. Dữ liệu được thu thập với chu kỳ lấy mẫu là 1 giây cho mức tiêu thụ điện tổng và 3 giây cho mức tiêu thụ điện của từng thiết bị. Các thiết bị được ghi nhận bao gồm: lò nướng, tủ lạnh, máy rửa bát, ổ cắm nhà bếp, lò vi sóng, ổ cắm phòng tắm, hệ thống chiếu sáng, máy giặt/máy sấy, máy sưởi điện, bếp, máy nghiền rác, thiết bị điện tử, lò sưởi, báo cháy và máy điều hòa. Trong nghiên cứu này, ba thiết bị được xem xét là máy rửa bát (DW), lò vi sóng (MW) và tủ lạnh (FR). Các thiết bị này giống với những thiết bị được sử dụng trong bài báo tham khảo nhằm đạt được cùng một kết quả.

Tập dữ liệu được chia bằng cách sử dụng dữ liệu từ các ngôi nhà số 2, 3, 4, 5 và 6 để xây dựng tập huấn luyện, trong khi ngôi nhà số 1 được sử dụng làm tập kiểm tra. Tập dữ liệu thực tế được sử dụng trong mô hình nghiên cứu là sự kết hợp của hai tập dữ liệu:

Một nhóm nghiên cứu về học sâu tại Đại học Quốc gia Seoul đã xử lý sơ bộ tập dữ liệu REDD (xem phần tiền xử lý bên dưới) được cung cấp trong bài báo tham khảo. Tập dữ liệu này được sử dụng trong bài báo của họ có tiêu đề "Subtask Gated Networks for Non-Intrusive Load Monitoring" [16].

Mặt khác, trong tập dữ liệu REDD có sự mất cân bằng lớn giữa các khoảng thời gian hoạt động và không hoạt động. Bất thường này được quan sát thấy rõ rệt, đặc biệt là trong trường hợp của máy rửa bát và lò vi sóng. Điều này là dễ hiểu, vì phần lớn thời gian các thiết bị như máy rửa bát và lò vi sóng không được sử dụng. Do đó, các khoảng thời gian không hoạt động bị đại diện quá mức. Trong bài nghiên cứu đã triển khai một quy trình tăng mẫu (oversampling) được mô tả trong phần tiền xử lý bên dưới để giải quyết vấn đề này.

Có nhiều bộ dữ liệu (datasets) công khai, chất lượng cao đóng một vai trò cực kỳ quan trọng trong việc thúc đẩy nghiên cứu và phát triển công nghệ NILM. Chúng cho phép các nhà nghiên cứu trên toàn thế giới có thể so sánh, đánh giá và cải tiến các thuật toán của mình một cách công bằng và minh bạch, đồng thời tạo điều kiện cho việc tái lập kết quả nghiên cứu [15].

Các bộ dữ liệu này thường bao gồm hai thành phần chính: dữ liệu tổng công suất tiêu thụ (aggregate power data) được đo tại điểm vào chính của một hộ gia đình hoặc tòa nhà, và dữ liệu tiêu thụ của từng thiết bị điện riêng lẻ (ground truth sub-metered data) hoạt động bên trong cơ sở đó. Dữ liệu thường được thu thập trong một khoảng thời gian dài (từ vài tuần đến vài năm) với các tần số lấy mẫu khác nhau, từ tần số

thấp (vài giây một mẫu hoặc thấp hơn) đến tần số rất cao (hàng chục kHz hoặc MHz). Thông tin về loại thiết bị, nhãn hiệu, và đôi khi cả ngữ cảnh sử dụng (ví dụ: số người trong nhà, hoạt động đang diễn ra) cũng có thể được ghi lại.

Bảng 1-9: Tổng hợp một số bộ dữ liệu NILM công khai quan trọng

Tên Bộ Dữ Liệu	Năm Công Bố	Quốc gia	Số lượng	Thời Gian Thu Thập	Tần Số Lấy Mẫu	Số Loại Thiết	Đặc Điểm Nổi Bật	Link Truy Cập/DOI Tham Khảo
REDD	2011	Hoa Kỳ	6 hộ	Vài tuần/hộ	Tổng: 15kHz & 1/3Hz; Thiết bị: 1/3Hz	~10-20	Dữ liệu tần số cao và thấp, nhân sự kiện.	http://redd.csail.mit.edu/
UK-DALE	2014, 2015	Vương quốc Anh	5 hộ	Đến 655 ngày	Tổng: 16kHz & 1/6Hz; Thiết bị: 1/6Hz	>50	Thời gian dài, nhiều loại thiết bị, cả dữ liệu tổng tần số cao.	https://jack-kelly.com/data/ (DOI: 10.1038/sdata.2015.7)
ECO	2012, 2014	Thụy Sĩ	6 hộ	~8 tháng/hộ	Tổng: 1Hz; Thiết bị: 1Hz	~10-15	Có dữ liệu về sự hiện diện của người.	https://www.vs.inf.ethz.ch/res/show.html?what=eco-data
PLAID	2014	Hoa Kỳ	>200 thiết bị riêng lẻ, 55 loại	Ngắn hạn/thiết bị	30kHz (dòng, áp)	55	Tập trung vào đặc trưng quá độ tần số cao của từng thiết bị.	http://plaidplug.com/
BLUED	2012	Hoa Kỳ	1 hộ	8 ngày	12kHz (dòng, áp tổng)	~10	Dữ liệu tổng tần số cao, nhân sự kiện chi tiết.	https://doi.org/10.1145/2422253.2422260
AMPds	2013	Canada	1 hộ	2 năm	1 phút (điện, nước, gas)	~20	Dữ liệu đa năng lượng, thời gian dài, độ phân giải phút.	http://ampds.org/

Tập dữ liệu REDD (Reference Energy Disaggregation Data Set) đã được lựa chọn cho nghiên cứu này. Đây là một trong những tập dữ liệu tham khảo được sử dụng trong bài báo tham khảo về NILM và bao gồm dữ liệu từ sáu ngôi nhà khác nhau tại Hoa Kỳ. Dữ liệu được thu thập với chu kỳ lấy mẫu là 1 giây cho mức tiêu thụ điện tổng và 3 giây cho mức tiêu thụ điện của từng thiết bị. Các thiết bị được ghi nhận bao gồm: lò nướng, tủ lạnh, máy rửa bát, ổ cắm nhà bếp, lò vi sóng, ổ cắm phòng tắm, hệ thống chiếu sáng, máy giặt/máy sấy, máy sưởi điện, bếp, máy nghiền rác, thiết bị điện tử, lò sưởi, báo cháy và máy điều hòa. Trong nghiên cứu này, ba thiết bị được xem xét là máy rửa bát (DW), lò vi sóng (MW) và tủ lạnh (FR). Các thiết bị này giống với những thiết bị được sử dụng trong bài báo tham khảo nhằm đạt được cùng một kết quả.

Tập dữ liệu được chia bằng cách sử dụng dữ liệu từ các ngôi nhà số 2, 3, 4, 5 và 6 để xây dựng tập huấn luyện, trong khi ngôi nhà số 1 được sử dụng làm tập kiểm tra. Tập dữ liệu thực tế được sử dụng trong mô hình nghiên cứu là sự kết hợp của hai tập dữ liệu:

Một nhóm nghiên cứu về học sâu tại Đại học Quốc gia Seoul đã xử lý sơ bộ tập dữ liệu REDD (xem phần tiền xử lý bên dưới) được cung cấp trong bài báo tham khảo. Tập dữ liệu này được sử dụng trong bài báo của họ có tiêu đề "Subtask Gated Networks for Non-Intrusive Load Monitoring" [16].

Mặt khác, trong tập dữ liệu REDD có sự mất cân bằng lớn giữa các khoảng thời gian hoạt động và không hoạt động. Bất thường này được quan sát thấy rõ rệt, đặc biệt là trong trường hợp của máy rửa bát và lò vi sóng. Điều này là dễ hiểu, vì phần lớn thời gian các thiết bị như máy rửa bát và lò vi sóng không được sử dụng. Do đó, các khoảng thời gian không hoạt động bị đại diện quá mức. Trong bài nghiên cứu đã triển khai một quy trình tăng mẫu (oversampling) được mô tả trong phần tiền xử lý bên dưới để giải quyết vấn đề này.

1.3.3. Hiệu ích thu được từ ứng dụng mô hình nghiên cứu đề xuất

Việc ứng dụng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) dựa trên mạng nơ-ron sâu tích hợp cơ chế Attention mang lại nhiều hiệu ích thiết thực trong quản lý và vận hành hệ thống điện. Trước hết, mô hình cho phép xác định chính xác mức tiêu thụ điện năng của từng thiết bị từ tín hiệu điện tổng, qua đó hỗ trợ người sử dụng nhận diện các thiết bị tiêu thụ nhiều điện năng, phát hiện hành vi sử dụng điện chưa hợp lý và đưa ra các giải pháp điều chỉnh phù hợp, góp phần tiết kiệm điện năng và nâng cao hiệu quả sử dụng điện.

Bên cạnh đó, khả năng theo dõi chi tiết trạng thái hoạt động của các thiết bị giúp giảm phụ tải điện, đặc biệt là phụ tải đỉnh, thông qua việc phát hiện hiện tượng chồng lấn công suất và hỗ trợ xây dựng lịch vận hành tối ưu cho các thiết bị có công suất lớn. Mô hình còn góp phần nâng cao độ an toàn trong cung cấp và sử dụng điện nhờ khả năng giám sát liên tục công suất tiêu thụ, phát hiện sớm các biểu hiện bất thường hoặc tình trạng quá tải cục bộ, từ đó giảm thiểu nguy cơ sự cố cháy, nổ do quá nhiệt, lão hóa thiết bị hoặc chập điện.

Ngoài ra, với kiến trúc gọn nhẹ và hiệu suất cạnh tranh, đặc biệt ở mô hình chỉ hời quy, giải pháp đề xuất có khả năng triển khai trên các thiết bị biên và dễ dàng tích hợp với các hệ thống quản lý và điều khiển thông minh như hệ thống quản lý năng lượng trong hộ gia đình và tòa nhà, tạo tiền đề cho các chức năng điều khiển phụ tải tự động, đóng cắt và chuyển tải linh hoạt theo thời gian thực, cũng như hỗ trợ các chiến lược điều chỉnh phụ tải và vận hành lưới điện thông minh, hướng tới mục tiêu sử dụng năng lượng an toàn, hiệu quả và bền vững.

KẾT LUẬN CHƯƠNG I

Chương 1 của đề án đã tập trung trình bày một cách có hệ thống các vấn đề lý luận và thực tiễn liên quan đến công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) trong mạng điện hộ gia đình. Trước hết, chương đã làm rõ khái niệm, nguyên lý hoạt động và các bước cơ bản của hệ thống NILM, từ thu thập dữ liệu điện năng tại điểm đo tổng, tiền xử lý và trích xuất đặc trưng, nhận dạng và phân loại thiết bị, đến phân tích và hiển thị kết quả. Qua đó cho thấy NILM là một giải pháp giám sát năng lượng hiện đại, cho phép phân tách mức tiêu thụ điện của từng thiết bị mà không cần can thiệp trực tiếp vào hệ thống điện hiện hữu.

Bên cạnh đó, chương đã phân tích và so sánh NILM với các phương pháp giám sát phụ tải truyền thống như ILM và Sub-metering theo nhiều tiêu chí khác nhau, bao gồm cấu trúc lắp đặt, độ chính xác, chi phí triển khai, khả năng mở rộng và tích hợp công nghệ mới. Kết quả so sánh cho thấy NILM có nhiều ưu điểm nổi bật như chi phí thấp, dễ triển khai, ít xâm nhập và có tính linh hoạt cao, đặc biệt phù hợp cho quy mô hộ gia đình và các ứng dụng quản lý năng lượng thông minh.

Chương 1 cũng đã tổng hợp và phân tích các nghiên cứu tiêu biểu về NILM trên thế giới và tại Việt Nam, làm rõ quá trình phát triển của công nghệ này từ các phương pháp toán học truyền thống đến các phương pháp dựa trên học máy và học sâu. Qua đó có thể nhận thấy xu hướng nghiên cứu NILM hiện nay tập trung vào việc ứng dụng các mô hình mạng nơ-ron sâu nhằm nâng cao độ chính xác phân tách phụ tải, đồng thời hướng tới khả năng triển khai trên các thiết bị nhúng và hệ thống thời gian thực. Tuy nhiên, tại Việt Nam, số lượng nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn của NILM vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong lĩnh vực quản lý năng lượng hộ gia đình.

Trên cơ sở phân tích các thuật toán và mô hình NILM phổ biến, chương đã lựa chọn và đề xuất mô hình mạng nơ-ron sâu dựa trên cơ chế attention làm hướng nghiên cứu chính cho đề án. Việc đánh giá cấu trúc mô hình, số lượng tham số và khả năng triển khai trên nền tảng phần cứng nhúng cho thấy cần có sự cân đối giữa độ chính xác và yêu cầu tài nguyên tính toán, qua đó làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình nghiên cứu phù hợp với điều kiện thực tế. Những nội dung này là tiền đề cần thiết để phân tích hiện trạng tiêu thụ điện hộ gia đình ở Chương 2 và triển khai, đánh giá mô hình NILM đề xuất trong Chương 3.

CHƯƠNG 2: HIỆN TRẠNG GIÁM SÁT QUẢN LÝ TIÊU THỤ ĐIỆN HỘ GIA ĐÌNH

2.1. Tổng quan về tiêu thụ điện trong hộ gia đình

2.1.1. Đặc điểm tiêu thụ điện trong hộ gia đình

Sử dụng năng lượng điện là một trong các nhu cầu thiết yếu trong đời sống con người hiện đại và cũng là yếu tố có ảnh hưởng lớn đến kinh tế, chính trị, văn hóa, xã hội và nhất là biến đổi khí hậu của mỗi quốc gia. Việt Nam đang trong thời kỳ phát triển nhanh, nhu cầu sử dụng điện cũng tăng theo nên tình trạng thiếu điện luôn cần được quan tâm và giải quyết.

Bên cạnh đó tiêu thụ điện trong hộ gia đình là một trong những lĩnh vực quan trọng của ngành năng lượng, phản ánh trực tiếp mức sống, thói quen sinh hoạt và mức độ hiện đại hóa của người dân. Trong các hộ gia đình, điện năng được sử dụng chủ yếu cho các mục đích sinh hoạt như chiếu sáng, nấu ăn, giặt giũ, làm mát, sưởi ấm và sử dụng các thiết bị điện tử giải trí, học tập.

Tiêu thụ điện trong hộ gia đình có những đặc điểm đáng lưu ý về cấu trúc thiết bị, thói quen sử dụng, tính chu kỳ và biến động theo thời gian. Việc nắm bắt những đặc điểm này là cơ sở quan trọng để áp dụng công nghệ giám sát phụ tải như NILM một cách hiệu quả.

