

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

LÂM HỒNG PHÚC

**GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT VÀ
PHỤC HỒI CHẤT LƯỢNG ĐIỆN NĂNG CHO LƯỚI
ĐIỆN DC SIÊU NHỎ ĐỘC LẬP**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện

Mã số sinh viên: 201143

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, THÁNG 9 NĂM 2025

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN - ĐIỆN TỬ
BỘ MÔN CUNG CẤP ĐIỆN



ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

**GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT VÀ
PHỤC HỒI CHẤT LƯỢNG ĐIỆN NĂNG CHO LƯỚI
ĐIỆN DC SIÊU NHỎ ĐỘC LẬP**

**(Power Control and Voltage Quality Restoration Algorithm for
Islanded DC Microgrids)**

GVHD: ThS. Nguyễn Đức Hưng

SVTH: Lâm Hồng Phúc

MSSV: 201143

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, THÁNG 9 NĂM 2025

LỜI CẢM ƠN

Đồ án tốt nghiệp này được thực hiện tại Phòng thí nghiệm nghiên cứu Điện tử công suất (Power Electronics Research Laboratory - PERL), dưới sự hướng dẫn của thầy Nguyễn Đức Hưng.

Trước hết, tôi muốn gửi lời cảm ơn đến thầy Nguyễn Đức Hưng và TS. Phạm Minh Đức, giảng viên hướng dẫn và cố vấn của tôi vì đã cho tôi cơ hội để tiếp cận và nghiên cứu trong lĩnh vực đầy tiềm năng này. Tôi cũng chân thành cảm ơn các anh chị, các bạn và các em ở Phòng thí nghiệm nghiên cứu Điện tử công suất đã truyền cảm hứng, giúp đỡ và hỗ trợ tôi trong suốt khoảng thời gian làm việc tại phòng thí nghiệm. Đồ án này sẽ là một nhiệm vụ khó khăn đối với tôi nếu tôi không có sự hỗ trợ của mọi người.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến Giáo sư Yuan-Kang Wu, Phòng thí nghiệm Năng lượng tái tạo và Hệ thống điện, Đại học Quốc lập Trung Chính, Đài Loan, vì sự chào đón nồng nhiệt và khoản thời gian đầy kỉ niệm trong chuyến thực tập của tôi tại Đài Loan.

Sau cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc nhất đến gia đình vì sự ủng hộ vô điều kiện của họ trong suốt khoảng thời gian tôi học tại trường.

TP. Hồ Chí Minh, ngày 01 tháng 05 năm 2025

Sinh viên thực hiện

LÂM HỒNG PHÚC

TÓM TẮT ĐỒ ÁN

Việc tích hợp trực tiếp các nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện hiện nay đang gặp nhiều thách thức do tính chất không liên tục và phân tán của các nguồn năng lượng trên. Do vậy, lưới điện siêu nhỏ (Microgrid) là một phương pháp tiếp cận đầy hứa hẹn để tập hợp các máy phát điện phân tán cục bộ (Distributed Generator - DG), cung cấp cho các phụ tải cục bộ cũng như trao đổi với lưới điện tiện ích như một đơn vị có thể kiểm soát và điều khiển. Chế độ phát điện cục bộ - tiêu thụ cục bộ này có thể tránh được việc truyền tải điện đường dài, do đó có thể mang lại hiệu quả cao hơn. Các DG có thể được kết nối với một bus DC chung thông qua bộ chuyển đổi điện để tạo thành một lưới điện siêu nhỏ một chiều (DC Microgrid). Mục đích kiểm soát là làm cho nhiều DG chia sẻ tải đúng cách cũng như duy trì sự ổn định của điện áp. Đồ án này thảo luận về mô hình hóa, phân tích và kiểm soát microgrid DC với nhiều DG để cải thiện hiệu suất của nó ở trạng thái ổn định và trạng thái động.

Mặc dù điều khiển chủ-tớ truyền thống có thể đạt được sự điều chỉnh điện áp tốt và chia sẻ tải bằng nhau, nhưng sự phụ thuộc của nó vào giao tiếp bằng thông cao và đơn vị chính làm giảm đáng kể độ tin cậy của hệ thống. Ngược lại, điều khiển droop cung cấp một sơ đồ điều khiển phân tán mà không cần giao tiếp. Là một phương pháp lập trình trở kháng đầu ra, điều khiển điện áp và chia sẻ tải được thực hiện tự động theo trở kháng đầu ra của DG. Do đó, nó nhạy cảm với trở kháng cáp kết nối và độ lệch tham chiếu điện áp danh định trong các ứng dụng điện áp thấp.

Trong đồ án này, lưới điện siêu nhỏ DC và phương pháp điều khiển Droop truyền thống được xem xét và phân tích, từ đó đề ra những nhược điểm hiện có của phương pháp điều khiển này. Đồng thời, ở trạng thái ổn định, một phương pháp bù sử dụng tham chiếu dòng điện chung được đề xuất để tăng cường hiệu suất chia sẻ tải và điện áp bus DC đồng thời. Biên độ của hệ số bù điện áp được phân tích bằng cách sử dụng các thử nghiệm ổn định tín hiệu nhỏ. Các mô phỏng trong MATLAB/Simulink và các thử nghiệm thực nghiệm trong phòng thí nghiệm được thực hiện để xác minh hiệu quả của phương pháp được đề xuất.

ABSTRACT

Integrating renewable energy sources directly into the current power grid poses significant challenges due to their intermittent and decentralized nature. Therefore, the microgrid approach emerges as a promising solution to consolidate locally distributed generators (DGs), supplying local loads while interacting with the utility grid as a controllable and manageable unit. This local generation-consumption mode can eliminate the need for long-distance electricity transmission, thereby improving overall efficiency. DGs can be connected to a common DC bus via power converters to form a DC microgrid. The control objective is to ensure proper load sharing among DGs while maintaining voltage stability. This thesis discusses the modeling, analysis, and control of DC microgrids with multiple DGs to enhance their performance in both steady-state and dynamic conditions.

Although traditional master-slave control can achieve good voltage regulation and equal load sharing, its reliance on high-bandwidth communication and a central unit significantly reduces system reliability. In contrast, droop control provides a decentralized control scheme without requiring communication. As a method of programming output impedance, it enables automatic voltage regulation and load sharing according to the output impedance of DGs. However, it is sensitive to the impedance of connecting cables and reference voltage deviations in low-voltage applications.

In this project, DC microgrids and traditional droop control methods are reviewed and analyzed to identify existing drawbacks. Additionally, under steady-state conditions, a compensation method using a common current reference is proposed to enhance load-sharing performance and DC bus voltage simultaneously. The magnitude of the voltage compensation factor is analyzed through small-signal stability tests. Simulations in MATLAB/Simulink and experimental tests in the laboratory are conducted to verify the effectiveness of the proposed method.

LỜI CAM ĐOAN

Tôi tên Lâm Hồng Phúc, tôi cam đoan đề tài đồ án tốt nghiệp "Nghiên cứu giải thuật điều khiển công suất chính xác và phục hồi chất lượng điện năng trên lưới điện nhỏ DC hoạt động ở chế độ độc lập" là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi, dưới sự hướng dẫn của thầy Nguyễn Đức Hưng.

Tôi cam đoan không sao chép bất kì tài liệu, ấn phẩm nào. Các tài liệu tham khảo được sử dụng đúng quy định và có trích dẫn rõ ràng. Các số liệu, kết quả mô phỏng, thực nghiệm trong đồ án này đều là trung thực.

Tôi xin chịu trách nhiệm với lời cam đoan này.

Sinh viên thực hiện

LÂM HỒNG PHÚC

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	I
TÓM TẮT ĐỒ ÁN	II
ABSTRACT	III
LỜI CAM ĐOAN	IV
DANH MỤC HÌNH VẼ	VIII
DANH MỤC BẢNG BIỂU	IX
DANH MỤC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	X
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN ĐỀ TÀI	1
1.1 Cơ sở nền tảng	1
1.2 Định nghĩa và cấu hình của lưới điện siêu nhỏ	3
1.2.1 Lưới điện siêu nhỏ AC và DC	5
1.2.2 Ứng dụng của lưới điện siêu nhỏ DC	7
1.2.3 Các vấn đề của lưới điện siêu nhỏ DC	7
1.3 Mục tiêu và đóng góp của nghiên cứu	9
1.4 Cấu trúc đồ án	9
1.5 Công bố khoa học	10
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ DC	11
2.1 Các thành phần cấu tạo nên lưới điện siêu nhỏ DC	11
2.1.1 Các bộ biến đổi điện tử công suất	11
2.1.1.1 Bộ biến đổi hạ áp (Buck Converter)	12
2.1.1.2 Bộ biến đổi tăng áp (Boost Converter)	13
2.1.1.3 Bộ chỉnh lưu ba pha	15
2.1.2 Tải DC	17
2.1.2.1 Tải trở kháng không đổi (CIL)	17

2.1.2.2	Tải dòng điện không đổi (CCL)	17
2.1.2.3	Tải công suất không đổi (CPL)	17
2.2	Các cấu hình lưới điện siêu nhỏ DC	17
2.2.1	Cấu hình thanh cái đơn	17
2.2.2	Cấu hình nhiều thanh cái	18
2.2.3	Các cấu hình khác	18
2.3	Các phương pháp điều khiển lưới điện siêu nhỏ DC	18
2.3.1	Phương pháp điều khiển tập trung	18
2.3.2	Phương pháp điều khiển phân phối	18
2.3.3	Phương pháp điều khiển phân phối	18
2.4	Sơ kết	18
CHƯƠNG 3: PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT CHO LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ DC		19
CHƯƠNG 4: PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT		20
CHƯƠNG 5: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN		21
5.1	Mô phỏng lưới điện siêu nhỏ DC cấu hình thanh cái đơn	21
5.1.1	Thiết lập môi trường mô phỏng	21
5.1.2	Phương pháp điều khiển Droop dòng - áp (V-I Droop Control) . . .	21
5.1.2.1	Mô phỏng với 2 bộ giảm áp	21
5.1.2.2	Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều	21
5.1.3	Phương pháp điều khiển Droop áp - dòng (I-V Droop control) . . .	22
5.1.3.1	Mô phỏng với 2 bộ giảm áp	22
5.1.3.2	Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều	22
5.1.4	Phương pháp điều khiển đề xuất	22
5.1.4.1	Mô phỏng với 2 bộ giảm áp	22
5.1.4.2	Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều	23
5.1.5	So sánh phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp đề xuất	23
5.2	Cấu hình thanh cái đơn với 4 bộ giảm áp - phương pháp đề xuất	24

5.2.1	Thiết lập môi trường mô phỏng	24
5.2.2	Chế độ làm việc bình thường	24
5.2.3	Chế độ làm việc sự cố	24
5.2.3.1	Mất một bộ giảm áp	24
5.2.3.2	Mất hai bộ giảm áp	24
5.2.3.3	Mất thông tin liên lạc	24
5.2.3.4	Kết nối thêm một bộ giảm áp	24
5.3	Mô phỏng lưới điện siêu nhỏ DC cấu hình thanh dạng vòng	24
CHƯƠNG 6: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN		25
CHƯƠNG 7: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN		26
PHỤ LỤC A: THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN GIẢM ÁP		27
PHỤ LỤC B: THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN TĂNG ÁP		28
PHỤ LỤC C: BẢN VẼ SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ PHẦN CỨNG		29
PHỤ LỤC D: CÁC BÀI BÁO ĐƯỢC XUẤT BẢN THEO NGHIÊN CỨU NÀY		30
TÀI LIỆU THAM KHẢO		31

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1	Tỷ lệ năng lượng tái tạo theo ngành trong năm 2021 [1]	2
Hình 1.2	Sản xuất điện theo nguồn năng lượng, 2014-2023	3
Hình 1.3	Sơ đồ đơn giản của lưới điện siêu nhỏ [4].	4
Hình 1.4	Kiến trúc lưới điện phân phối.	5
Hình 1.5	Kiến trúc lưới điện siêu nhỏ AC điển hình.	5
Hình 1.6	Kiến trúc lưới điện siêu nhỏ DC điển hình.	6
Hình 2.1	Mạch giảm áp (DC/DC Buck Converter)	12
Hình 2.2	Mạch tăng áp (DC/DC Boost Converter)	13
Hình 2.3	Mạch tăng áp hai chiều (Bidirectional DC/DC Boost Converter) .	14
Hình 2.4	Bộ chỉnh lưu AC/DC ba pha	15
Hình 2.5	Mạng điện một chiều đơn giản hóa với tải tổng quát	17

DANH MỤC BẢNG BIỂU

DANH MỤC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt, thuật ngữ	Ý nghĩa
RES	Renewable Energy Sources: Năng lượng tái tạo
AC	Alternative Current: Dòng điện xoay chiều

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN ĐỀ TÀI

Sự gia tăng áp dụng năng lượng tái tạo trên toàn cầu đòi hỏi phát triển các hệ thống phân phối điện hiệu quả và tối ưu hơn. Trong bối cảnh đó, microgrid (lưới điện siêu nhỏ) – một cơ chế phân phối điện phi tập trung và linh hoạt để tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo phân tán – đã trở thành trọng tâm nghiên cứu nổi bật trong thời gian gần đây.

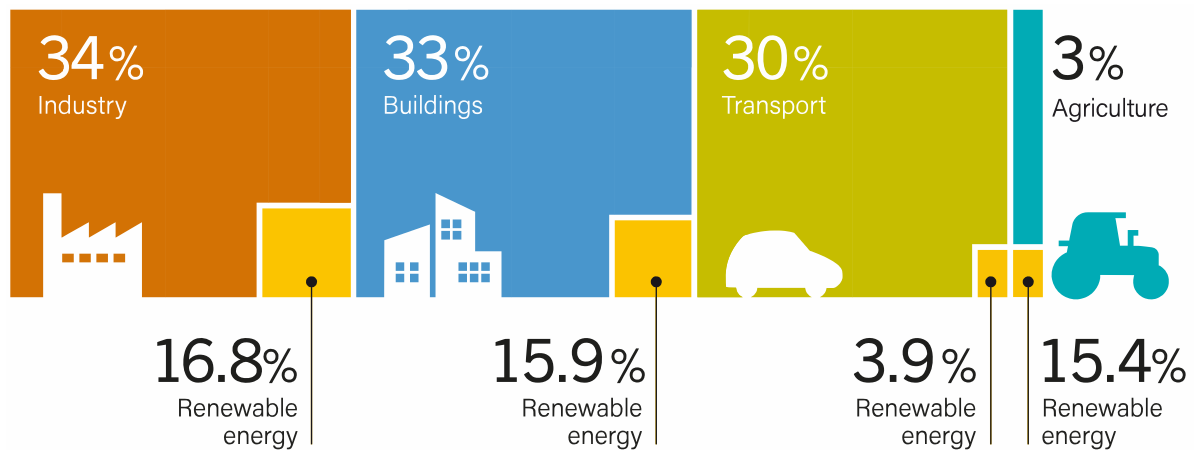
Chương này trình bày phân tích toàn diện về xu hướng phát triển năng lượng tái tạo trong thập kỷ qua, xem xét cả trên quy mô toàn cầu lẫn khu vực. Nghiên cứu cung cấp đánh giá so sánh giữa hai mô hình lưới điện siêu nhỏ xoay chiều (AC) và một chiều (DC), nhấn mạnh các đặc điểm kỹ thuật và ưu điểm vận hành riêng của từng hệ thống. Đặc biệt, đồ án tập trung làm rõ những tiến bộ công nghệ và ứng dụng thực tiễn của hệ thống lưới điện DC, vì đây là trọng tâm nghiên cứu chính của đề tài. Cuối cùng, mục tiêu nghiên cứu và cấu trúc đồ án được trình bày nhằm thiết lập khung phân tích cho các nội dung tiếp theo.

1.1 Cơ sở nền tảng

Nhu cầu về năng lượng sạch đang ngày càng gia tăng. Bên cạnh việc gây ô nhiễm môi trường, các nguồn năng lượng hóa thạch còn có trữ lượng hữu hạn. Việc sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo (RES - Renewable Energy Sources), chẳng hạn như năng lượng gió, năng lượng mặt trời và thủy điện, đang làm thay đổi cơ cấu tiêu thụ năng lượng trên toàn cầu.