Cấu trúc tiêu thụ điện đa dạng

Các thiết bị trong gia đình thuộc nhiều nhóm chức năng, dẫn đến mẫu tiêu thụ điện khác nhau:

Bảng 2-1: Tiêu thụ điện theo nhóm chức năng

Nhóm thiết bị	Thiết bị phổ biến	Công suất tiêu thụ (W)
Chiếu sáng	Đèn LED, huỳnh quang	5 – 40 W
Giải trí	TV, loa, đầu thu, máy tính	50 – 200 W
Gia dụng	Tủ lạnh, máy giặt, máy sấy	150 – 2000 W
Nấu nướng	Bếp điện, lò vi sóng, ấm siêu tốc	700 – 2000 W
Điều hòa, làm mát	Quạt, máy lạnh	40 – 2000+ W

Thiết bị chạy nền	Modem WiFi, tủ lạnh, camera	24/7, công suất thấp hoặc trung bình
--------------------------	-----------------------------	--------------------------------------

Kết luận: Các thiết bị gia dụng và điều hòa thường chiếm phần lớn tổng tiêu thụ điện hàng tháng.

Tính thời gian và chu kỳ sử dụng rõ ràng

Giờ cao điểm sử dụng:

- + Buổi sáng (5h30–8h): bật đèn, đun nước, nấu ăn.
- + Buổi tối (17h–22h): nấu nướng, xem TV, sử dụng điều hòa.

Đặc điểm: Tiêu thụ điện tăng vọt theo chu kỳ sinh hoạt hàng ngày, rõ rệt vào buổi tối, tạo ra "đỉnh phụ tải" ảnh hưởng đến hệ thống điện quốc gia.

Thiết bị có chu kỳ hoạt động lặp lại

- + Tủ lạnh: nén lạnh theo chu kỳ (15–20 phút/lần).
- + Máy lạnh: hoạt động ngắt quãng theo nhiệt độ cài đặt.
- + Bình nóng lạnh: bật trong 15–30 phút rồi tắt.

Các thiết bị này để lại “tần số” đặc trưng, giúp hệ thống phân tích và nhận diện.

Tính biến động theo mùa và thời tiết

- Mùa hè: máy lạnh, quạt điện hoạt động nhiều → tăng mạnh công suất tiêu thụ.
- Mùa đông (miền Bắc): sử dụng bình nóng lạnh, máy sưởi.
- Các ngày lễ, cuối tuần: thời gian sử dụng thiết bị dài hơn.

Tác động: Tổng tiêu thụ điện gia đình có thể tăng 20–40% vào mùa hè hoặc mùa đông tùy khu vực.

Tính không đồng nhất giữa các hộ gia đình

- Hộ có trẻ nhỏ, người lớn tuổi → sử dụng thiết bị thường xuyên (máy lạnh, nước nóng...).
- Nhà chung cư, nhà phố, biệt thự → cấu trúc tiêu thụ khác nhau do số tầng, diện tích.
- Khả năng tài chính → ảnh hưởng loại thiết bị (inverter, tiết kiệm điện hay không).

Sự thiếu nhận thức về tiết kiệm điện

- Nhiều người không biết thiết bị nào tiêu thụ nhiều điện nhất.
- Thiết bị không cần thiết vẫn để chế độ chờ (standby).
- Không sử dụng đúng cách: bật máy lạnh ở nhiệt độ thấp, đun nước điện nhiều lần/ngày...

Hậu quả: Dẫn đến hóa đơn điện cao và lãng phí tài nguyên.

2.1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến mức tiêu thụ điện

Khi xác định nhu cầu tiêu thụ điện của mỗi người, mỗi hộ gia đình, mỗi công trình, người ta thường căn cứ vào các tiêu chí sau:

Số lượng và loại thiết bị điện: Mỗi thiết bị có công suất tiêu thụ khác nhau, và số lượng thiết bị càng nhiều thì mức tiêu thụ điện càng lớn. Các thiết bị tiêu tốn nhiều điện năng như điều hòa, máy giặt, tủ lạnh có thể làm tăng mức tiêu thụ điện đáng kể.

Thói quen sử dụng điện: Người dùng có thói quen bật máy lạnh liên tục, ở nhiệt độ quá thấp, hoặc không tắt thiết bị khi không sử dụng, sẽ làm tăng điện năng. Việc sử dụng điện hợp lý, tắt bớt các thiết bị không cần thiết giúp giảm thiểu lượng điện tiêu thụ.

Điều kiện thời tiết: Thời tiết nóng bức làm tăng nhu cầu sử dụng điều hòa, quạt, từ đó làm tăng mức tiêu thụ điện.

Giá điện: Sự thay đổi về giá điện có thể tác động đến hành vi sử dụng điện của các hộ gia đình.

Thành phần và quy mô hộ gia đình: Số người trong gia đình và độ tuổi (ví dụ, hộ có trẻ nhỏ hay người lớn tuổi thường sử dụng điện nhiều hơn) cũng ảnh hưởng đáng kể đến lượng điện tiêu thụ.

Trình độ nhận thức và ý thức tiết kiệm điện: Những hộ có hiểu biết và ý thức tiết kiệm điện thường có mức tiêu thụ hợp lý hơn.

Thời gian sử dụng và mức độ đầy tải của các thiết bị điện: Một thiết bị hoạt động liên tục sẽ tiêu thụ nhiều điện hơn so với thiết bị chỉ hoạt động trong thời gian ngắn. Nếu một thiết bị được bật nhiều lần trong ngày, tổng mức tiêu thụ điện sẽ tăng lên.

Giải pháp cung cấp điện tại khu vực: Nếu khu vực có hệ thống lưới điện quốc gia ổn định, người dùng có thể tiếp cận nguồn điện chất lượng cao với hiệu suất tốt, giúp thiết bị hoạt động ổn định hơn và giảm lãng phí điện.

Chính sách năng lượng được áp dụng tại khu vực nghiên cứu (hạn mức, giá điện, thuế, phí,...): Một số khu vực có chính sách quy định hạn mức tiêu thụ điện theo từng nhóm đối tượng (hộ gia đình, doanh nghiệp sản xuất, công trình công cộng). Khi tiêu thụ vượt mức quy định, giá điện có thể tăng theo biểu giá lũy tiến, tạo động lực để sử dụng điện tiết kiệm hơn. Các chương trình hạn mức có thể đi kèm với chính sách hỗ trợ người thu nhập thấp bằng cách áp dụng giá ưu đãi cho mức tiêu thụ thấp.

Cách bố trí, cách nhiệt và diện tích không gian sống: Nhà nhiều tầng, rộng, hoặc không có cách nhiệt tốt làm tăng điện cho chiếu sáng, làm mát, sưởi ấm. Bố trí nhà hợp lý (thoáng khí, chiếu sáng tự nhiên, sử dụng tường cách nhiệt, kính chống nắng...) có thể giảm đáng kể nhu cầu điện.

2.1.3. Xu hướng sử dụng điện trong bối cảnh hiện nay

Trong bối cảnh toàn cầu hiện nay, nhu cầu sử dụng điện đang tăng mạnh do quá trình công nghiệp hóa, đô thị hóa và chuyển đổi số trên toàn thế giới. Đồng thời, các quốc gia cũng đang chịu áp lực từ biến đổi khí hậu, buộc phải chuyển đổi từ sử dụng các nguồn năng lượng hóa thạch sang các nguồn năng lượng sạch và tái tạo.

Xu hướng sử dụng điện hiện nay đang thay đổi mạnh mẽ trên nhiều lĩnh vực của đời sống và sản xuất. Quá trình điện khí hóa diễn ra nhanh chóng, từ giao thông với sự lan rộng của ô tô điện, xe máy điện, tàu điện, cho đến công nghiệp khi nhiều nhà máy chuyển từ động cơ đốt trong sang động cơ điện như robot tự động, máy gia công CNC hay hệ thống băng chuyền. Cùng với đó, cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 thúc đẩy việc ứng dụng các hệ thống điều khiển, cảm biến và máy móc thông minh – tất cả đều đòi hỏi nguồn điện ổn định, liên tục. Ở phạm vi hộ gia đình, nhu cầu điện cũng tăng lên đáng kể do sự phổ biến của các thiết bị điện tử, điện lạnh và mô hình nhà thông minh.

Quá trình đô thị hóa nhanh làm nhu cầu điện tăng mạnh ở nhiều thành phố, từ chiếu sáng, điều hòa không khí đến vận hành giao thông công cộng và các hạ tầng thiết yếu. Nhiều đô thị đang hướng tới mô hình thành phố thông minh, ứng dụng hệ thống giám sát – điều khiển nhằm sử dụng năng lượng hiệu quả hơn.

Song song với đó, chuyển đổi năng lượng và xu hướng phát triển bền vững cũng tác động sâu rộng đến cách tiêu thụ điện. Người dân ngày càng ưu tiên “điện xanh” từ các nguồn tái tạo như mặt trời, gió, thủy điện nhỏ; còn các lưới điện thông minh giúp tối ưu hóa phân phối và sử dụng năng lượng. Mô hình “prosumer”, nơi người dùng vừa sản xuất vừa tiêu thụ điện thông qua hệ thống điện mặt trời áp mái, trở nên phổ biến và đặt ra yêu cầu thay đổi trong cách vận hành lưới điện, đòi hỏi khả năng điều phối linh hoạt và tích hợp nguồn phân tán.

Công nghệ cũng góp phần quan trọng trong việc quản lý và tối ưu hóa điện năng. Hệ thống điện đang được số hóa nhờ trí tuệ nhân tạo, IoT và blockchain, giúp dự báo, phát hiện sự cố và cân bằng phụ tải hiệu quả hơn. Người dùng có thể theo dõi lượng điện tiêu thụ theo thời gian thực và điều chỉnh hành vi sử dụng phù hợp. Đồng thời, các thiết bị điện ngày nay có hiệu suất cao hơn, tiết kiệm điện nhờ công nghệ inverter, cảm biến thông minh hay LED.

Tuy nhiên, những xu hướng này cũng đặt ra nhiều thách thức. Hạ tầng truyền tải và phân phối cần được hiện đại hóa để đáp ứng nhu cầu tăng cao và khả năng tích hợp năng lượng tái tạo. Bài toán an ninh năng lượng trở nên quan trọng nhằm tránh phụ thuộc vào một số nguồn phát hoặc năng lượng nhập khẩu. Cuối cùng, chính sách giá điện cần hợp lý hơn để vừa khuyến khích tiết kiệm điện, vừa thúc đẩy đầu tư vào các nguồn năng lượng sạch và bền vững.

Xu hướng sử dụng điện hiện nay đang phát triển theo hướng tăng trưởng mạnh, thông minh hóa và bền vững. Người tiêu dùng không chỉ đóng vai trò là bên sử dụng mà còn là một phần trong hệ sinh thái sản xuất và tiêu thụ năng lượng. Việc nắm bắt và thích ứng với những xu hướng này là yếu tố then chốt để đảm bảo an ninh năng lượng và phát triển kinh tế xanh trong tương lai.

2.2. Các giải pháp tiết kiệm điện phổ biến hiện nay

2.2.1. Các giải pháp truyền thống

Các giải pháp tiết kiệm điện truyền thống là những biện pháp đơn giản, dễ thực hiện, không yêu cầu nhiều về công nghệ nhưng mang lại hiệu quả thiết thực nếu được áp dụng đúng cách. Một số biện pháp phổ biến gồm:

Tắt thiết bị khi không sử dụng: Đây là nguyên tắc cơ bản nhất trong tiết kiệm điện. Tắt đèn, quạt, tivi, điều hòa,... khi ra khỏi phòng hoặc không sử dụng giúp giảm lượng điện tiêu thụ đáng kể.

Tận dụng ánh sáng và thông gió tự nhiên: Mở cửa sổ để đón ánh sáng và gió trời giúp giảm nhu cầu sử dụng đèn và quạt hoặc điều hòa vào ban ngày.

Lựa chọn thiết bị tiết kiệm điện: Ưu tiên mua các thiết bị có dán nhãn năng lượng (sao năng lượng) từ 4 sao trở lên, sử dụng công nghệ tiết kiệm điện như inverter cho máy lạnh, máy giặt, tủ lạnh,...

Bảo trì, vệ sinh thiết bị định kỳ: Thiết bị điện khi bị bụi bẩn hoặc hư hỏng sẽ tiêu tốn nhiều năng lượng hơn để hoạt động. Việc bảo trì thường xuyên giúp thiết bị vận hành hiệu quả và tiết kiệm điện hơn.

Sử dụng các hệ thống thu năng lượng bức xạ mặt trời: Năng lượng mặt trời là nguồn năng lượng tái tạo dồi dào, giúp giảm đáng kể sự phụ thuộc vào điện lưới quốc gia. Khi sử dụng hệ thống điện mặt trời, người dùng có thể tự cung cấp điện cho gia đình hoặc doanh nghiệp, hạn chế tối đa việc mua điện từ lưới điện.

Ngoài ra, trong quá trình sử dụng các thiết bị điện và đồ gia dụng hằng ngày: Mỗi người cũng cần chú ý đến những thói quen giúp tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành. Với tủ lạnh, nên hạn chế mở cửa nhiều lần, không xếp thực phẩm quá đầy và cần đảm bảo các khoảng trống giữa các món đồ để luồng không khí có thể đối lưu tốt; đồng thời tránh đặt tủ gần nguồn nhiệt. Đối với máy điều hòa, nhiệt độ nên duy trì từ 25°C trở lên, cửa phòng phải được đóng kín để hạn chế thất thoát nhiệt và tắt điều hòa khi không sử dụng. Khi dùng quạt, cần chọn tốc độ phù hợp và có thể kết hợp cùng điều hòa ở mức nhiệt cao hơn để tiết kiệm điện. Máy lọc không khí nên được vận hành vào giờ thấp điểm và sử dụng phối hợp với quạt hoặc điều hòa để đạt hiệu quả mà vẫn tiết kiệm. Với máy tính, người dùng nên tắt máy nếu không sử dụng trong khoảng 15 phút và ưu tiên các chế độ tiết kiệm điện. Khi sử dụng bàn là, tránh là quần áo còn ướt hoặc trong phòng đang bật điều hòa để hạn chế hao phí năng lượng. Máy giặt chỉ nên vận hành khi có đủ lượng quần áo phù hợp với công suất định mức, tránh chạy nhiều lần không cần thiết. Tương tự, lò vi sóng, lò nướng và các loại bếp không nên sử dụng trong không gian có bật điều hòa để tránh làm tăng tải lạnh cho phòng. Đối với máy bơm nước, cần hạn chế rò rỉ đường ống và nên sử dụng bể chứa có dung tích phù hợp nhằm giảm số lần máy bơm phải khởi động. Khi xem tivi, không nên để độ sáng quá cao, nên tắt bằng nút nguồn trực tiếp, chọn kích thước vừa phải và điều chỉnh các thông số hình ảnh ở mức hợp lý. Máy hút bụi cần được làm sạch túi chứa trước khi sử dụng và không nên vận hành ở nơi ẩm ướt. Riêng với bình đun nước nóng, cần chọn dung tích và công suất phù hợp, luôn đảm bảo bình đầy nước khi sử dụng và đặt bình ở độ cao dưới 2 mét tính từ vòi xả để giảm thất thoát nhiệt qua đường ống. Những lưu ý nhỏ

này không chỉ giúp tiết kiệm điện mà còn góp phần kéo dài tuổi thọ thiết bị và bảo vệ môi trường.

Đối với cộng đồng và các tòa nhà chung cư:

+ Điều hoà không khí và thông gió: Cân nhắc sử dụng hệ thống thiết bị điều hoà trung tâm có hiệu suất cao. Lắp đặt các thiết bị thu hồi năng lượng và các bộ điều khiển tối ưu hoá. Sử dụng các kho trữ lạnh để giảm phụ tải đỉnh. Tăng cường thông gió tự nhiên. Cách nhiệt đúng tiêu chuẩn và tăng cường cách nhiệt cho kết cấu bao che. Giảm thiểu thể tích lưu không, giảm tối đa thời gian vận hành trong điều kiện có suất tiêu thụ điện cao, giữ tải làm mát ở mức tối thiểu...

+ Hệ thống cung cấp nước nóng: Cân nhắc sử dụng hệ thống nước nóng trung tâm: bơm nhiệt, lò hơi hiệu suất cao, hệ thống nước nóng bằng năng lượng mặt trời. Tăng cường dung tích và cách nhiệt bình chứa nước nóng, sử dụng hệ thống ống nước nóng từ hệ thống tuần hoàn tới đầu cấp nước nóng gần nhất có thể và được cách nhiệt tốt.

2.2.2. Ứng dụng công nghệ thông minh trong tiết kiệm điện

Ứng dụng công nghệ thông minh trong tiết kiệm điện là một xu hướng ngày càng phổ biến và đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, giảm chi phí điện và bảo vệ môi trường. Dưới đây là một số công nghệ và giải pháp thông minh tiêu biểu:

Thiết bị điện thông minh (Smart Devices): Sử dụng các thiết bị như ổ cắm thông minh, công tắc thông minh hoặc hệ thống điều khiển qua smartphone giúp người dùng có thể bật/tắt hoặc lập lịch hoạt động cho các thiết bị điện theo thời gian thực, giảm tình trạng lãng phí.

Hệ thống nhà thông minh (smart home): Các hệ thống nhà thông minh tích hợp cảm biến chuyển động, cảm biến ánh sáng, nhiệt độ,... để tự động điều chỉnh hoạt động của các thiết bị như đèn, quạt, máy lạnh,... tùy theo nhu cầu thực tế.

Công tơ điện tử và hệ thống giám sát tiêu thụ điện: Công tơ điện tử cho phép người dùng theo dõi lượng điện tiêu thụ theo giờ, theo ngày qua các ứng dụng điện thoại hoặc website, từ đó điều chỉnh theo nhu cầu thực tế.

Ứng dụng trí tuệ nhân tạo và dữ liệu lớn (AI và Big Data): Một số hệ thống hiện đại có thể phân tích thói quen sử dụng điện của người dùng, dự báo xu hướng tiêu thụ và đưa ra khuyến nghị nhằm tối ưu hóa việc sử dụng điện.

Hệ thống điện mặt trời kết hợp lưu trữ và quản lý thông minh: Các hộ gia đình lắp đặt điện mặt trời áp mái có thể kết hợp với hệ thống lưu trữ và bộ điều khiển thông minh để sử dụng điện hiệu quả, tránh lãng phí và tận dụng nguồn năng lượng tái tạo tối đa.

2.2.3. Giới thiệu công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM)

Công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (tiếng Anh: Non-Intrusive Load Monitoring – NILM) là một phương pháp phân tích và giám sát tiêu thụ điện năng trong một hệ thống điện (như hộ gia đình, tòa nhà, hay nhà máy) mà không cần gắn thiết bị đo riêng cho từng thiết bị điện. Thay vào đó, NILM sử dụng dữ liệu từ một điểm đo duy nhất – thường là tại điểm đầu vào của hệ thống điện – để phân tích và ước lượng mức tiêu thụ của từng thiết bị riêng lẻ.

Ứng dụng của NILM:

Trong hộ gia đình: Giúp người dùng biết thiết bị nào đang tiêu tốn nhiều điện, từ đó có thể điều chỉnh hành vi sử dụng.

Trong doanh nghiệp, tòa nhà: Phân tích phụ tải, phát hiện thiết bị hoạt động bất thường, lên kế hoạch bảo trì.

Trong ngành năng lượng: Hỗ trợ nhà cung cấp điện hiểu rõ nhu cầu sử dụng ở cấp độ vi mô, triển khai chương trình tiết kiệm điện hiệu quả.

Ưu điểm của NILM:

- Tiết kiệm chi phí: Không cần lắp đặt cảm biến trên từng thiết bị.
- Phát hiện sớm rủi ro: Như thiết bị hỏng, tiêu thụ điện bất thường.
- Giám sát từ xa: Có thể theo dõi mức tiêu thụ điện năng của từng thiết bị thông qua hệ thống điều khiển từ xa.
- Tăng tính tự động hóa: Kết hợp với hệ thống nhà thông minh để tự điều chỉnh thiết bị theo thời gian thực.
- Tối ưu hóa năng lượng: Giúp người dùng hiểu rõ hơn về mức tiêu thụ điện và đưa ra các biện pháp tiết kiệm.
- Ứng dụng rộng rãi: Phù hợp với hộ gia đình, doanh nghiệp và hệ thống công nghiệp.

Nhược điểm của NILM:

Độ chính xác ban đầu thấp nếu không có dữ liệu huấn luyện tốt.

- Khó phân biệt các thiết bị có đặc tính điện tương tự nhau.
- Không phát hiện được lỗi phân cứng từng thiết bị.

2.3. Hiện trạng công tác giám sát và quản lý thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình hiện nay

2.3.1. Hiện trạng

Hiện nay, việc giám sát và quản lý thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình chủ yếu dựa trên công tơ điện tổng nhằm phục vụ mục đích đo đếm và thanh toán điện năng. Công tơ này chỉ cung cấp thông tin về tổng sản lượng điện tiêu thụ theo chu kỳ ghi chỉ số, không cho phép theo dõi chi tiết mức tiêu thụ điện của từng thiết bị hay theo các khung thời gian cụ thể trong ngày. Do đó, người sử dụng điện gặp nhiều khó khăn trong việc đánh giá hiệu quả sử dụng điện năng và nhận diện các thiết bị tiêu thụ điện lớn.

Về mặt cơ chế quản lý, hiện nay chưa có các quy định bắt buộc đối với hộ gia đình trong việc giám sát chi tiết tiêu thụ điện theo thiết bị hoặc theo thời gian thực. Biểu giá điện sinh hoạt vẫn chủ yếu áp dụng theo hình thức một thành phần (giá điện bậc thang), chưa phản ánh rõ sự khác biệt chi phí điện năng theo thời gian sử dụng. Điều này chưa tạo được động lực kinh tế đủ mạnh để khuyến khích người dân điều chỉnh hành vi sử dụng điện, đặc biệt là việc hạn chế sử dụng các thiết bị công suất lớn vào giờ cao điểm. Bên cạnh đó, phần lớn các thiết bị điện trong hộ gia đình hoạt động độc lập, thiếu sự tích hợp với các hệ thống quản lý năng lượng thông minh. Việc giám sát tiêu thụ điện, nếu có, chủ yếu mang tính thủ công hoặc ước lượng, chưa hình thành được một hệ thống quản lý điện năng tổng thể và hiệu quả.

2.3.2. Phân tích, đánh giá tồn tại

Từ thực trạng nêu trên, có thể nhận thấy một số tồn tại cơ bản trong công tác quản lý và giám sát tiêu thụ điện tại mạng điện cục bộ của hộ gia đình.

- Thứ nhất, thông tin về tiêu thụ điện thiếu tính minh bạch và chi tiết. Người sử dụng không có khả năng xác định chính xác mức tiêu thụ điện của từng thiết bị, dẫn đến việc quản lý điện năng chủ yếu dựa vào kinh nghiệm và cảm tính.
- Thứ hai, việc kiểm soát công suất tiêu thụ theo thời gian còn hạn chế. Các hộ gia đình khó nhận biết thời điểm xảy ra đỉnh phụ tải nội bộ, đặc biệt khi nhiều thiết

bị công suất lớn vận hành đồng thời, gây nguy cơ quá tải cục bộ và làm giảm hiệu quả sử dụng điện.

- Thứ ba, thiếu các công cụ hỗ trợ thay đổi hành vi sử dụng điện. Trong điều kiện chưa áp dụng rộng rãi giá điện theo thời gian sử dụng, người tiêu dùng chưa có động lực rõ ràng để dịch chuyển phụ tải hoặc tối ưu hóa thời gian vận hành thiết bị.

- Thứ tư, các giải pháp giám sát truyền thống như lắp đặt công tơ hoặc cảm biến cho từng thiết bị có chi phí đầu tư cao, phức tạp trong triển khai, khó áp dụng đại trà cho hộ gia đình.

Những tồn tại trên cho thấy nhu cầu cấp thiết phải có một giải pháp giám sát tiêu thụ điện hiệu quả, chi phí hợp lý và dễ triển khai nhằm nâng cao hiệu quả quản lý năng lượng trong hộ gia đình.

2.3.3. Đề xuất các vấn đề cần nghiên cứu

Từ kết quả phân tích hiện trạng và những tồn tại trong công tác quản lý, giám sát tiêu thụ điện của hộ gia đình được trình bày ở các mục trên, có thể thấy rằng việc thiếu thông tin chi tiết về mức tiêu thụ điện theo thiết bị và theo thời gian là nguyên nhân chính làm hạn chế hiệu quả quản lý năng lượng. Do đó, Chương 3 của đề án tập trung nghiên cứu các vấn đề nhằm khắc phục những hạn chế này trên cơ sở ứng dụng các giải pháp công nghệ phù hợp với điều kiện thực tế.

Trước hết, cần nghiên cứu xây dựng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập cho hộ gia đình, cho phép phân tách mức tiêu thụ điện của các thiết bị sử dụng điện chỉ từ dữ liệu đo tại công tơ tổng. Giải pháp này nhằm giảm chi phí đầu tư, hạn chế can thiệp vào hệ thống điện hiện hữu và tăng khả năng triển khai trên diện rộng. Tiếp theo, cần nghiên cứu lựa chọn và ứng dụng các thuật toán học máy và học sâu phù hợp để nâng cao độ chính xác trong việc nhận dạng thiết bị và ước lượng công suất tiêu thụ điện theo thời gian. Việc đánh giá hiệu năng mô hình cần được thực hiện trên dữ liệu tiêu thụ điện đặc trưng cho hộ gia đình, bảo đảm tính khả thi và độ tin cậy của kết quả. Bên cạnh đó, cần xem xét khả năng triển khai mô hình giám sát đề xuất trên các nền tảng phần cứng có chi phí thấp, đáp ứng yêu cầu về tài nguyên tính toán và thời gian xử lý, hướng tới khả năng ứng dụng trong thực tế. Đồng thời, kết quả phân tách phụ tải cần được khai thác để phân tích hành vi sử dụng điện, qua đó hỗ trợ người sử dụng điều chỉnh thói quen tiêu thụ điện theo hướng tiết kiệm và hiệu quả hơn. Cuối cùng, trên cơ sở kết quả nghiên cứu, cần đề xuất các định hướng ứng dụng giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập trong quản lý năng lượng hộ

gia đình, góp phần giảm phụ tải vào giờ cao điểm và nâng cao hiệu quả sử dụng điện năng, làm tiền đề cho các nghiên cứu và triển khai tiếp theo.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 của đề án tập trung phân tích hiện trạng công tác giám sát và quản lý thiết bị sử dụng điện trong hộ gia đình, làm rõ những hạn chế đang tồn tại cả về mặt kỹ thuật, cơ chế quản lý và hành vi sử dụng điện. Thực tế cho thấy, hoạt động giám sát tiêu thụ điện của hộ gia đình hiện nay chủ yếu dựa trên công tơ điện tổng, chỉ phục vụ mục đích đo đếm điện năng, chưa đáp ứng yêu cầu theo dõi chi tiết mức tiêu thụ điện của từng thiết bị và theo thời gian sử dụng. Bên cạnh đó, việc chưa có các quy định cụ thể về giám sát tiêu thụ điện trong hộ gia đình cùng với cơ chế giá điện sinh hoạt một thành phần chưa tạo được động lực kinh tế đủ mạnh để người sử dụng điều chỉnh hành vi tiêu thụ điện, đặc biệt là việc hạn chế sử dụng các thiết bị công suất lớn vào giờ cao điểm. Điều này làm giảm hiệu quả của công tác quản lý phụ tải và tiết kiệm điện năng

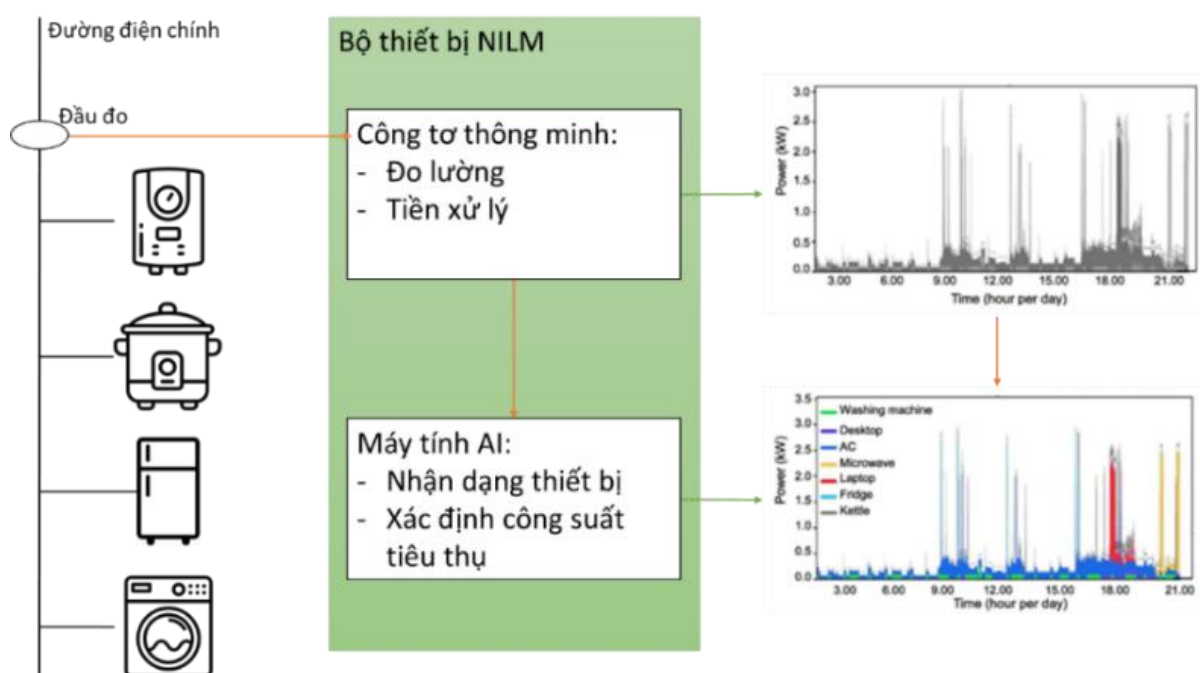
Trên cơ sở phân tích hiện trạng, Chương 2 đã chỉ ra những tồn tại chủ yếu trong quản lý và giám sát tiêu thụ điện của hộ gia đình như thiếu thông tin minh bạch, khó kiểm soát công suất tiêu thụ theo thời gian, thiếu công cụ hỗ trợ thay đổi hành vi sử dụng điện và hạn chế trong việc triển khai các giải pháp giám sát truyền thống do chi phí và độ phức tạp cao. Từ những phân tích trên, chương đã xác định các vấn đề trọng tâm cần nghiên cứu và giải quyết trong Chương 3, bao gồm việc xây dựng mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập, ứng dụng các thuật toán học máy nhằm nâng cao độ chính xác nhận dạng thiết bị và phân tích tiêu thụ điện, hướng tới giải pháp quản lý năng lượng hiệu quả, phù hợp với điều kiện thực tế của hộ gia đình.