Xét theo lĩnh vực tiêu thụ, tỷ trọng năng lượng tái tạo trong tổng mức tiêu thụ năng lượng cuối cùng (TFEC) năm 2021 dao động từ mức cao 16,8 % trong ngành công nghiệp xuống chỉ còn 3,9% trong lĩnh vực giao thông vận tải (xem Hình 1.1). Những chênh lệch này không chỉ phản ánh sự khác biệt về đặc điểm giữa các ngành mà còn cho thấy sự thiếu vắng các chính sách tổng thể nhằm tăng tỷ trọng năng lượng tái tạo cả trong từng lĩnh vực riêng lẻ lẫn giữa các lĩnh vực với nhau. Cần có thêm các biện pháp hành động để đẩy nhanh quá trình điện khí hóa các lĩnh vực sử dụng cuối.

Quá trình điện khí hóa các lĩnh vực tiêu thụ năng lượng đang giúp tăng tỷ trọng sử dụng năng lượng tái tạo. Năm 2021, nông nghiệp dẫn đầu với tỷ lệ điện khí hóa 27%,



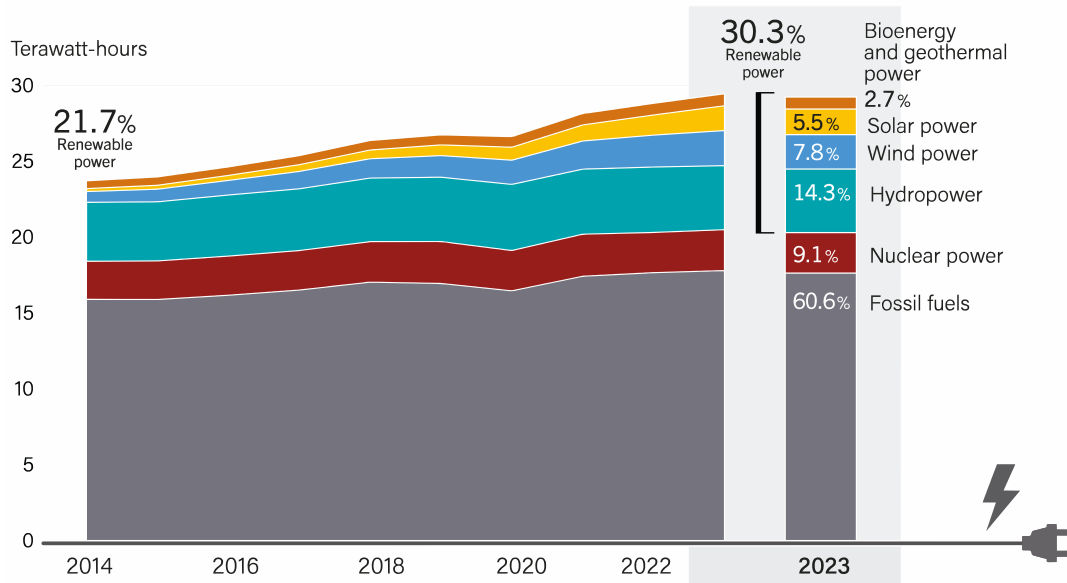
Note: Total final energy consumption in the above figure does not account to military activity and energy use not elsewhere specified.

Hình 1.1 Tỷ lệ năng lượng tái tạo theo ngành trong năm 2021 [1]

nhờ tiến bộ công nghệ và hiệu quả kinh tế. Trong khi đó, giao thông ghi nhận xe điện chiếm 18% doanh số bán xe năm 2023, với sự hỗ trợ từ chính sách nhiều nước. Lĩnh vực xây dựng tăng trưởng chậm (chỉ 2% giai đoạn 2011-2021) dù lắp đặt máy bơm nhiệt tăng 10% năm 2023. Ngành công nghiệp còn hạn chế do khó khăn trong các quy trình nhiệt độ cao như sản xuất thép, xi măng, với sự chênh lệch lớn giữa các phân ngành.

Cùng với việc gia tăng các ngành sử dụng năng lượng tái tạo, tỷ trọng điện năng (bao gồm cả ứng dụng cho nhiệt và giao thông) trong cơ cấu cung cấp năng lượng toàn cầu đã tăng liên tục, từ 19% năm 2011 lên 23% năm 2021, phản ánh xu hướng phụ thuộc ngày càng lớn vào điện năng để đáp ứng nhu cầu đa ngành (xem Hình 1.2). Mặc dù tỷ lệ năng lượng tái tạo trong sản xuất điện tăng nhẹ từ 29.4% (2022) lên 30.3% (2023), mức tăng này chủ yếu đáp ứng nhu cầu điện gia tăng chứ chưa thực sự thay thế đáng kể cho nhiên liệu hóa thạch.

Việc áp dụng các nguồn năng lượng tái tạo phân tán (RES) đòi hỏi phải thay đổi cấu trúc phân phối điện truyền thống vốn chỉ có dòng điện chạy một chiều. Các yếu tố môi trường như sự biến đổi của gió và bức xạ mặt trời khiến cho việc phát điện từ các nguồn RES trở nên gián đoạn và không liên tục một cách khó lường, từ đó ảnh hưởng và gây áp lực lên công tác điều chỉnh và quản lý công suất đỉnh. Thông thường, các nguồn RES được kết nối với lưới điện thông qua các thiết bị điện tử công suất. Các sóng hài tần số cao sinh ra từ bộ chuyển đổi có thể làm giảm chất lượng điện năng và tương tác với các bộ lọc trên đường dây điện, đe dọa đến sự ổn định của hệ thống.



Hình 1.2 Sản xuất điện theo nguồn năng lượng, 2014-2023

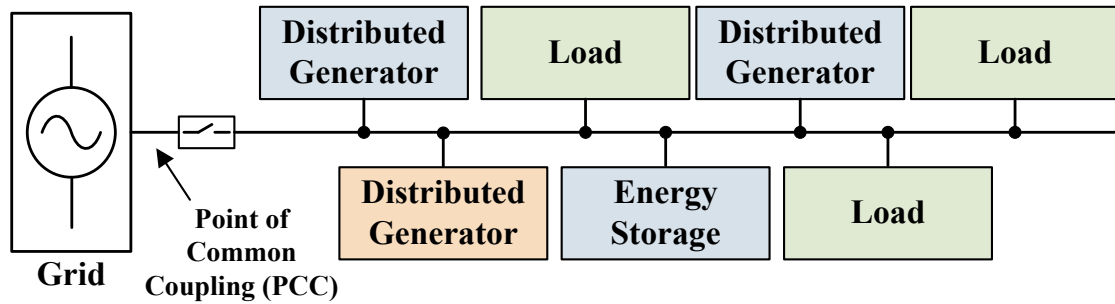
Xuất phát từ những lo ngại nêu trên, một cấu trúc phân phối điện mới và hiệu quả dành cho các nguồn năng lượng phân tán là yêu cầu cấp thiết. Microgrid (lưới điện siêu nhỏ) đã được đề xuất để đảm nhận vai trò này.

1.2 Định nghĩa và cấu hình của lưới điện siêu nhỏ

Có nhiều cách khác nhau để định nghĩa về lưới điện siêu nhỏ, tuy nhiên có 2 cách sau được các nhà nghiên cứu và các kỹ sư trên thế giới chấp nhận rộng rãi.

Định nghĩa 1: Một lưới điện siêu nhỏ (MG) là một mạng lưới phân phối điện áp thấp (LV) có phạm vi địa lý giới hạn, bao gồm các nguồn năng lượng phân tán tại chỗ, các hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) và các tải tiêu thụ, có khả năng vận hành đồng bộ với lưới điện chính (macrogrid) hoặc tách biệt như một lưới điện độc lập, tùy thuộc vào điều kiện vận hành vật lý và (hoặc) kinh tế [2].

Định nghĩa 2: Một lưới điện siêu nhỏ là một hệ thống điện quy mô nhỏ, bao gồm các nguồn phát điện phân tán (DG), các nguồn năng lượng phân tán (DER) và các hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS), kết hợp với các tải điều khiển được và không điều khiển, được vận hành đồng bộ thông qua bộ giao tiếp điện tử công suất (PEI) cùng với các thiết bị bảo vệ. Lưới điện siêu nhỏ là tập hợp các nguồn phát điện phân tán và các nguồn năng lượng phân tán như tua-bin khí, pin năng lượng mặt trời (SPV), v.v., được tích hợp với các thiết bị lưu trữ điện và nhiệt nhằm đáp ứng nhu cầu năng lượng tại chỗ của người



Hình 1.3 Sơ đồ đơn giản của lưới điện siêu nhỏ [4].