CHƯƠNG 3: ỨNG DỤNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT PHỤ TẢI KHÔNG THÂM NHẬP TIẾT KIỆM ĐIỆN NĂNG CHO HỘ GIA ĐÌNH

3.1. Kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo bộ NILM

Tác giả đã có điều kiện tham gia, học hỏi trong quá trình chế tạo bộ thiết bị NILM thuộc đề tài “Nghiên cứu phát triển công nghệ Giám sát phụ tải không xâm nhập cho mạng điện hộ gia đình” tại Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Trong thời điểm viết đề án này, bộ thiết bị đang được hoàn thiện. Dự kiến sẽ có nhiều thuật toán NILM được thử nghiệm. Một trong số đó là thuật toán nhận diện phụ tải mà tác giả đã nghiên cứu ở trên.

Bộ thiết bị NILM gồm hai thành phần chính, phân chia nhiệm vụ xử lý để tối ưu hóa hiệu năng và tính linh hoạt (Hình 2-5).



Hình 3-1: Sơ đồ thiết bị NILM đề xuất

Thiết bị gồm 02 phần chính:

1. Công tơ thông minh: Đây là thành phần tiền tuyến, là cửa ngõ thu thập dữ liệu của hệ thống. Vai trò của nó không chỉ dừng lại ở việc đo đạc mà còn thực hiện các tác vụ tiền xử lý quan trọng.

2. Máy tính nhúng AI: Đây là bộ não trung tâm, nhận các vector đặc trưng từ công tơ thông minh để thực hiện các tác vụ phân tích bậc cao.

Công tơ thông minh thực hiện đo lường tần số cao để có thể nắm bắt được các "dấu vân tay điện" một cách trọn vẹn, đặc biệt là các đặc trưng tức thời (transient) xảy ra trong vài mili giây khi thiết bị khởi động, công tơ phải có khả năng lấy mẫu tín hiệu dòng điện và điện áp ở tần số cao (đến vài kHz). Điều này khác biệt cơ bản với các công tơ điện tử thông thường vốn chỉ đo lường ở tần số thấp (vài Hz).

Máy tính nhúng AI sử dụng các mô hình học máy (Machine Learning) hoặc học sâu (Deep Learning) đã được huấn luyện trước để so sánh vector đặc trưng của sự kiện vừa phát hiện với cơ sở dữ liệu và xác định đó là thiết bị nào. Các thuật toán có thể được sử dụng bao gồm từ cổ điển như k-NN, SVM, Cây quyết định (Decision Tree) đến các kiến trúc mạng nơ-ron phức tạp như Mạng nơ-ron tích chập (CNN) hay Mạng nơ-ron hồi quy (RNN). Sau khi nhận dạng, hệ thống sẽ ước tính đường cong công suất của thiết bị đó và trừ nó ra khỏi tổng công suất, lặp lại quy trình cho đến khi bóc tách được toàn bộ các thiết bị đang hoạt động. Việc sử dụng một máy tính nhúng mạnh, có hỗ trợ tăng tốc GPU, là rất quan trọng để có thể chạy các mô hình AI phức tạp trong thời gian thực.

Phần công tơ thông minh đã được chế tạo (Hình 3-2). Thiết kế gồm hai khối được cách ly về điện: "Mạch nguồn và đo lường" phía cao áp và "Mạch vi điều khiển, hiển thị" phía hạ áp. Sự cách ly này, được thực hiện thông qua các linh kiện chuyên dụng như bộ chuyển đổi DC/DC cách ly (DC/DC ISO) và bộ cách ly tín hiệu số (Digital Isolator), là yếu tố then chốt đảm bảo an toàn tuyệt đối cho người dùng và các thiết bị hạ áp, đồng thời giảm thiểu nhiễu điện từ, nâng cao độ ổn định của hệ thống.

Trung tâm của khối đo lường là IC chuyên dụng ADE7953, có khả năng đo lường chính xác năng lượng tác dụng, phản kháng, biểu kiến, cùng các giá trị RMS và lấy mẫu dạng sóng ở tần số cao. Khối xử lý trung tâm sử dụng vi điều khiển hiệu suất cao STM32F407VET6, với nhân ARM Cortex-M4 có đơn vị dấu phẩy động (FPU) và hỗ trợ các lệnh DSP, cung cấp năng lực xử lý mạnh mẽ để thực hiện các thuật toán tiền xử lý và trích xuất đặc trưng ngay tại thiết bị.

Máy tính nhúng AI được lựa chọn là NVIDIA Jetson Nano (Hình 3-3). Thông số phần cứng cơ bản của NVIDIA Jetson Nano thể hiện trên ở bảng sau:

Bảng 3-1: Thông số phần cứng cơ bản của NVIDIA Jetson Nano

Thành phần	Thông số nổi bật
GPU	128 lõi Maxwell (FP32)
Hiệu năng tính toán	khoảng 472 GFLOPs (FP16) cho các thuật toán AI
RAM tổng	4 GB LPDDR4
Băng thông bộ nhớ	khoảng 25.6 GB/s
TDP / công suất	5–10 W trong điều kiện hoạt động



Hình 3-2: Phần công tơ thông minh



Hình 3-3: Phần máy tính nhúng NVIDIA Jetson Nano

3.2. Thí nghiệm bộ NILM

3.2.1.1. Thiết kế thí nghiệm

Như đã trình bày ở trên, trong đề án này, tác giả thực hiện 3 thí nghiệm ứng với 03 mô hình mạng nơ ron do Inesilla đề xuất [6]. Ứng với mỗi thí nghiệm, có 03 thiết bị được nhận dạng và xác định công suất: Máy rửa bát (DW), tủ lạnh (FR) và lò vi sóng (MW).

Bảng 3-2: Các thí nghiệm ứng với cấu trúc mạng nơ ron S1, S2, S3

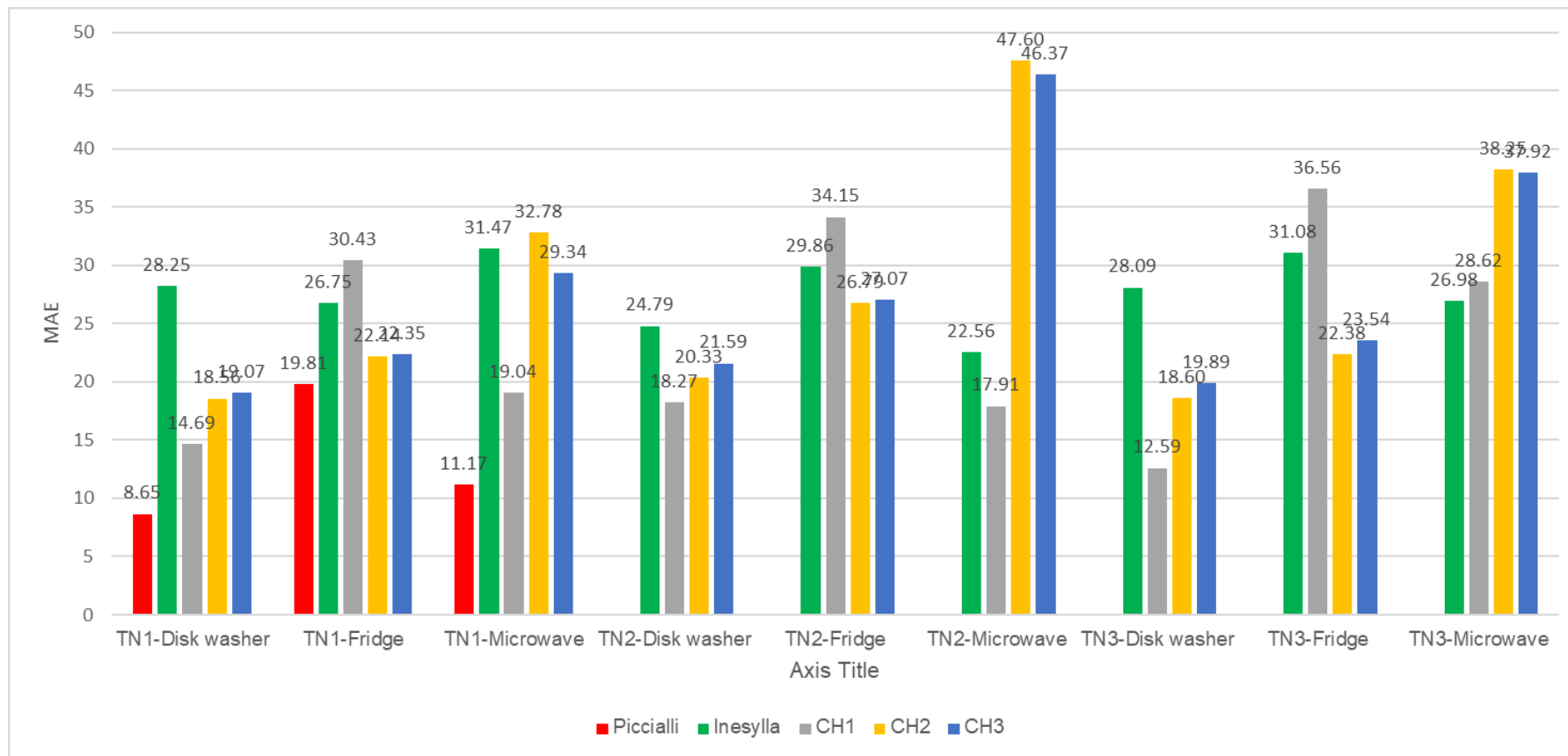
Thí nghiệm	Kiến trúc mô hình	Hồi quy (Regression)	Phân loại (Classification)	Chuẩn hóa (Standardization)	Phân loại bằng Attention
Thí nghiệm 1	S1	✓	✓		
Thí nghiệm 2	S2	✓			
Thí nghiệm 3	S3	✓	✓		✓

Ứng với mỗi thí nghiệm, 03 cấu hình mạng nơ ron được thử nghiệm ứng với $l = 256, 512, 1024$. Tham số $f = 32$, $k = 5$, $h = 128$ giữ cố định.

3.2.1.2. Tóm tắt kết quả

Bảng 3-3: Bảng so sánh kết quả thí nghiệm

Thí nghiệm	Kiến trúc chính	Thiết bị	Piccialli [5]	Inesylla [6]	Cấu hình 1 (CH1)	Cấu hình 2 (CH2)	Cấu hình 3 (CH3)
TN 1	Hồi quy & Phân loại (Kiến trúc gốc)	Máy rửa bát (DW)	8,65	28,25	14,69	18,56	19,07
		Tủ lạnh (FR)	19,81	26,75	30,43	22,14	22,35
		Lò vi sóng (MW)	11,17	31,47	19,04	32,78	29,34
TN 4	Chỉ hồi quy	Máy rửa bát (DW)		24,79	18,27	20,33	21,59
		Tủ lạnh (FR)		29,86	34,15	26,79	27,07
		Lò vi sóng (MW)		22,56	17,91	47,60	46,37
TN 7	Hồi quy & Phân loại + Sử dụng Attention trong Phân loại	Máy rửa bát (DW)		28,09	12,59	18,60	19,89
		Tủ lạnh (FR)		31,08	36,56	22,38	23,54
		Lò vi sóng (MW)		26,98	28,62	38,25	37,92



Hình 3-4: Kết quả thí nghiệm

3.2.1.3. Bình luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự khác biệt đáng kể về sai số trung bình tuyệt đối (MAE) giữa các mô hình tham chiếu trong tài liệu (Piccialli, Inesylla) và ba cấu hình thử nghiệm (CH1, CH2, CH3) tương ứng với các độ dài cửa sổ đầu vào khác nhau. Ở thí nghiệm TN1, khi so sánh giữa ba thiết bị gia dụng, mô hình của Piccialli đạt MAE thấp nhất cho tất cả các trường hợp (8.65; 19.81; 11.17), trong khi Inesylla thể hiện sai số cao hơn đáng kể, dao động từ 26.75 đến 31.47. Các cấu hình thử nghiệm mới (CH1–CH3) cho kết quả nằm giữa hai tác giả tham chiếu, cho thấy khả năng cạnh tranh tương đối của mô hình đề xuất, đặc biệt khi xét đến các điều kiện huấn luyện tương tự.

Khi phân tích theo thí nghiệm, TN2 – tương ứng với mô hình mạng nơ ron có quy mô tham số nhỏ hơn (S2) – thể hiện sự dao động đáng kể về độ chính xác giữa các cấu hình. Trong TN2, các giá trị MAE của CH1 và CH2 nhìn chung thấp hơn CH3, gợi ý rằng việc tăng độ dài cửa sổ đầu vào lên 1024 không mang lại cải thiện rõ rệt về hiệu năng, thậm chí làm giảm độ ổn định ở một số thiết bị như Microwave (MAE tăng từ 17.91 lên 46.37). Ở TN3, xu hướng tương tự được ghi nhận: cấu hình CH1 cho kết quả tốt hơn ở hầu hết các trường hợp, đặc biệt với Disk washer (12.59) – thấp nhất trong toàn bộ dải thí nghiệm.

Xét mối tương quan giữa số lượng tham số và sai số MAE, có thể thấy rằng mô hình S2 (tương ứng với TN2) có quy mô nhỏ nhất – chỉ 163K đến 558K tham số tùy độ dài cửa sổ – nhưng vẫn duy trì được hiệu năng tương đương, thậm chí vượt trội ở một số cấu hình so với S1 và S3. Điều này cho thấy rằng việc tối ưu hóa kiến trúc mạng mang lại hiệu quả rõ rệt hơn so với việc tăng quy mô mô hình. Bên cạnh đó, S2 là mô hình duy nhất có thể triển khai khả thi trên các thiết bị biên như Jetson Nano, nhờ dung lượng bộ nhớ nhỏ mà không đánh đổi đáng kể về độ chính xác.

Tổng thể, các kết quả thực nghiệm khẳng định rằng mô hình đề xuất có khả năng cạnh tranh với các nghiên cứu trước đây. Việc lựa chọn cửa sổ đầu vào có độ dài trung bình (256–512) giúp cân bằng giữa độ chính xác và độ phức tạp tính toán. Mô hình S2, với số lượng tham số tối ưu và khả năng triển khai thực tế cao, nổi bật như một lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng dự đoán năng lượng tại thiết bị biên trong điều kiện hạn chế tài nguyên.

3.3. Đánh giá kết quả tiết kiệm điện năng của bộ NILM

3.3.1. Phương pháp đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện

Để đánh giá hiệu quả năng lượng của các thiết bị gia dụng, trước tiên, công nghệ NILM được sử dụng để phân tích dữ liệu tiêu thụ điện từ phía người dùng, từ đó thu được chi tiết mức tiêu thụ điện của từng thiết bị trong gia đình và phân tích đặc điểm

tiêu thụ điện của người dùng. Sau đó, dựa trên mục đích sử dụng và cơ chế hoạt động của các thiết bị điện, các thiết bị gia dụng được phân loại và các chỉ số đánh giá hiệu quả năng lượng khác nhau được thiết lập tương ứng với từng loại thiết bị. Cuối cùng, các thiết bị có hiệu suất năng lượng thấp được định lượng, xác định khoảng thời gian hoạt động không hiệu quả của thiết bị, tính toán lượng điện năng bị lãng phí trong khoảng thời gian đó, và đề xuất các giải pháp tiêu thụ điện có mục tiêu nhằm tối ưu hóa hành vi sử dụng điện của người dùng. Qua đó, hiện thực hóa sự tương tác giữa người dùng và lưới điện, đồng thời nâng cao trải nghiệm người dùng một cách đáng kể [17].

Dựa trên dữ liệu tiêu thụ điện năng chi tiết, các thiết bị gia dụng được phân loại theo cơ chế hoạt động và mục đích sử dụng của chúng. Đồng thời, các tham số môi trường cũng được xem xét. Cuối cùng, việc đánh giá hiệu quả năng lượng của hộ gia đình được thực hiện bằng cách kết hợp với trạng thái hoạt động theo thời gian thực của các thiết bị điện.

3.3.1.1. Phân loại thiết bị gia dụng

Các thiết bị gia dụng chia thành 4 loại: tải cơ bản, tải có thể gián đoạn, tải có thể chuyển dịch, và tải lưu trữ năng lượng:

Tải cơ bản (Base load): là những thiết bị gia dụng có thời gian sử dụng cố định, chẳng hạn như nồi cơm điện và bếp từ.

Tải có thể gián đoạn (Interruptible load): là các thiết bị mà trạng thái hoạt động bị ảnh hưởng mạnh bởi các yếu tố môi trường, như máy điều hòa không khí, quạt điện, v.v.

Tải có thể chuyển dịch (Transferrable load): là những thiết bị điện như máy giặt, có thể chuyển thời gian hoạt động sang giai đoạn khác tùy theo nhu cầu của người dùng.

Tải lưu trữ năng lượng (Energy storage load): là các thiết bị điện (chẳng hạn như xe ô tô điện, xe đạp điện, v.v.) tích trữ năng lượng điện trước, sau đó hoạt động trong một khoảng thời gian cụ thể. Lượng điện năng tiêu thụ trong thời gian hoạt động này có thể được người dùng thiết lập trước tùy theo kịch bản sử dụng điện tiếp theo [33].

3.3.1.2. Triển vọng tiết kiệm năng lượng của các thiết bị gia dụng

Triển vọng tiết kiệm năng lượng của thiết bị gia dụng biểu thị mối quan hệ định lượng giữa lợi ích mà thiết bị mang lại và giá trị đầu ra của năng lượng điện tiêu thụ. Để đạt được việc đánh giá triển vọng năng lượng một cách khoa học và chính xác,

tác giả đề xuất xây dựng các Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng khác nhau cho từng loại tải chính, dựa trên kết quả phân loại thiết bị gia dụng đã nêu ở trên.

Tổng hợp lại, xét đến đặc điểm của bốn loại tải, ta có [17]:

- Đối với tải cơ bản và tải có thể chuyển dịch (như TV, bình nước nóng điện, v.v.), hiệu suất năng lượng phụ thuộc hoàn toàn vào nhu cầu sử dụng điện của người dùng. Lợi ích của người dùng được phản ánh thông qua thời gian sử dụng thiết bị, vì vậy ta xây dựng Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo thời gian.

- Đối với tải có thể gián đoạn, chúng phụ thuộc chặt chẽ vào yếu tố môi trường, chẳng hạn như quạt điện, máy điều hòa nhiệt độ, v.v. Lợi ích sử dụng điện của người dùng được phản ánh qua nhiệt độ và độ chiếu sáng, do đó ta xây dựng Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo nhiệt độ và Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo độ chiếu sáng.

Tóm lại, Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng của thiết bị gia dụng được chia thành ba loại chính:

- Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo thời gian
- Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo nhiệt độ
- Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo độ chiếu sáng

Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo thời gian

Hàm này áp dụng cho tải cơ bản và tải có thể chuyển dịch, như TV và bình nước nóng điện. Nó dùng để đánh giá hiệu suất năng lượng theo thời gian sử dụng thiết bị.

Tại bất kỳ thời điểm nào $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$, Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo thời gian được biểu diễn như sau [17]:

$$\Delta E = E_{tt} - E_{nc} = \int_{t_{tt1}}^{t_{tt2}} P_t - \int_{t_{nc1}}^{t_{nc2}} P_t = P_t(t_{tt2} - t_{tt1} - t_{nc2} + t_{nc1})$$

Trong đó:

- E_{nc} : điện năng đủ nhu cầu dùng (thực sự sử dụng từ thời điểm t_{nc1} tới t_{nc2})
- E_{tt} : điện năng thực tế sử dụng (để thiết bị hoạt động từ thời điểm t_{tt1} tới t_{tt2})
- P_t : công suất của thiết bị (hằng số)

Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo nhiệt độ

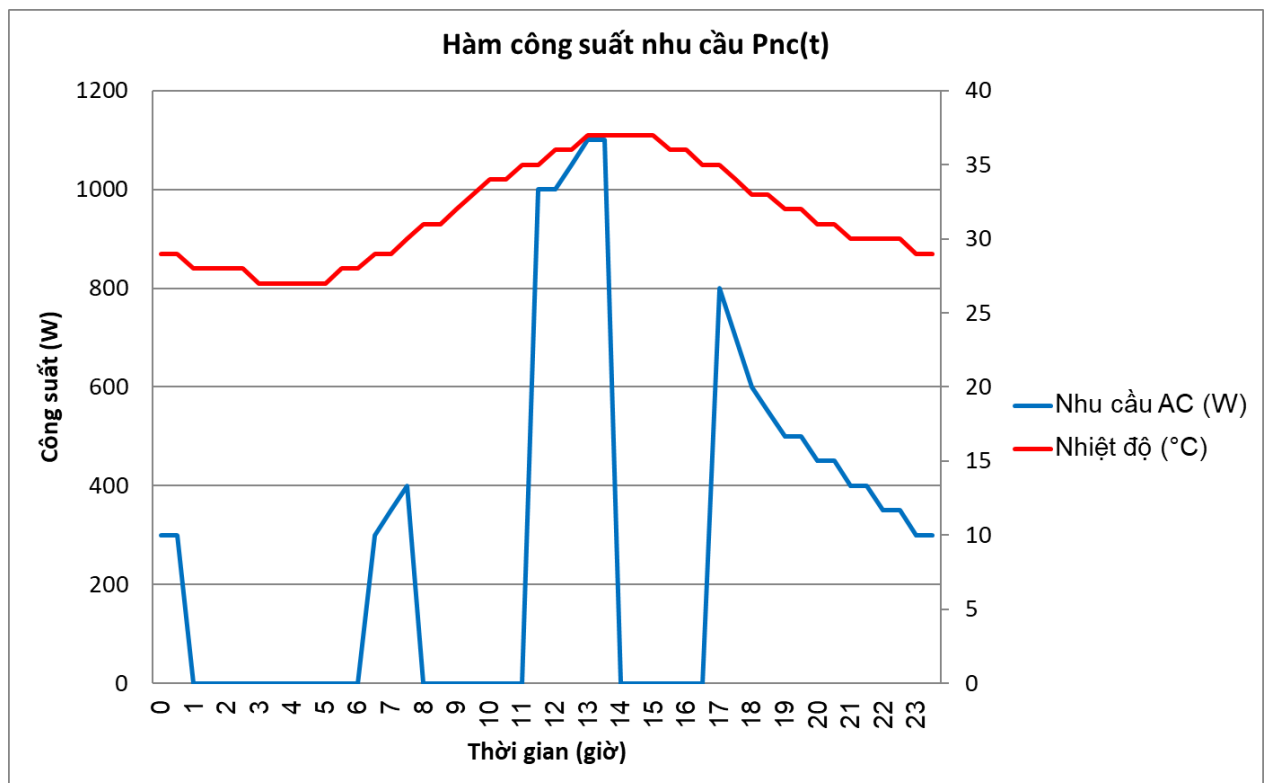
Hàm này áp dụng cho tải có thể gián đoạn, phụ thuộc vào trạng thái vận hành của thiết bị và nhiệt độ môi trường xung quanh, như máy điều hòa hoặc quạt điện.

$$\Delta E = E_{tt} - E_{nc} = \int_0^T P_{tt}(t) - \int_0^T P_{nc}(t)$$

Trong đó:

- E_{nc} : điện năng đủ nhu cầu dùng
- E_{tt} : điện năng thực tế sử dụng
- $P_{nc}(t)$: công suất nhu cầu tại thời điểm t
- $P_{tt}(t)$: công suất thực tế tại thời điểm t

Hàm $P_{nc}(t)$ phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường và cả nhu cầu thực tế của người dùng (có ở nhà hay không). Đồ thị điển hình của hàm này thể hiện trên hình.



Hình 3-5: Hàm công suất nhu cầu điển hình với thiết bị phụ thuộc nhiệt độ

Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng theo độ chiếu sáng

Hàm này áp dụng cho tải có thể gián đoạn, phụ thuộc vào trạng thái vận hành của thiết bị và ánh sáng môi trường xung quanh.

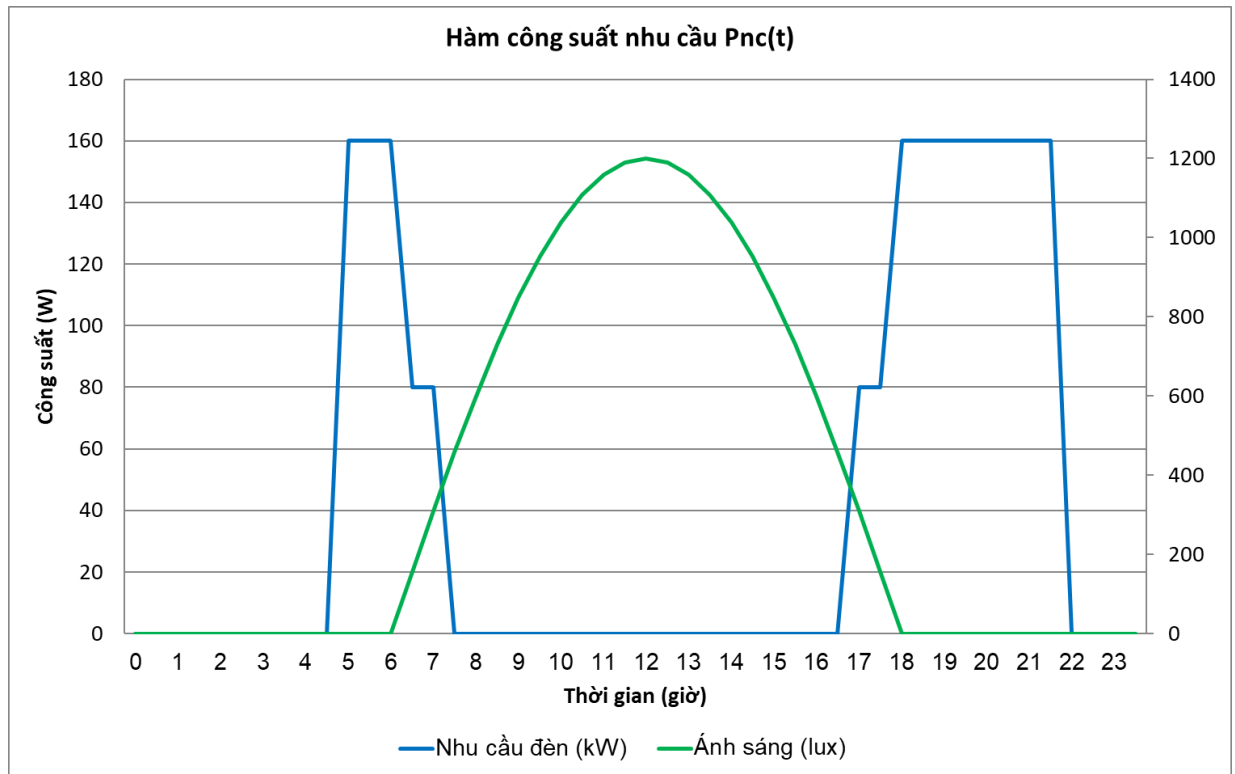
$$\Delta E = E_{tt} - E_{nc} = \int_0^T P_{tt}(t) - \int_0^T P_{nc}(t)$$

Trong đó:

- E_{nc} : điện năng đủ nhu cầu dùng

- E_{tt} : điện năng thực tế sử dụng
- $P_{nc}(t)$: công suất nhu cầu tại thời điểm t
- $P_{tt}(t)$: công suất thực tế tại thời điểm t
- T : khoảng thời gian khảo sát (thường là 24 giờ)

Hàm $P_{nc}(t)$ phụ thuộc vào độ sáng môi trường và cả nhu cầu thực tế của người dùng (có ở nhà hay không). Đồ thị điển hình của hàm này thể hiện trên hình.



Hình 3-6: Hàm công suất nhu cầu điển hình của đèn theo độ sáng

Dựa trên Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng của các thiết bị gia dụng, kết hợp với dữ liệu tiêu thụ điện năng chi tiết của từng thiết bị (được trích xuất bằng NILM – Non-Intrusive Load Monitoring), bao gồm trạng thái hoạt động theo thời gian thực của từng thiết bị, tiến hành đánh giá hiệu quả năng lượng trong hộ gia đình.

3.3.2. Dữ liệu phục vụ đánh giá

Dữ liệu phục vụ đánh giá gồm 2 khía cạnh:

(1) Dữ liệu nhu cầu sử dụng điện điển hình của hộ gia đình Việt Nam (tham khảo [18]) trong một môi trường cụ thể (tại Hà Nội vào một ngày hè điển hình) để đáp ứng nhu cầu sinh hoạt và làm việc.

(2) Thông tin chi tiết về các thiết bị điện trong nhà, bao gồm trạng thái hoạt động theo thời gian thực, thời gian bật/tắt và trình tự sử dụng. Đây là cơ sở để ước tính hiệu quả sử dụng năng lượng trong gia đình [17].

3.3.2.1. Thông tin nhu cầu sử dụng điện

Dữ liệu tỷ lệ tiêu thụ điện cho hộ gia đình gồm các thông tin sau [18]:

Bảng 3-4: Bảng tỷ lệ tiêu thụ điện theo nhóm thiết bị

Nhóm thiết bị	Tỷ lệ tiêu thụ (%)	Ghi chú
Thiết bị dùng nhiệt (đun nấu, nước nóng, điều hòa, tủ lạnh, bàn là, máy sấy,...)	65 – 75	Gây đột biến phụ tải theo mùa & giờ
Thiết bị chiếu sáng, bơm nước, máy giặt, tivi, thiết bị điện tử khác	25 – 35	Phụ tải ổn định hơn, ít đột biến

Cũng theo [18], các khung giờ phụ tải như sau:

- Giờ cao điểm: 6h–8h sáng, 17h–21h tối.
- Giờ thấp điểm: 0h–6h, 8h–15h, 22h–24h.
- Phụ tải cao nhất: 17h–19h, cao gấp 6–10 lần giá trị trung bình.