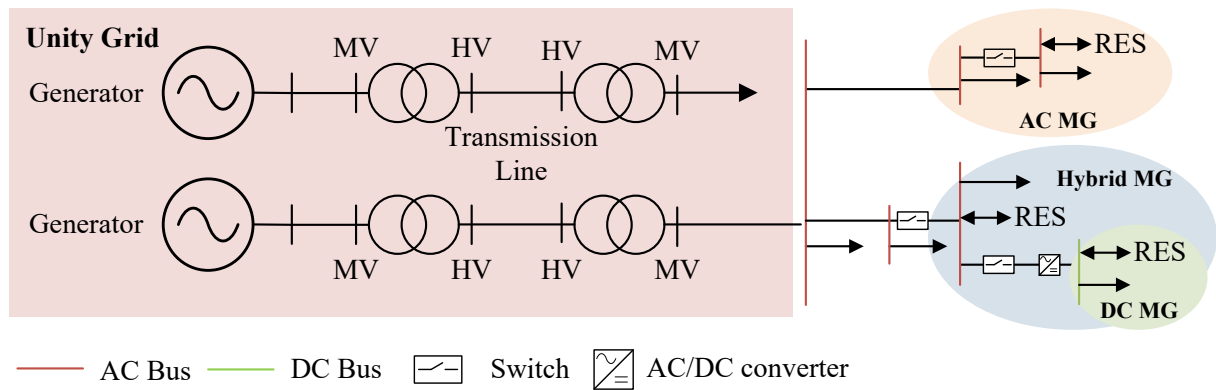
tiêu dùng. Cấu trúc điển hình của một lưới điện siêu nhỏ bao gồm các nguồn năng lượng phân tán, thiết bị lưu trữ năng lượng và tải [3].

Hình 1.3 minh họa một lưới điện siêu nhỏ điển hình. Các nguồn năng lượng phân tán và tải được kết nối với nhau thông qua cùng một mạng lưới truyền tải. Các phân hệ của lưới điện siêu nhỏ sau đó có thể được liên kết với nhau thông qua điểm nối chung (POCC) [3]. Chúng cũng có thể được kết nối với lưới điện chính thông qua bộ chuyển đổi/ nghịch lưu giao tiếp.

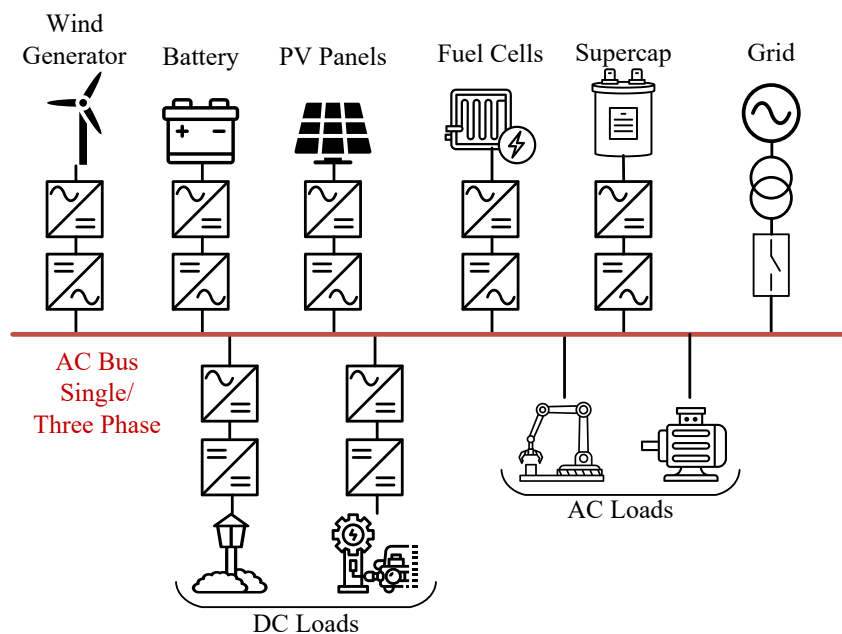
Một lưới điện siêu nhỏ điện áp thấp điển hình thường bao gồm các thành phần sau:

- **Các nguồn năng lượng phân tán:** Các nguồn năng lượng phân tán có thể bao gồm các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, năng lượng gió, thủy điện, năng lượng sinh khối (chẳng hạn như pin nhiên liệu) hoặc năng lượng nhiệt.
- **Các thiết bị lưu trữ năng lượng:** Các thiết bị lưu trữ năng lượng bao gồm thiết bị lưu trữ năng lượng điện hóa, ví dụ như ắc quy axit-chì, pin lithium-ion; thiết bị lưu trữ năng lượng điện, ví dụ như siêu tụ điện; và thiết bị lưu trữ năng lượng cơ học, ví dụ như khí nén và bánh đà.
- **Giao tiếp với lưới chính:** Hệ thống lưới điện siêu nhỏ có thể hoạt động ở chế độ nối lưới hoặc chế độ tách lưới. Chế độ tách lưới còn được gọi là chế độ cô lập hoặc chế độ đảo.
- **Tải điện:** Tải điện có thể là tải không điều khiển được, ví dụ như phụ tải dân dụng (các thiết bị gia đình), hoặc tải điều khiển được, có khả năng tham gia vào quá trình quản lý điện năng trong lưới điện siêu nhỏ, ví dụ như xe điện (EV).

Dựa vào các đặc điểm và tính chất trên, người ta chia lưới điện siêu nhỏ thành 3



Hình 1.4 Kiến trúc lưới điện phân phối.



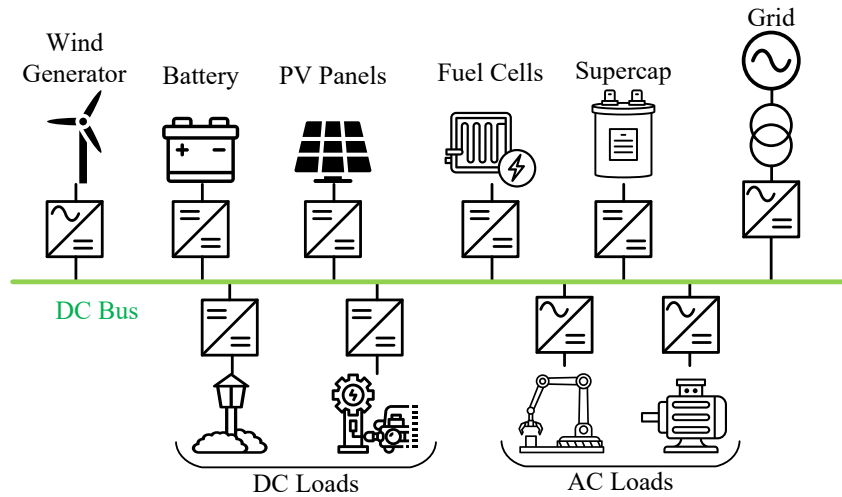
Hình 1.5 Kiến trúc lưới điện siêu nhỏ AC điển hình.

loại chính: Lưới điện siêu nhỏ 1 chiều (DC Microgrid), lưới điện siêu nhỏ xoay chiều (AC microgrid) và lưới điện siêu nhỏ lai (Hybrid Micrigrid).

1.2.1 Lưới điện siêu nhỏ AC và DC

Thanh cái chung trong (PCC) một lưới điện siêu nhỏ có thể là dòng xoay chiều (AC) hoặc dòng một chiều (DC). Mỗi quan hệ giữa lưới điện siêu nhỏ và lưới điện tiện ích truyền thống được thể hiện trong Hình 1.4.

Lưới điện chính vẫn là thành phần quan trọng trong kiến trúc phân phối điện hiện nay. Các lưới điện siêu nhỏ được sử dụng như một dòng phân phối phụ, nhằm quản lý các nguồn năng lượng tái tạo và cung cấp điện cho các tải cục bộ. Các lưới điện siêu nhỏ xoay chiều và một chiều có thể được tích hợp để hình thành lưới điện siêu nhỏ lai. Một



Hình 1.6 Kiến trúc lưới điện siêu nhỏ DC điển hình.

bộ chuyển đổi giao tiếp là cần thiết để liên kết giữa các thanh cái AC và DC. Bộ chuyển đổi này có khả năng liên kết hoặc cô lập lưới điện siêu nhỏ DC một cách tự nhiên mà không cần đến công tắc hoặc thiết bị ngắt bổ sung.