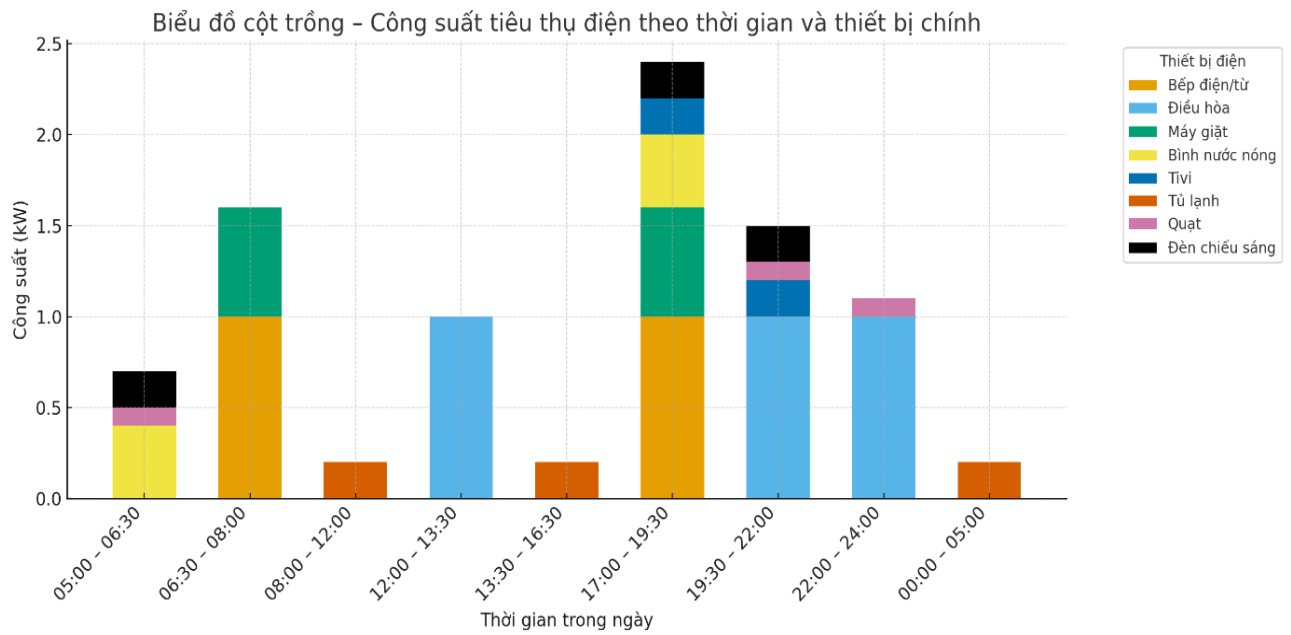
Từ mô tả chi tiết của [18] cùng với các số liệu mô phỏng về thói quen sử dụng điện của các hộ gia đình Việt Nam, xây dựng bảng “Hoạt động của người dùng với các thiết bị điện trong ngày làm việc” như sau:

Bảng 3-5: Hoạt động của người dùng với các thiết bị điện trong ngày làm việc

Thời gian	Hoạt động điện chính	Thiết bị sử dụng	Nhiệt độ (°C)	Ánh sáng	Công suất hoạt động (kW)	Ghi chú tiêu thụ điện
05:00 – 06:30	Chuẩn bị buổi sáng	Đèn chiếu sáng, bình nước nóng, ấm điện, quạt	24–27	Tối	0.8	Điện tăng nhẹ, dùng cho đun nước và chiếu sáng sớm
06:30 – 08:00	Nấu ăn sáng, tắm giặt	Bếp điện/từ, máy bơm	26–30	Trung bình	2.2	Giờ cao điểm sáng, công suất

		nước, máy giặt				cao do nấu ăn và bơm nước
08:00 – 12:00	Rời nhà đi làm, nhà trống	Tủ lạnh, thiết bị chờ (TV, router)	29–33	Sáng	0.3	Tiêu thụ thấp, duy trì tủ lạnh & thiết bị nền
12:00 – 13:30	Nghỉ trưa tại nhà (nếu có người ở nhà)	Quạt, điều hòa, nồi cơm điện	30–35	Sáng	1.2	Tăng nhẹ do làm mát và nấu ăn trưa
13:30 – 16:30	Hoạt động nhẹ, ít dùng điện	Tủ lạnh, thiết bị sạc, máy tính	31–35	Sáng	0.5	Nhu cầu điện trung bình
17:00 – 19:30	Nấu ăn tối, tắm giặt, chiếu sáng	Bếp điện/từ, máy giặt, bình nước nóng, đèn, tivi	28–32	Trung bình → Tối	2.5	Giờ cao điểm tối – phụ tải gấp 6–10 lần trung bình
19:30 – 22:00	Giải trí, sinh hoạt gia đình	Tivi, quạt, điều hòa, đèn, máy tính	27–30	Tối	1.5	Mức tiêu thụ cao nhưng ổn định
22:00 – 24:00	Chuẩn bị đi ngủ	Đèn ngủ, quạt, điều hòa	25–28	Tối	0.6	Bắt đầu giảm tải điện
00:00 – 05:00	Ngủ, chỉ thiết bị nền hoạt động	Tủ lạnh, modem, sạc điện thoại	23–26	Tối	0.2	Giờ thấp điểm , điện tiêu thụ rất thấp

Bảng 3-5 cho thấy kết quả thống kê các hoạt động tiêu thụ điện trong gia đình của người dùng vào các ngày làm việc. Giá trị nhiệt độ thể hiện nhiệt độ ngoài trời tại khu vực gia đình, còn giá trị ánh sáng thể hiện độ sáng trong nhà. Như thể hiện trong bảng, một số hoạt động điện nhất định sẽ gắn liền với các công việc tương ứng, và thời gian sử dụng điện cũng có tính quy luật [17].

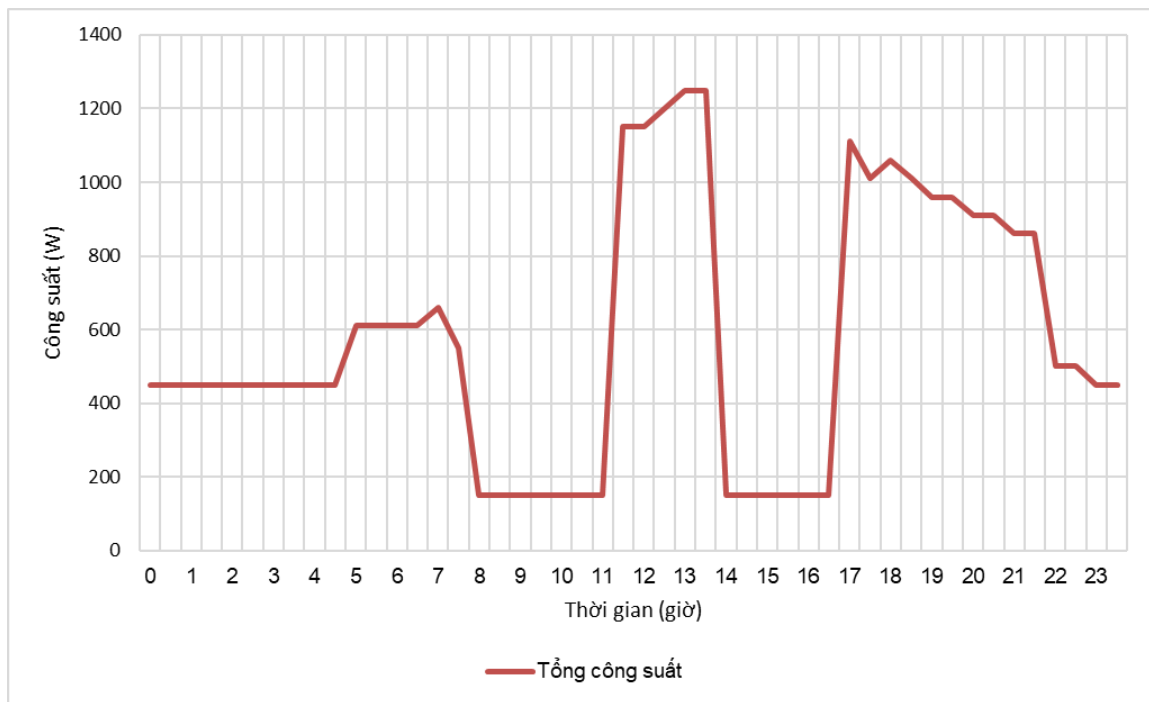


Hình 3-7: Công suất tiêu thụ điện theo thời gian và nhóm thiết bị chính

3.3.2.2. Công suất tiêu thụ điện thực tế

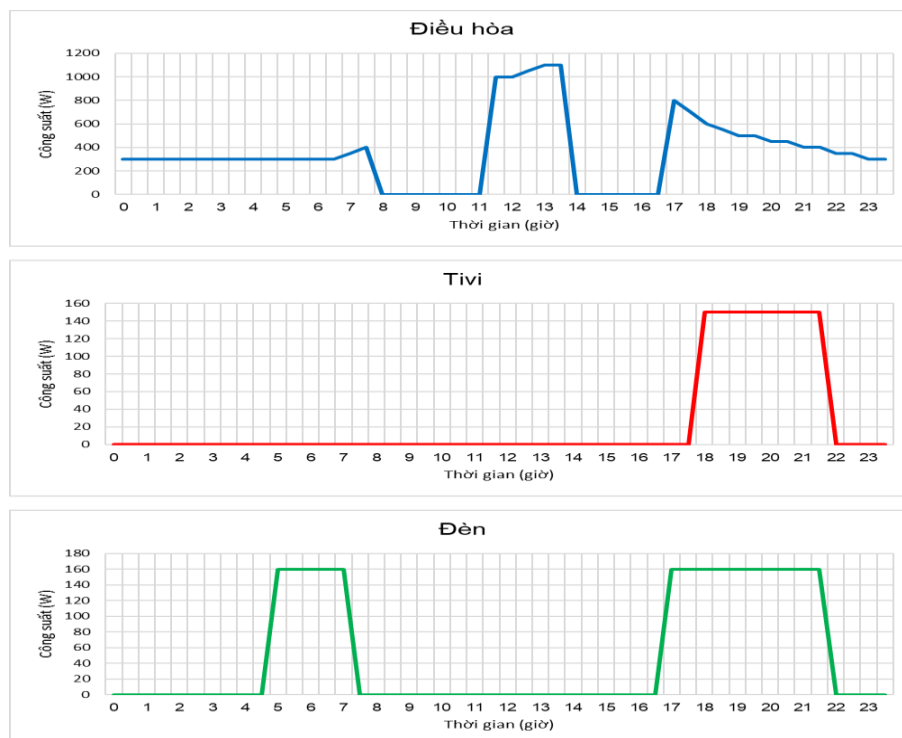
Xét đến yếu tố kinh tế và khả năng mở rộng, công nghệ NILM (Non-Intrusive Load Monitoring – Giám sát tải không xâm lấn) được sử dụng để thu thập thông tin tiêu thụ điện chi tiết của các thiết bị trong gia đình người dùng. Công nghệ NILM có thể thu được dữ liệu chi tiết của từng thiết bị điện chỉ bằng cách sử dụng thông tin tổng thể về lượng điện tiêu thụ trong gia đình [31-32].

Do còn hạn chế về việc triển khai thiết bị NILM thực tế, một kịch bản mô phỏng sẽ được sử dụng để minh họa phương pháp luận. Một đường cong tổng công suất được tổng hợp từ dữ liệu nhu cầu điện phía trên, trong đó bổ sung các yếu tố có thể dẫn tới lãng phí của người dùng như quên tắt tivi, đèn, để nhiệt độ điều hòa cố định cả đêm, v.v.



Hình 3-8: Đường cong công suất của hộ gia đình trong một ngày mùa hè

Sử dụng công nghệ NILM (Non-Intrusive Load Monitoring) để nhận dạng, phân tách và ước tính điện năng tiêu thụ của từng thiết bị điện trong hộ. Đường cong công suất của tivi và điều hòa được thể hiện lần lượt trong Hình 3-9.



Hình 3-9: Đường cong công suất hoạt động của các thiết bị được phân tách từ tổng công suất

3.3.3. Kết quả đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện năng

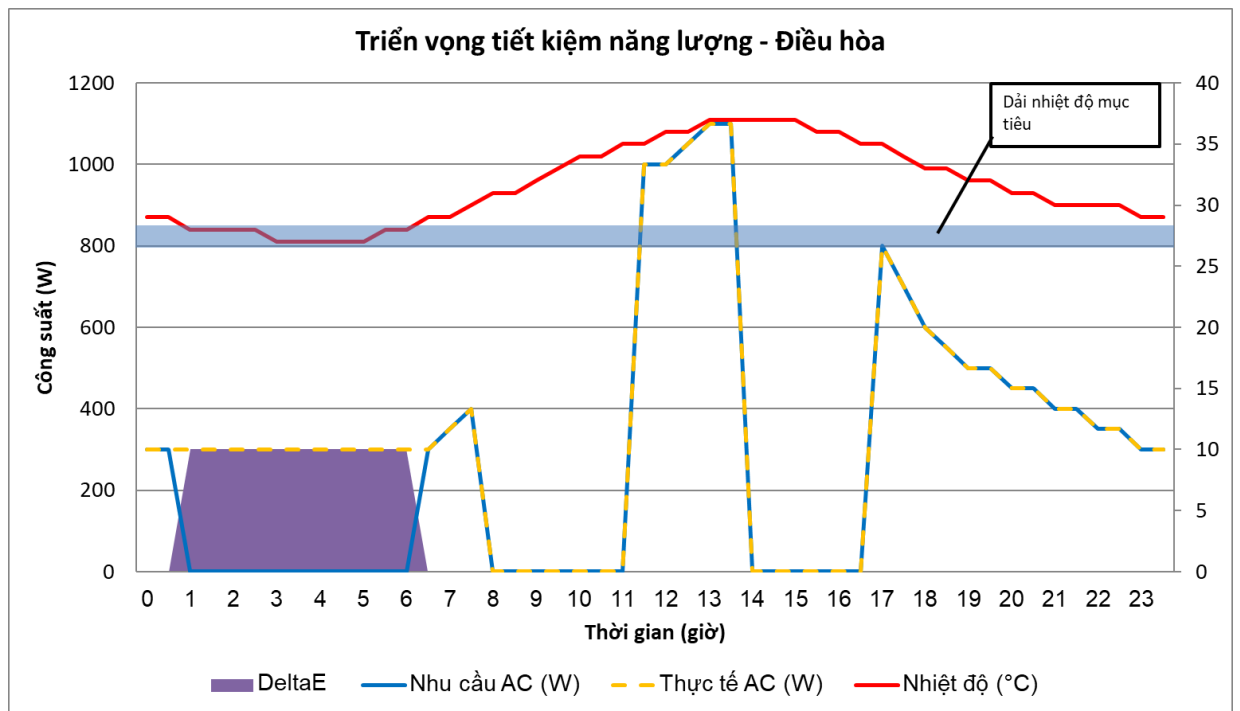
Sử dụng phương pháp đã nêu ở mục 3.3.1, hàm triển vọng năng lượng của từng loại thiết bị được sử dụng để tính toán phần năng lượng có tiềm năng tiết kiệm của từng thiết bị. Năng lượng có tiềm năng tiết kiệm thể hiện trên Bảng 3-6.

Bảng 3-6: Tổng hợp điện năng nhu cầu, thực tế và triển vọng tiết kiệm của từng thiết bị

Thiết bị	Điện năng nhu cầu (kWh)	Điện năng thực tế (kWh)	Triển vọng tiết kiệm (kWh)	Tỷ lệ (%)
Điều hòa	6,775	8,425	1,65	24,35%
Tivi	0,6	0,6	0	0,00%
Đèn	1,04	1,2	0,16	15,38%

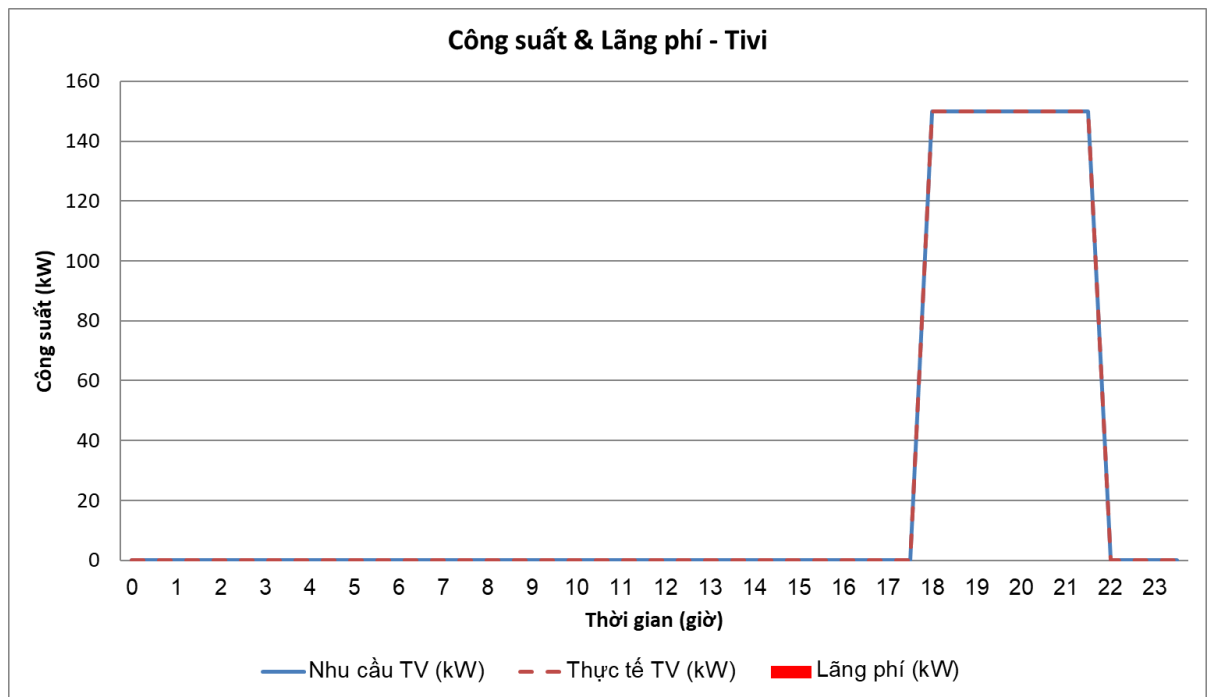
Trên Hình 3-10 thể hiện sự tương quan giữa công suất tiêu thụ của điều hòa (thực tế và nhu cầu), khoảng nhiệt độ mục tiêu, và mức chênh lệch năng lượng có thể tiết kiệm (DeltaE) trong suốt chu kỳ 24 giờ. Ba yếu tố này cho phép đánh giá cả về hành vi vận hành lẫn tiềm năng tối ưu hóa năng lượng.

Trước hết, vùng màu xanh dương nhật biểu thị dải nhiệt độ mục tiêu, và đường nhiệt độ thực tế (màu đỏ) cho thấy những giai đoạn nhiệt độ cao hơn đáng kể so với vùng mục tiêu, đặc biệt trong khoảng từ 10:00 đến 15:00. Đây là các thời điểm mà điều hòa cần tăng cường hoạt động để đưa nhiệt độ trở về mức mong muốn, dẫn đến công suất thực tế (đường vàng đứt nét) tăng vọt, đôi khi đến mức 400 W. Sự trùng khớp giữa các đỉnh công suất và thời điểm nhiệt độ vượt chuẩn cho thấy mức tiêu thụ ở giai đoạn này mang tính tất yếu, ít cơ hội cắt giảm nếu vẫn phải duy trì điều kiện tiện nghi nhiệt.



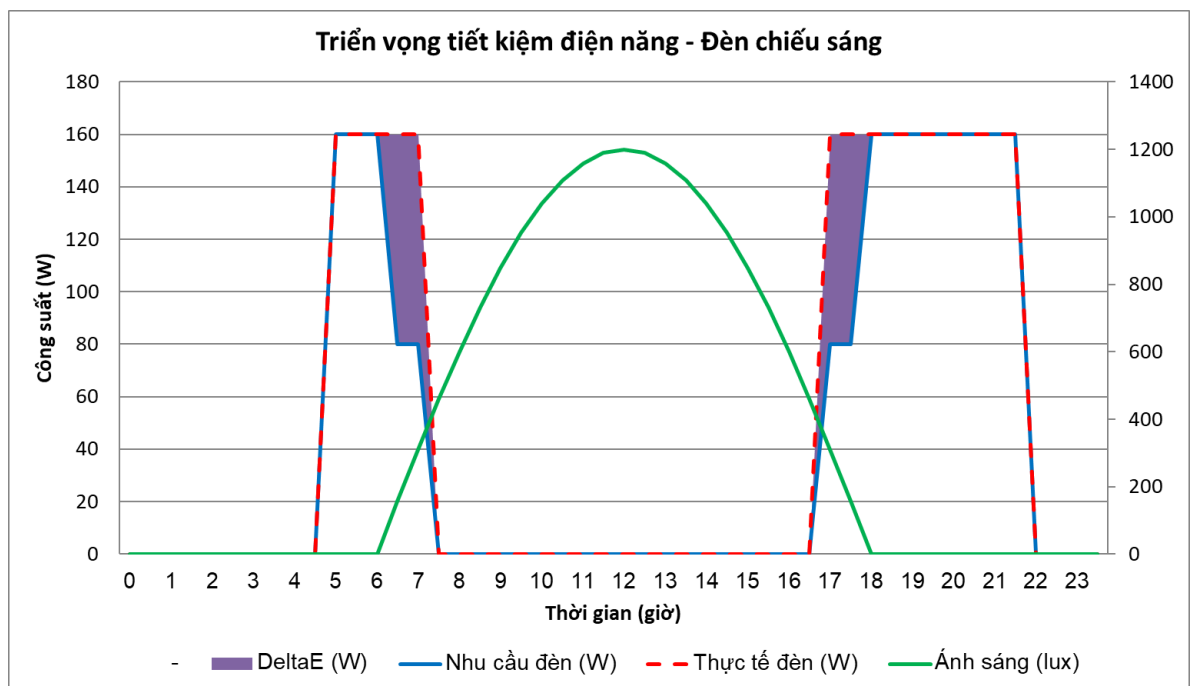
Hình 3-10 Triển vọng tiết kiệm năng lượng – điều hòa

Tuy nhiên, cơ hội tiết kiệm thể hiện rõ ràng hơn ở các thời điểm mà công suất thực tế cao hơn nhu cầu, đặc biệt nằm trong các vùng được tô màu tím (DeltaE). Giai đoạn ban đêm từ 1:00 đến 5:00 và từ 6:00 đến gần 7:00 minh họa khả năng tiết kiệm điện năng vì nhiệt độ nằm trong khoảng mục tiêu. Đây là giai đoạn nhiệt độ môi trường thường mát hơn, và hệ thống điều hòa có thể giảm tải hoặc chuyển sang chế độ tiết kiệm năng lượng mà không ảnh hưởng đến tiện nghi nhiệt của không gian.



Hình 3-11: Triển vọng tiết kiệm năng lượng – tivi

Trên Hình 3-11, với tivi khả năng tiết kiệm điện năng không có.



Hình 3-12: Triển vọng tiết kiệm năng lượng – đèn

Hình 3-12 thể hiện mối quan hệ giữa công suất đèn chiếu sáng (nhu cầu và thực tế), cường độ ánh sáng tự nhiên (lux) và khoảng công suất có thể tiết kiệm (DeltaE) trong một ngày. Nhìn tổng thể, hệ thống chiếu sáng vẫn hoạt động theo lịch cố định,

trong khi cường độ ánh sáng tự nhiên thay đổi mạnh theo thời gian, dẫn đến những giai đoạn chiếu sáng không cần thiết và tạo ra tiềm năng tiết kiệm đáng kể.

Trong khoảng từ 5:00 đến 7:00 và từ 17:00 đến 19:00, đèn hoạt động ở công suất tối đa khoảng 160 W. Tuy nhiên, tại một số thời điểm trong hai giai đoạn này, cường độ ánh sáng tự nhiên (đường màu xanh lá) đã tăng lên đủ để đáp ứng một phần nhu cầu chiếu sáng (thể hiện rõ trong giai đoạn sáng sớm từ 6:00 đến 7:00 và giai đoạn hoàng hôn từ 17:00 đến 18:00). Nhu cầu đèn (đường màu xanh dương) giảm xuống đáng kể khi ánh sáng tự nhiên tăng, nhưng công suất thực tế của đèn (đường đỏ đứt nét) vẫn giữ nguyên mức cao. Điều này dẫn đến các vùng màu tím (DeltaE), biểu thị phần năng lượng bị lãng phí do hệ thống không điều chỉnh công suất theo điều kiện chiếu sáng thực tế.

Ngược lại, trong giai đoạn giữa ngày (8:00 – 16:00), ánh sáng tự nhiên đạt đỉnh, nhu cầu chiếu sáng bằng đèn bằng 0 và công suất thực tế cũng bằng 0. Điều này cho thấy hệ thống chỉ bật đèn theo hai khung giờ cố định (sớm và chiều tối), nhưng vẫn chưa áp dụng cơ chế điều chỉnh theo lux, đặc biệt trong các thời điểm chuyển tiếp ngày–đêm.

Các vùng chênh lệch DeltaE có diện tích tương đối lớn, cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng đáng kể nếu áp dụng điều khiển thông minh.

Với điều hòa, nếu áp dụng điều khiển tối ưu – chẳng hạn như thuật toán điều khiển theo nhu cầu, giảm công suất ở giai đoạn đêm và sáng sớm, hoặc dùng chế độ Eco thông minh – lượng năng lượng tiết kiệm hoàn toàn có thể thu hồi được mà không ảnh hưởng tiêu cực đến điều kiện vận hành.

Những giải pháp như cảm biến ánh sáng, điều chỉnh độ sáng theo lux, dimmer tự động hoặc lịch vận hành theo ngưỡng sáng có thể giúp công suất đèn giảm xuống gần bằng nhu cầu thực tế. Điều này không chỉ tiết kiệm điện mà còn nâng cao độ thoải mái thị giác và kéo dài tuổi thọ của thiết bị chiếu sáng.

3.3.4. Đề xuất

Dựa trên kết quả nghiên cứu, tác giả đề xuất một số định hướng nhằm nâng cao hiệu quả triển khai NILM trong thực tiễn. Đối với người sử dụng điện, cần tăng cường nhận thức về tiêu thụ năng lượng và sử dụng các công cụ giám sát như NILM để theo dõi mức tiêu thụ của từng thiết bị. Việc thay thế dần các thiết bị cũ bằng thiết bị có hiệu suất cao, kết hợp với điều chỉnh thói quen như cài đặt nhiệt độ điều hòa hợp lý, tắt thiết bị hoàn toàn khi không sử dụng, sẽ góp phần tối ưu hóa chi phí điện hàng tháng. NILM cũng có thể được sử dụng như một hệ thống cảnh báo giúp người dùng phát hiện bất thường hoặc thiết bị bị giảm hiệu suất.

Đối với ngành điện và các cơ quan quản lý, tác giả kiến nghị thúc đẩy lộ trình tích hợp NILM vào chương trình công tơ thông minh, hệ thống điều chỉnh phụ tải và các chính sách quản lý nhu cầu điện. Việc ban hành các tiêu chuẩn kỹ thuật về đo đếm, truyền dữ liệu và bảo mật cho thiết bị NILM sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho doanh nghiệp và người dân tiếp cận công nghệ.

Về phía các doanh nghiệp công nghệ, cần phát triển các thiết bị NILM giá thành thấp, dễ lắp đặt và giao diện phân tích trực quan để hỗ trợ người dùng trong việc theo dõi và điều chỉnh thói quen sử dụng điện. Đồng thời, việc tối ưu hóa mô hình học sâu để hoạt động hiệu quả trên các thiết bị nhúng công suất thấp sẽ thúc đẩy khả năng triển khai đại trà.

Cuối cùng, đối với các hướng nghiên cứu tiếp theo, tác giả đề xuất mở rộng quy mô thu thập dữ liệu của nhiều loại hộ gia đình để nâng cao độ chính xác của mô hình, nghiên cứu kết hợp NILM với các kỹ thuật dự báo và phát hiện bất thường, cũng như triển khai NILM trên phạm vi khu dân cư hoặc tòa nhà để phục vụ các ứng dụng năng lượng thông minh. Việc tích hợp NILM với năng lượng mặt trời áp mái, hệ thống lưu trữ hoặc nhà thông minh sẽ mở ra cơ hội lớn trong quản lý và tối ưu hóa năng lượng trong tương lai.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Chương 3 đã thực hiện nghiên cứu chuyên sâu về hiệu suất của các kiến trúc mạng nơ-ron sâu dựa trên cơ chế Attention (Attention-Based Deep Neural Network) cho bài toán Phân rẽ tải không xâm nhập (NILM). Dựa trên mô hình tham chiếu của Piccialli và Sudoso, nghiên cứu đã triển khai và so sánh ba kiến trúc chính: S1 (Hồi quy và Phân loại), S2 (Chỉ hồi quy), và S3 (Hồi quy và Phân loại sử dụng kết quả Attention), trên tập dữ liệu REDD. Các thí nghiệm được thiết kế để kiểm tra khả năng tổng quát hóa của mô hình trong kịch bản chưa từng thấy (unseen scenario), sử dụng dữ liệu từ Ngôi nhà 1 làm tập kiểm tra.

Kết quả thực nghiệm đã khẳng định sự phân công nhiệm vụ chuyên biệt trong mô hình hỗn hợp: nhánh Hồi quy tập trung vào việc suy luận mức tiêu thụ tối đa dự kiến của thiết bị trong cửa sổ đầu vào, trong khi nhánh Phân loại đóng vai trò quan trọng trong việc mô hình hóa các mẫu tiêu thụ thực tế và củng cố trạng thái bật/tắt rõ ràng của thiết bị, từ đó điều chỉnh đầu ra hồi quy để khớp với mẫu tải. Cơ chế Attention đã chứng minh khả năng tăng cường sức mạnh biểu diễn của mạng nơ-ron bằng cách xác định các vị trí hữu ích trong chuỗi tín hiệu tổng hợp. Sự tập trung này khác nhau tùy thuộc vào thiết bị: với các thiết bị có yếu tố đồng thời cao như máy rửa bát và lò vi sóng, Attention tập trung vào các điểm thay đổi trạng thái (bật/tắt); còn đối với tủ lạnh có yếu tố đồng thời thấp, cơ chế này còn mở rộng phạm vi chú ý đến các vùng lân cận bên ngoài phần hoạt động.

Xét về triển vọng ứng dụng trên thiết bị biên, mô hình Chỉ hồi quy (S2) nổi bật là lựa chọn tối ưu. Mặc dù mô hình S2 thiếu nhánh Phân loại, khiến đầu ra có xu hướng mượt hơn và không nắm bắt được đầy đủ các đỉnh tiêu thụ tức thời, nó vẫn cho thấy hiệu suất MAE cạnh tranh. Quan trọng hơn, S2 có số lượng tham số nhỏ nhất (chỉ từ 163K đến 558K tùy thuộc vào độ dài cửa sổ l) so với hàng triệu tham số của S1 và S3. Điều này khiến S2 trở thành kiến trúc khả thi và phù hợp nhất để triển khai trên các thiết bị nhúng có tài nguyên hạn chế như NVIDIA Jetson Nano.