Trong những thập kỷ qua, các lưới điện siêu nhỏ xoay chiều đã được nghiên cứu rộng rãi nhằm phù hợp với cơ sở hạ tầng hệ thống điện hiện có. Hình 1.5 minh họa một hệ thống lưới điện siêu nhỏ AC điển hình. Các nguồn năng lượng tái tạo được kết nối với thanh cái AC chung thông qua các bộ biến đổi điện tử công suất, cho phép ghép nối ổn định với các mạng lưới AC [5]. Các tải AC có thể được kết nối trực tiếp với thanh cái AC, trong khi các tải DC yêu cầu bộ biến đổi AC-DC để cấp nguồn.

Tuy nhiên, nhiều nguồn phân tán và thiết bị lưu trữ năng lượng, chẳng hạn như hệ thống phát điện mặt trời (PV), các dây ắc quy, siêu tụ điện, v.v., vốn dĩ hoạt động dựa trên dòng một chiều (DC). Những thiết bị này cần có thêm các bộ nghịch lưu DC-AC để điều chỉnh điện áp về dạng AC nhằm có thể kết nối với thanh cái AC chung. Ngay cả các tua-bin gió, mặc dù có thể tạo ra đầu ra dạng AC, tần số của chúng lại thay đổi và không đồng bộ với tần số của lưới điện tiện ích. Do đó, đầu ra của chúng vẫn cần được chuyển đổi sang DC trước khi kết nối trở lại thành cái AC thông qua các bộ nghịch lưu.

Vì vậy, cấu hình một thanh cái DC có thể giúp tiết kiệm chi phí cho các bộ chuyển đổi giao tiếp và giảm độ phức tạp của hệ thống. Hơn nữa, hệ thống DC không có tần số, do đó lưới điện siêu nhỏ DC không yêu cầu điều khiển tần số phức tạp hay đồng bộ hóa. Hình 1.6 minh họa một cấu hình lưới điện siêu nhỏ DC điển hình. Các tải DC có thể

được kết nối trực tiếp với thanh cái DC. Một bộ nghịch lưu giao tiếp là cần thiết để kết nối lưới điện siêu nhỏ DC với lưới điện truyền thống. So với lưới điện siêu nhỏ xoay chiều (AC), các ưu điểm của lưới điện siêu nhỏ một chiều (DC) được tóm tắt như sau [5][6]:

- Hiệu suất sử dụng năng lượng cao hơn nhờ giảm số lượng bộ chuyển đổi;
- Không có công suất phản kháng, sóng hài và yêu cầu đồng bộ hóa;
- Dễ dàng hơn trong việc điều khiển và tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo DC khác nhau.

1.2.2 Ứng dụng của lưới điện siêu nhỏ DC

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện trong lĩnh vực lưới điện siêu nhỏ một chiều [7]. Tại Hoa Kỳ, khái niệm Hệ thống Phân phối và Quản lý Năng lượng Điện Tái tạo Tương lai (Future Renewable Electrical Energy Delivery and Management - FREEDM) [8][9][10] đã được đề xuất cho hệ thống phân phối điện thông minh trong tương lai. Trong khuôn khổ này, lưới điện siêu nhỏ một chiều đóng vai trò quan trọng.

Nhiều mô hình thử nghiệm lưới điện siêu nhỏ một chiều đã được triển khai, chẳng hạn như tòa nhà DC tại Đại học Hạ Môn, Trung Quốc [11], phòng thí nghiệm lưới điện siêu nhỏ thông minh tích hợp trí tuệ nhân tạo tại Đan Mạch [12], hệ thống lưới điện siêu nhỏ DC trên đảo Nushima, Nhật Bản [13], thư viện DC do Đại học Bath thực hiện tại Anh, và hệ thống lưới điện siêu nhỏ DC Burlington tại Canada. Tài liệu tham khảo [7] cung cấp thêm các ví dụ khác về lưới điện siêu nhỏ DC. Các ứng dụng này chủ yếu tập trung vào các tòa nhà công nghiệp và điện khí hóa đảo xa. Ngoài ra, lưới điện siêu nhỏ DC còn được áp dụng trên tàu biển, máy bay và trong các trung tâm dữ liệu [2].

1.2.3 Các vấn đề của lưới điện siêu nhỏ DC

Nghiên cứu về lưới điện siêu nhỏ DC bao gồm nhiều chủ đề khác nhau, như điều khiển, phân tích ổn định, bảo vệ, cấu trúc hệ thống và các giao thức truyền thông. Nghiên cứu trình bày trong đồ án này tập trung vào việc nghiên cứu các chiến lược điều khiển và các vấn đề về ổn định hệ thống.

Các hệ thống lưới điện siêu nhỏ DC thường sử dụng sơ đồ điều khiển phân cấp. Một sơ đồ điều khiển phân cấp điển hình có thể được tham khảo tại Chương 2. Các tầng

điều khiển thấp đảm nhận việc điều khiển động lực học các bộ biến đổi giao diện, trong khi các tầng điều khiển cao chịu trách nhiệm quản lý/điều phối công suất thông qua cơ sở hạ tầng truyền thông.

Việc điều khiển các hệ thống DC microgrid hướng tới mục tiêu phân phối điện năng thông minh và tự động, phù hợp với xu hướng phát triển của lưới điện thông minh trong tương lai. Mặc dù việc tích hợp cơ sở hạ tầng truyền thông vào hệ thống DC microgrid giúp công tác quản lý công suất trở nên dễ dàng hơn, nhưng các cấu trúc điều khiển phức tạp làm gia tăng chi phí lắp đặt. Điều này gây khó khăn cho các dự án điện khí hóa vùng sâu vùng xa, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển - một trong những ứng dụng quan trọng của DC microgrid.

Ổn định là yêu cầu thiết yếu khác trong vận hành hệ thống vi mạng lưới điện một chiều (DC microgrid). Các vấn đề ổn định trong DC microgrid liên quan đến việc duy trì điện áp bus ổn định và ngăn ngừa sự cố mất điện, sẽ được thảo luận chi tiết trong Chương 2. Một nguyên nhân tiềm ẩn gây mất ổn định là sự tương tác giữa các bộ biến đổi mắc nối tiếp.

Bộ biến đổi phía tải (hay còn gọi là bộ biến đổi điểm tải) hoạt động như tải công suất không đổi và sẽ tạo ra điện trở gia tăng âm. Hiện tượng này có thể tương tác với các bộ biến đổi hoặc bộ lọc phía trước tạo thành mạch dao động âm. Có hai phương pháp phân tích ổn định chính: (1) phân tích tuyến tính tín hiệu nhỏ và (2) phân tích phi tuyến tín hiệu lớn.

Phương pháp tuyến tính tín hiệu nhỏ dựa trên định lý về độ lợi vòng nhỏ của Middlebrook, cung cấp các chỉ dẫn thiết kế cho các bộ biến đổi mắc nối tiếp. Ý tưởng cốt lõi của phân tích tín hiệu nhỏ là tuyến tính hóa hệ thống phi tuyến quanh điểm làm việc tĩnh. Trong khi đó, phân tích phi tuyến tín hiệu lớn xem xét miền hội tụ (còn gọi là miền hấp dẫn) - nơi hệ thống luôn có xu hướng ổn định khi hoạt động trong miền này.

Tuy nhiên, phân tích phi tuyến có độ phức tạp cao và đòi hỏi khối lượng tính toán lớn. Hơn nữa, phương pháp này khó áp dụng để hướng dẫn thiết kế bộ điều khiển thông thường và phù hợp với các ứng dụng công nghiệp thực tế. Do đó, trong luận án này, tác giả lựa chọn phương pháp tuyến tính tín hiệu nhỏ làm phương pháp phân tích chính.

Bên cạnh hiện tượng mất ổn định do các bộ biến đổi điểm tải gây ra, các bộ biến đổi phía nguồn cũng có thể tương tác lẫn nhau. Việc áp dụng điều khiển droop sẽ làm thay đổi điểm làm việc tĩnh và có nguy cơ gây mất ổn định hệ thống. Hơn nữa, các bộ biến đổi giao diện được mô tả bằng hàm truyền pha không cực tiểu cũng tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định.

Từ góc độ điều khiển, các phương pháp truyền thống để giảm ảnh hưởng của bộ biến đổi giao diện pha không cực tiểu chủ yếu dựa trên điện trở ký sinh của tụ điện đầu ra. Tuy nhiên, điện trở này lại gây ra hiện tượng gợn sóng điện áp. Do đó, cần phát triển các phương pháp điều khiển phù hợp để xử lý vấn đề pha không cực tiểu đồng thời thích ứng với các điều kiện vận hành phức tạp trong hệ thống DC microgrid.

1.3 Mục tiêu và đóng góp của nghiên cứu

Từ các tài liệu đã được khảo cứu, có thể thấy rằng lưới điện siêu nhỏ DC đã được nghiên cứu ở nhiều cấp độ khác nhau bởi các nhà nghiên cứu. Tuy nhiên, vẫn còn một số chủ đề cần được tiếp tục nghiên cứu sâu hơn, chẳng hạn như so sánh toàn diện các phương pháp bù trạng thái ổn định, mô hình hóa động lực và phân tích các lưới điện siêu nhỏ DC theo nhiều thang thời gian. Do đó, các mục tiêu của luận văn này bao gồm:

- Nghiên cứu mô hình hóa lưới điện siêu nhỏ DC trong miền thời gian;
- Phân tích ổn định tín hiệu nhỏ của lưới điện siêu nhỏ DC;
- Cải thiện hiệu năng chia sẻ tải và điều chỉnh điện áp thanh cái trong lưới điện siêu nhỏ DC sử dụng điều khiển sụt áp (droop control)

1.4 Cấu trúc đồ án

Luận văn này được tổ chức thành bảy chương. Chương 1 trình bày tổng quan về lưới điện vi mô, so sánh giữa lưới điện siêu nhỏ AC và DC, tổng quan tài liệu nghiên cứu, cũng như động lực và mục tiêu của luận văn.

Chương 2 tập trung trình bày về cấu trúc của lưới điện siêu nhỏ DC và các phương pháp điều khiển truyền thống. Phần này bắt đầu bằng việc giải tích lưới điện siêu nhỏ DC theo góc nhìn của giải tích mạch điện. Tiếp theo, chương này rút ra các giới hạn của điều khiển sụt áp cơ bản cũng như mâu thuẫn giữa việc điều chỉnh điện áp và chia sẻ tải.

Từ các kết luận trong Chương 2, Chương 3 đề xuất mô hình điều khiển phân cấp mới, trên nền phương pháp điều khiển điện áp truyền thống, giúp khắc phục các nhược điểm đã được phân tích phía trên. Chương 4 trình bày và chứng minh tính ổn định của phương pháp điều khiển được đề xuất, khẳng định phương pháp đề xuất đảm bảo các tiêu chuẩn ổn định tĩnh và động cho lưới điện siêu nhỏ DC.

Chương 5 và 6 trình bày các kết quả mô phỏng và thực nghiệm của phương pháp điều khiển đề xuất và phương pháp điều khiển truyền thống. Từ đó so sánh và rút ra các kết luận cần thiết.

Cuối cùng, Chương 7 trình bày các kết luận của đề tài, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp tục trong tương lai.

1.5 Công bố khoa học

Nghiên cứu này đã được ghi nhận thông qua một số công bố khoa học, được liệt kê dưới đây. Ngoài ra, công trình vẫn còn tiềm năng để phát triển thêm nhiều bài báo khoa học khác trong tương lai.

[1] P. H. Lam, K. N. D. Tran, T. D. Nguyen, H. T. Phuoc, H. D. Nguyen and D. M. Pham, "Adaptive Droop Control System for Automatic Voltage Restoration in DC Microgrids," 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Ho Chi Minh, Vietnam, 2023, pp. 72-77

[2] Lam, H.P., Pham, Q.T.D., Ly, T.H., Pham, M.D. and Nguyen, D.H. (2024), Enhancing Power Sharing Strategy for Consistent Decarbonized Energy Sources in DC Residential Microgrids. IEEJ Trans Elec Electron Eng, 19: 1720-1729

[3] Lam, H. P., Nguyen, H. D., Pham, M. D. (2024). Enhancing stability and voltage quality in remote DC microgrid systems through adaptive droop control approach. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 15(3), 1456.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ DC

Chương này trình bày cơ sở lý thuyết về mạng điện, lưới điện siêu nhỏ và điều khiển lưới điện siêu nhỏ. Mục tiêu của chương là xây dựng một khung lý thuyết cho các nguyên lý được sử dụng trong phần còn lại của nghiên cứu này.

Trong mục 2.1 và 2.2, các lý thuyết và xu hướng của lưới điện siêu nhỏ DC được trình bày nhằm nhấn mạnh tầm quan trọng của việc điều khiển chúng — không chỉ ở hiện tại mà còn trong tương lai. Mục 2.3 nêu bật các chiến lược điều khiển khác nhau đang được đề cập trong các tài liệu hiện nay, đồng thời đi sâu vào một phương pháp điều khiển cụ thể mà các phần sau của nghiên cứu này sẽ tiếp tục phát triển.

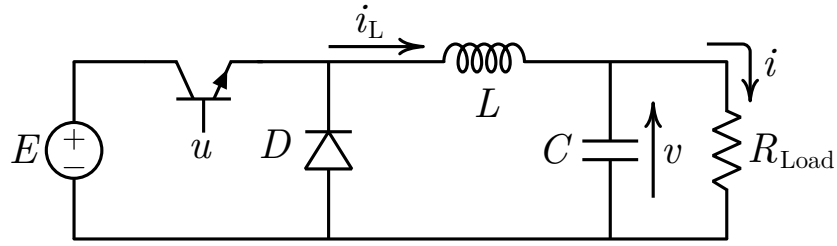
2.1 Các thành phần cấu tạo nên lưới điện siêu nhỏ DC

2.1.1 Các bộ biến đổi điện tử công suất

Như đã đề cập, thành phần trung tâm của các hệ thống vi lưới (microgrids) nói chung — bất kể là vi lưới AC, DC hay lai AC-DC — chính là bộ biến đổi công suất, thiết bị kết nối giữa các nguồn năng lượng và tải tiêu thụ. Trong tiểu mục này, các mô hình động được thiết lập cho một số loại bộ biến đổi công suất thường được sử dụng trong vi lưới DC.

Theo [40], các cấu trúc bộ biến đổi DC có thể được phân thành hai nhóm: bộ biến đổi bậc hai (ví dụ: buck, boost, buck-boost, buck-boost không nghịch đảo) và bộ biến đổi bậc bốn (ví dụ: Cuk, Sepic, Zeta, buck bậc hai/quadratic buck).

Xét theo số lượng khóa chuyển mạch, các bộ biến đổi này cũng có thể được phân loại thành hai nhóm: đơn biến (mono-variable) hay còn gọi là đầu vào đơn đầu ra đơn (SISO - *Single Input Single Output*), và đa biến (multi-variable) hay đầu vào/đầu ra đa kênh (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Ngoài ra, cũng tồn tại các bộ biến đổi có nhiều khóa chuyển mạch phụ thuộc lẫn nhau, và các bộ này cũng có thể được phân loại thành SISO hoặc MIMO.



Hình 2.1 Mạch giảm áp (DC/DC Buck Converter)

2.1.1.1 Bộ biến đổi hạ áp (Buck Converter)

Các bộ biến đổi Buck thuộc nhóm mạch cắt (chopper) hoặc mạch suy giảm (attenuation). Cụ thể, điện áp đầu ra được xác định bởi việc nhân điện áp đầu vào không đổi với một hệ số vô hướng, nhỏ hơn 1. Hình 2.1 trình bày mạch điện của bộ biến đổi Buck bao gồm một phần tử chuyển mạch nối tiếp với nguồn và được điều khiển bởi đầu vào điều khiển u , nằm trong khoảng $[0, 1]$, một đi-ốt song song D , một cuộn cảm L nối tiếp và một tụ điện đầu ra C , cung cấp cho một tải tổng quát.

Bằng cách áp dụng các định luật Kirchhoff cho mạch điện trên, ta thu được mô hình trung bình được mô tả bởi các phương trình vi phân tuyến tính sau:

$$L \frac{di_L}{dt} = -v + uE \quad (2.1)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i_L - i \quad (2.2)$$

Trong đó, i_L , E , i và v lần lượt là dòng điện ngõ vào/ra và điện áp ngõ vào/ra của bộ biến đổi.