Ngoài ra Chương 3 cũng đã trình bày phương pháp luận và kết quả đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện năng thông qua việc áp dụng công nghệ Giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM).

Chương này đã phân loại các thiết bị gia dụng thành bốn nhóm chính và đề xuất "Hàm triển vọng tiết kiệm năng lượng". Ba hàm cụ thể (theo thời gian, nhiệt độ, và độ chiếu sáng) đã được xây dựng để định lượng mối quan hệ giữa lợi ích người dùng nhận được và năng lượng điện tiêu thụ.

Trường hợp một gia đình ở Việt Nam vào ngày hè điển hình được đánh giá, phân tích và thu được những phát hiện sau:

(1) Xác định được tiềm năng tiết kiệm năng lượng đáng kể, đặc biệt vào ban đêm và sáng sớm. Mặc dù nhiệt độ thực tế đã nằm trong dải mục tiêu, thiết bị vẫn hoạt động ở công suất cao hơn nhu cầu, cho thấy sự lãng phí có thể khắc phục bằng các giải pháp điều khiển thông minh (chế độ Eco, điều khiển theo nhu cầu).

(2) Phát hiện lãng phí năng lượng vào các thời điểm chuyển tiếp (sáng sớm 6:00–7:00 và chiều tối 17:00–18:00). Hệ thống đèn đã không tận dụng ánh sáng tự nhiên (lux) sẵn có, dẫn đến việc chiếu sáng không cần thiết.

Có thể thấy Công nghệ NILM nếu được hoàn thiện sẽ là một công cụ hiệu quả. Nó không chỉ phân tách được mức tiêu thụ của từng thiết bị mà còn định lượng hóa được sự lãng phí dựa trên nhu cầu thực tế của người dùng. Những kết quả này cung cấp cơ sở để đề xuất các giải pháp can thiệp có mục tiêu (ví dụ các giải pháp điều khiển thông minh, điều khiển chiếu sáng theo ánh sáng tự nhiên), giúp người dùng tối ưu hóa hành vi sử dụng điện mà vẫn đảm bảo sự tiện nghi.

III. KẾT LUẬN

Đề án “Nghiên cứu giải pháp tiết kiệm điện năng cho hộ gia đình sử dụng công nghệ giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM)” đã hoàn thành được các mục tiêu đặt ra và mang lại những kết quả có giá trị nhất định. Trước hết, đề án đã hệ thống hóa cơ sở khoa học liên quan đến tiêu thụ điện trong hộ gia đình, các yếu tố ảnh hưởng đến nhu cầu sử dụng điện, cùng các giải pháp tiết kiệm điện đã và đang được ứng dụng. Kết quả phân tích cho thấy hộ gia đình là khu vực có tiềm năng tiết kiệm điện lớn nhưng lại thiếu công cụ giám sát chi tiết để hỗ trợ người dùng nhận biết hành vi tiêu thụ của từng thiết bị. Trong bối cảnh đó, NILM trở thành một giải pháp hiệu quả, chi phí thấp và phù hợp để triển khai rộng rãi.

Đề án đã phân tích toàn diện công nghệ NILM, từ nguyên lý hoạt động, kỹ thuật trích xuất đặc trưng tín hiệu, đến các thuật toán nhận dạng thiết bị dựa trên học máy và học sâu. Tác giả đã xây dựng và thử nghiệm ba mô hình mạng nơ-ron khác nhau, trong đó mô hình S3 (kết hợp hồi quy – phân loại – attention) cho kết quả vượt trội và phù hợp để triển khai thực tế. Ngoài việc mô phỏng trên dữ liệu chuẩn, đề tài cũng đã đề xuất kiến trúc thiết bị NILM bao gồm công tơ thông minh và hệ thống xử lý trên máy tính nhúng, minh chứng rằng công nghệ có thể ứng dụng ở cấp hộ gia đình với chi phí hợp lý.

Bên cạnh những kết quả đạt được, đề án cũng tồn tại một số hạn chế nhất định cần được nhìn nhận một cách khách quan. Trong phạm vi nghiên cứu, việc đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện năng của giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập chủ yếu được thực hiện dựa trên bộ dữ liệu công khai REDD và các kịch bản mô phỏng hành vi sử dụng điện của hộ gia đình. Do chưa có điều kiện thu thập dữ liệu đo đếm thực tế tại các hộ gia đình Việt Nam, các kết quả đánh giá mức tiết kiệm điện năng dự kiến, dao động trong khoảng từ 10% đến 25%, chỉ mang tính tham khảo và phụ thuộc vào các giả định được xây dựng trong kịch bản mô phỏng.

Hiệu quả tiết kiệm điện năng thu được trong đề án phản ánh tiềm năng của giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập trong điều kiện lý tưởng, khi người sử dụng có đầy đủ thông tin về mức tiêu thụ điện của từng thiết bị và chủ động điều chỉnh hành vi sử dụng điện. Tuy nhiên, trong thực tế, mức độ tiết kiệm điện còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác như thói quen sinh hoạt, mức độ sẵn sàng thay đổi hành vi của người sử dụng, cũng như đặc điểm vận hành của các thiết bị điện trong từng hộ gia đình. Do đó, kết quả tiết kiệm điện nêu trên không được xem là giá trị tuyệt đối mà là cơ sở định hướng cho các nghiên cứu và triển khai tiếp theo.

IV. KHUYẾN NGHỊ

- Trên cơ sở những kết quả đạt được và các hạn chế còn tồn tại, đề án đưa ra một số khuyến nghị cho các nghiên cứu tiếp theo như sau:

Thứ nhất, cần thực hiện thu thập dữ liệu tiêu thụ điện thực tế từ các hộ gia đình tại Việt Nam với độ phân giải thời gian phù hợp, làm cơ sở huấn luyện và đánh giá các mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập. Việc sử dụng dữ liệu thực tế sẽ giúp phản ánh chính xác hơn đặc điểm phụ tải và hành vi sử dụng điện của hộ gia đình Việt Nam.

Thứ hai, cần nghiên cứu so sánh sự khác biệt giữa dữ liệu tiêu thụ điện của hộ gia đình Việt Nam và các bộ dữ liệu công khai phổ biến hiện nay như REDD. Thói quen sử dụng thiết bị tại Việt Nam, bao gồm thời gian bật/tắt thiết bị, chế độ chờ, tần suất sử dụng và mức công suất vận hành, có thể khác biệt đáng kể so với các hộ gia đình tại các quốc gia phương Tây. Những khác biệt này có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của mô hình giám sát phụ tải, đặc biệt là đối với mô hình S2 được lựa chọn trong đề án.

Thứ ba, trên cơ sở dữ liệu thực tế thu thập được, cần tiến hành huấn luyện lại và tối ưu hóa mô hình giám sát phụ tải không xâm nhập nhằm nâng cao độ chính xác nhận dạng thiết bị và ước lượng công suất tiêu thụ điện trong điều kiện vận hành thực tế tại Việt Nam.

Thứ tư, cần mở rộng nghiên cứu đánh giá hiệu quả tiết kiệm điện năng dựa trên các kịch bản sử dụng điện thực tế và theo dõi trong thời gian dài, qua đó xác định mức độ tiết kiệm điện khả thi khi áp dụng giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập trong hộ gia đình. Kết quả này sẽ là cơ sở quan trọng cho việc đề xuất các chính sách, giải pháp quản lý năng lượng và khuyến khích sử dụng điện tiết kiệm, hiệu quả trong tương lai.

- Ngoài ra về khía cạnh Quản lý Năng lượng đề án đưa ra một số kiến nghị nhằm nâng cao tính ứng dụng của giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập (NILM) trong quản lý năng lượng, không chỉ ở cấp hộ tiêu thụ mà còn ở cấp hệ thống điện:

Trước hết, cần định hướng ứng dụng hệ thống NILM như một công cụ hỗ trợ quản lý năng lượng, thay vì chỉ dừng lại ở vai trò giám sát kỹ thuật. Thông tin chi tiết về mức tiêu thụ điện theo thiết bị và theo thời gian do NILM cung cấp là cơ sở quan trọng để nâng cao nhận thức của người sử dụng điện, từ đó thúc đẩy thay đổi hành vi sử dụng điện theo hướng tiết kiệm và hiệu quả hơn. Việc cung cấp phản hồi tiêu thụ điện kịp thời và trực quan cho người dùng được xem là một trong những giải pháp quản lý nhu cầu điện hiệu quả ở cấp hộ gia đình.

Thứ hai, cần xem xét tích hợp dữ liệu đầu ra của hệ thống NILM vào các hệ thống quản lý năng lượng và vận hành lưới điện hiện có. Trong mô hình đề xuất, dữ liệu tiêu thụ điện đã được phân tách theo nhóm thiết bị tại hộ gia đình được tổng hợp và truyền về hệ thống quản lý trung tâm thông qua hạ tầng đo đếm thông minh. Dữ liệu này, sau khi được xử lý và ẩn danh, có thể được sử dụng để hỗ trợ công tác dự báo phụ tải, phát hiện nguy cơ quá tải cục bộ và nâng cao hiệu quả điều hành lưới điện phân phối. Việc tích hợp này góp phần tăng cường mối liên kết giữa quản lý nhu cầu điện ở phía phụ tải và quản lý vận hành ở phía cung cấp điện.

Thứ ba, trên cơ sở thông tin chi tiết về hành vi tiêu thụ điện do NILM cung cấp, các chương trình quản lý nhu cầu điện và điều chỉnh phụ tải có thể được thiết kế và triển khai hiệu quả hơn. Thay vì các biện pháp khuyến khích mang tính chung chung, đơn vị quản lý điện lực có thể xây dựng các chương trình khuyến khích người tiêu dùng điều chỉnh thời gian sử dụng các thiết bị công suất lớn, hạn chế tiêu thụ điện vào giờ cao điểm và dịch chuyển phụ tải sang các khung giờ thấp điểm. Điều này góp phần san bằng biểu đồ phụ tải, giảm áp lực đầu tư mở rộng nguồn và lưới điện.

Thứ tư, cần định hướng ứng dụng NILM như một công cụ hỗ trợ xây dựng và đánh giá các chính sách giá điện và khuyến khích sử dụng điện tiết kiệm. Thông tin tiêu thụ điện theo thiết bị và theo thời gian là cơ sở quan trọng để nghiên cứu áp dụng các cơ chế giá điện theo thời gian sử dụng hoặc các chương trình thưởng – phạt dựa trên hành vi tiêu thụ điện. Qua đó, NILM góp phần tăng tính minh bạch trong sử dụng điện và nâng cao hiệu quả của các chính sách quản lý năng lượng.

Cuối cùng, để nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng thực tiễn của giải pháp NILM trong quản lý năng lượng tại Việt Nam, cần tiếp tục nghiên cứu thu thập dữ liệu tiêu thụ điện thực tế từ các hộ gia đình Việt Nam nhằm huấn luyện và hiệu chỉnh mô hình cho phù hợp với đặc điểm phụ tải và thói quen sử dụng điện trong nước. Đây là điều kiện cần thiết để giải pháp giám sát phụ tải không xâm nhập có thể được triển khai rộng rãi, góp phần tối ưu hóa phân phối năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống điện trong bối cảnh phát triển lưới điện thông minh.

DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E. Santos, C. Freitas and A. Aquino, "A Deep Learning Approach for Energy Disaggregation Considering Embedded Devices," in In Proceedings of the 2019 IX Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), Natal, Brazil, 2019.
- [2] D. Cruz-Rangel, C. Ocampo-Martinez, and J. Diaz-Rozo, "Online non-intrusive load monitoring: A review," *Energy Nexus*, vol. 17, p. 100348, 2025, doi: 10.1016/j.nexus.2024.100348.
- [3] G. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, p. p. 1870–1891, 1992.
- [4] M. Kaselimi, E. Protopapadakis, A. Voulodimos, N. Doulamis and A. Doulamis, "Towards Trustworthy Energy Disaggregation: A Review of Challenges, Methods, and Perspectives for Non-Intrusive Load Monitoring. *Sensors* 2022, 22, 5872. <https://doi.org/10.3390/s>".
- [5] "Makonin, S.; Popowich, F.; Bartram, L.; Gill, B.; Bajić, I.V. AMPds: A public dataset for load disaggregation and eco-feedback".
- [6] "Kelly, J.; Knottenbelt, W. Neural NILM: Deep Neural Networks Applied to Energy Disaggregation. In Proceedings of the 2nd".
- [7] P. Huber, A. Calatroni, A. Rumsch and A. Paice, "Review on Deep Neural Networks Applied to Low-Frequency NILM," *Energies*, vol. 14, no. 2390, 2021.
- [8] T. K. D. E. J. G. N. B. Z. O. & N. V. C. Nguyen, "Development of a real-time non-intrusive appliance load monitoring system: An application level model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 90, pp. 168-180, 2017.
- [9] C. S. S. H. S. & C. M. Joe-Wong, "Optimized Day-Ahead Pricing for Smart Grids with Device-Specific Scheduling Flexibility," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 6, pp. 1075-1085, 2012.

[10] O. Z. E. D. B. N. C. N. V. a. G. J. Kien Nguyen Trung, "An innovative non-intrusive load monitoring system for commercial and industrial application," in The 2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hanoi, Vietnam, 2012.

[11] V.-H. N. & M.-Q. N. Thi-Thu-Huong Le, "A STEADY-STATE POWER GENERATION METHOD AND STACKED LSTM IN EVENT DETECTION FOR HOUSEHOLD APPLIANCES," UTEHY Journal of Science and Technology, vol. 27, pp. 7-13, 2020.

[12] L. M. D. a. H. S. N. X. V. C. Nguyen, "Appliance classification on low-cost smart power outlets based on frequency feature of electric current," in 26th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021.

[13] S. M. Hoosh, I. Kamyshev, and H. Ouerdane, "Enhancing Non-Intrusive Load Monitoring with Features Extracted by Independent Component Analysis," Jan. 28, 2025, arXiv: arXiv:2501.16817. doi: 10.48550/arXiv.2501.16817.

[14] H. Rafiq, P. Manandhar, E. Rodriguez-Ubinas, O. Ahmed Qureshi, and T. Palpanas, "A review of current methods and challenges of advanced deep learning-based non-intrusive load monitoring (NILM) in residential context," Energy and Buildings, vol. 305, p. 113890, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.113890.

[15] Y. Liu, Y. Wang, and J. Ma, "Non-Intrusive Load Monitoring in Smart Grids: A Comprehensive Review," Mar. 11, 2024, arXiv: arXiv:2403.06474. doi: 10.48550/arXiv.2403.06474.

[16] Shin, C., Joo, S., Yim, J., Lee, H., Moon, T., & Rhee, W. (2019, July). Subtask gated networks for non-intrusive load monitoring. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 33, No. 01, pp. 1150-1157). <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/847/pdf>.

[17] W. Jiang, L. Tang, and X. Wei, "Home energy efficiency evaluation based on NILM," Procedia Computer Science, vol. 183, pp. 53–60, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.02.030.

[18] T. M. Thắng and P. M. Chinh, “Mức độ tiêu thụ điện và các giải pháp tiết kiệm điện tại các hộ gia đình ở Việt Nam,” Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng – Trường Đại học Điện lực, vol. 26, pp. 18–27, May 2021