Việc sử dụng các bộ biến đổi giảm áp đã được ưu tiên rộng rãi trong nhiều ứng dụng lưới điện siêu nhỏ lý thuyết [22, 41–45], chủ yếu do động lực tuyến tính của chúng yêu cầu cấu trúc điều khiển đơn giản hơn. Kiến trúc một lưới điện DC được nghiên cứu trong [41], bao gồm một bộ biến đổi giảm áp cấp nguồn cho tải công suất hằng số (CPL), trong đó một bộ điều khiển hồi tiếp kết hợp với chiến lược điều khiển tiên đoán được đề xuất. Trong [43], các tác giả cố gắng giải quyết vấn đề mất ổn định của các bộ biến đổi giảm áp với CPL trong lưới điện DC bằng cách sử dụng một bộ điều khiển phi tuyến vững chắc. Một bộ điều khiển dự đoán mô hình (MPC) không sai lệch cho bộ biến đổi giảm áp với CPL nhằm đảm bảo hiệu năng mong muốn và đảm bảo ổn định được đề

xuất trong [44]. Các tác giả trong [45] đánh giá hiệu suất chuyển đổi năng lượng của bộ biến đổi giảm áp ba mức khi hoạt động trong lưới điện DC hai cực không cân bằng.

Việc sử dụng các bộ biến đổi giảm áp đã được mở rộng trong nhiều ứng dụng của lưới điện siêu nhỏ DC, ví dụ như trên tàu thủy [46], các trang trại điện gió [47], trang trại điện mặt trời [48], hệ thống lưu trữ năng lượng [49] và các ứng dụng lưới điện siêu nhỏ DC điện áp thấp (LVDC MG) [50].

Tuy nhiên, việc giả định rằng lưới điện siêu nhỏ DC chỉ bao gồm các bộ biến đổi Buck kết nối trực tiếp với nguồn năng lượng là điều không thực tế, bởi vì năng lượng được tạo ra từ nguồn thường có điện áp thấp và dòng điện cao, do đó thông thường cần được giao tiếp với phần còn lại của mạng thông qua một bộ biến đổi Boost.

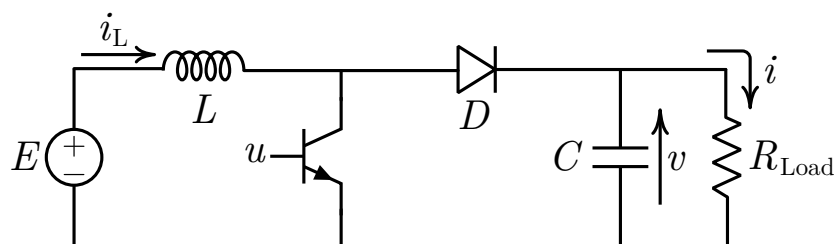
2.1.1.2 Bộ biến đổi tăng áp (Boost Converter)

Vì điện áp đầu ra của hầu hết các nguồn năng lượng phân tán như pin nhiên liệu và pin mặt trời (PV) thường khá thấp và hoạt động ở dòng điện cao, nên trong các ứng dụng thực tế, việc sử dụng bộ biến đổi tăng áp (*step-up converter*) là cần thiết [51–55].

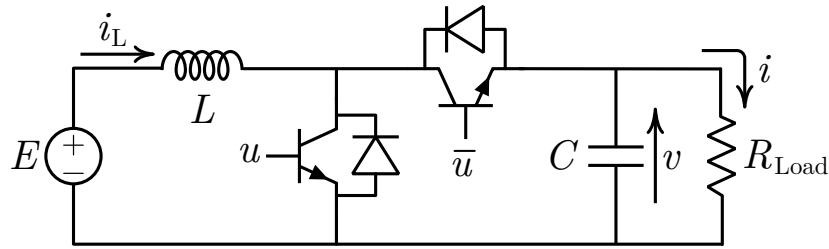
Thường được gọi là bộ biến đổi tăng áp trong các tài liệu chuyên ngành, cấu trúc mạch bộ biến đổi Boost được mô tả trong Hình 2.2. Cấu trúc của nó bao gồm một cuộn cảm đầu vào L , kèm theo một phần tử chuyển mạch mắc song song được điều khiển bởi tín hiệu đầu vào u , một diode mắc nối tiếp D , và một tụ điện đầu ra C , cung cấp điện cho một tải bất kỳ.

Áp dụng các định luật Kirchhoff, động lực học của bộ biến đổi Boost được mô tả bởi hệ phương trình vi phân sau:

$$L \frac{di_L}{dt} = -(1 - u)v + E \quad (2.3)$$



Hình 2.2 Mạch tăng áp (DC/DC Boost Converter)



Hình 2.3 Mạch tăng áp hai chiều (Bidirectional DC/DC Boost Converter)

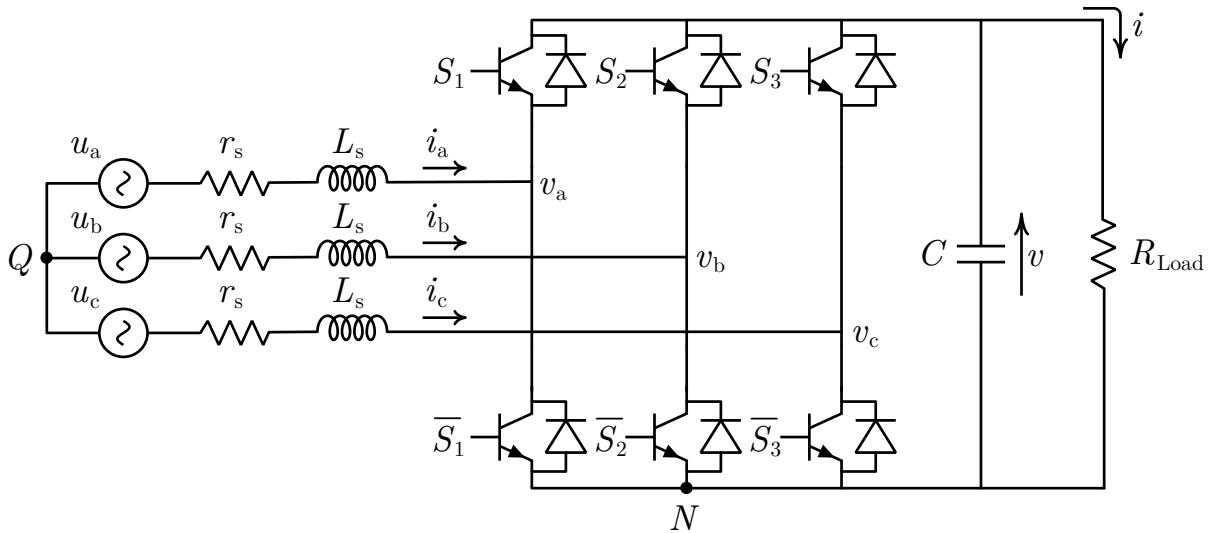
$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u)i_L - i \quad (2.4)$$

Trong đó, i_L , E , i và v lần lượt là dòng điện ngõ vào/ra và điện áp ngõ vào/ra của bộ biến đổi.

Nhận xét 1: Với động lực học tương tự, ta có thể xây dựng bộ biến đổi boost hai chiều (Bidirectional Boost Converter) — hoạt động như một bộ tăng áp theo chiều thuận và hạ áp theo chiều ngược lại. Sự khác biệt duy nhất nằm ở chỗ diode D được thay thế bằng một phần tử chuyển mạch khác nhằm cho phép dòng công suất hai chiều. Mạch điện tử của bộ biến đổi boost hai chiều được minh họa trong Hình 2.3.

Trong [53], một bộ biến đổi boost liên tầng (*interleaved boost converter*) với mạch nâng áp phụ kiểu Cuk có ghép từ được đề xuất nhằm đạt được hệ số nâng áp cần thiết bằng cách sạc một mạch nhân áp (*voltage-doubler*) ở đầu ra. Một giải pháp tương tự được trình bày trong [54], trong đó một bộ biến đổi boost tích hợp sepic được giới thiệu, cung cấp khả năng nâng áp bổ sung thông qua một mạch nâng áp phụ kiểu sepic có cách ly. Tuy nhiên, các cấu trúc mạch của những bộ biến đổi nâng áp cao tích hợp Cuk/sepic này tương đối phức tạp và tốn kém, do đó có thể khó sản xuất hàng loạt. Hơn nữa, trong thực tế, điện áp đầu ra tối đa và hiệu suất công suất có thể bị ảnh hưởng bởi các hiện tượng ký sinh, chẳng hạn như điện trở dây quấn của cuộn cảm trong các mạch tích hợp Cuk/sepic.

Các bộ biến đổi boost đã được ứng dụng thành công trong các hệ thống điện mặt trời (PV) [61], pin nhiên liệu [62], pin sạc [63, 64] hoặc điện khí hóa nông thôn [65]. Tuy nhiên, do đặc tính phi tuyến của chúng, động học (*dynamic*) của bộ biến đổi Boost thường bị bỏ qua trong phân tích lý thuyết hệ thống. Hầu hết các phương pháp tiếp cận sử dụng các mô hình đơn giản hóa hoặc mô hình bậc thấp, như trong [66, 67]; một số khác thì hoàn toàn bỏ qua động học của các bộ biến đổi và chỉ tập trung vào khung điều



Hình 2.4 Bộ chỉnh lưu AC/DC ba pha

khuyến và/hoặc tải được cấp nguồn [24, 68].

2.1.1.3 Bộ chỉnh lưu ba pha

Tùy thuộc vào ứng dụng, như đã đề cập trước đó, các kỹ thuật điều khiển PWM đã được ưu tiên sử dụng để điều khiển các bộ chỉnh lưu ba pha nhằm tạo dạng sóng điện áp và/hoặc dòng điện đầu ra [69].

Sơ đồ của bộ chỉnh lưu AC/DC ba pha bao gồm ba nhánh với các transistor, như có thể thấy trong Hình 2.4, và còn được gọi là bộ chỉnh lưu boost hai chiều (bidirectional boost rectifier), hoạt động với cực tính điện áp DC cố định.

Áp dụng các định luật Kirchhoff, động lực học của bộ chỉnh lưu AC/DC ba pha được mô tả bởi hệ phương trình vi phân sau:

$$L_s \frac{di_a}{dt} = -r_s i_a - (v * S_1 + V_{NQ}) + u_a \quad (2.5)$$

$$L_s \frac{di_b}{dt} = -r_s i_b - (v * S_2 + V_{NQ}) + u_b \quad (2.6)$$

$$L_s \frac{di_c}{dt} = -r_s i_c - (v * S_3 + V_{NQ}) + u_c \quad (2.7)$$

$$C \frac{dv}{dt} = (i_a * S_1) + (i_b * S_2) + (i_c * S_3) - i \quad (2.8)$$

Các cuộn cảm L_s được lựa chọn dựa trên tiêu chí thiết kế nhằm bù hài. Các điện trở r_s đại diện cho điện trở ký sinh của cuộn cảm. Tụ điện C được sử dụng để đảm bảo dạng sóng

điện áp được làm mượt. Các dòng điện i_a, i_b, i_c là dòng điện ba pha, trong khi u_a, u_b, u_c là các điện áp hình sin ba pha. Biến v là điện áp trên tụ điện, và V_{QN} là điện áp giữa hai điểm Q và N . Các tín hiệu điều khiển S_j , với $j \in \{1, 2, 3\}$, được dùng để kích hoạt các khóa chuyển mạch, nhận giá trị trong khoảng đóng $[0, 1]$.

Theo như nghiên cứu [70], bằng cách sử dụng biến đổi Clarke và Park [71], mô hình toán học trong hệ tọa độ dq quay đồng bộ được thiết lập như sau:

$$L \frac{dI_d}{dt} = -r_s I_d - \omega L_s I_q - m_d \frac{v}{2} + U_d \quad (2.9)$$

$$L \frac{dI_q}{dt} = -r_s I_q + \omega L_s I_d - m_q \frac{v}{2} + U_q \quad (2.10)$$

$$C \frac{dv}{dt} = \frac{3}{4} m_d I_d + \frac{3}{4} m_q I_q - i \quad (2.11)$$

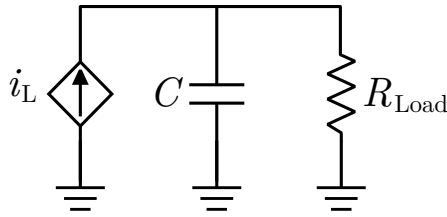
Trong đó, U_d, U_q và I_d, I_q lần lượt là điện áp và dòng điện ngõ vào trong hệ quy chiếu dq . Đồng thời

$$m_d = \frac{2v_d}{v}; \quad m_q = \frac{2v_q}{v} \quad (2.12)$$

đại diện cho các đầu vào điều khiển theo tỷ lệ chu kỳ (duty-ratio). Các điện áp v_d và v_q là các thành phần d và q của điện áp chỉnh lưu $[u_a \ u_b \ u_c]^T$.

Một bộ biến đổi AC/DC ba pha cách ly hai chiều sử dụng thuật toán điều chế vector không gian (SVPWM) cải tiến, giúp thực hiện chuyển đổi hai chiều AC/DC, tạo dòng xoay chiều hình sin và cách ly điện ở tần số cao đã được đề xuất trong [72]. Đối với một cấu hình được điều chỉnh nhẹ, bao gồm bộ biến đổi AC/DC ba pha có máy biến áp nối $Y - \Delta$, một phương pháp điều khiển khác — nhưng vẫn đạt được kết quả cải thiện tương tự — được trình bày trong [73]. Nhiều ứng dụng lưới điện siêu nhỏ DC tích hợp các bộ chỉnh lưu ba pha trong cấu trúc của chúng. Ví dụ, một hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) được trình bày trong [74], nơi một cầu chỉnh lưu diode ba pha kết hợp với bộ biến đổi DC/DC được kết nối tại đầu ra của máy phát không đồng bộ (induction generator) chạy bằng gió và lưới DC. Các lưới điện nhỏ (microgrid) sử dụng các bộ biến đổi AC/DC (hoặc DC/AC) ba pha cũng đã được nghiên cứu trong các tài liệu [75–79].

Trong [80, 81], lưới điện siêu nhỏ DC tích hợp cả bộ chỉnh lưu ba pha hai chiều



Hình 2.5 Mạng điện một chiều đơn giản hóa với tải tổng quát

và các bộ biến đổi tăng áp Boost. Tuy nhiên, tương tự như các bộ biến đổi DC/DC tăng áp, mô hình động học phi tuyến của các bộ biến đổi ba pha trong lưới điện DC với điều khiển phi tuyến và tải phi tuyến, sau khi thực hiện biến đổi trong hệ tọa độ dq , thường bị bỏ qua trong phân tích ổn định lý thuyết, trong khi sự chú trọng được đặt vào chiến lược điều khiển.

2.1.2 Tải DC

Trong các lưới điện DC, có nhiều loại tải khác nhau mà người ta có thể gặp. Gần đây, các tải theo mô hình ZIP trong các lưới điện siêu nhỏ DC ngày càng trở nên phổ biến hơn [82-88]

2.1.2.1 Tải trở kháng không đổi (CIL)

2.1.2.2 Tải dòng điện không đổi (CCL)

2.1.2.3 Tải công suất không đổi (CPL)

2.2 Các cấu hình lưới điện siêu nhỏ DC

Nhiều cấu trúc phần cứng của lưới điện vi mô DC đã được báo cáo, tùy thuộc vào từng ứng dụng cụ thể. Các tiêu chí cơ bản bao gồm tính linh hoạt trong điều khiển, độ bền vững và độ tin cậy. Các cấu trúc cơ bản của lưới điện vi mô DC có thể được phân loại thành ba nhóm chính [14]:

2.2.1 Cấu hình thanh cái đơn

Cấu trúc thanh cái đơn (single bus topology), được sử dụng phổ biến trong các lưới điện vi mô DC, đã được minh họa trong Hình 2.6 và tỏ ra hiệu quả trong các ứng dụng công nghiệp. Thanh cái DC trong cấu hình này bao gồm hai cực dương và âm. Một yếu tố quan trọng trong cấu trúc này là việc lựa chọn mức điện áp thanh cái DC, vì năng

lượng được truyền dẫn qua một mức điện áp duy nhất [38].

Khả năng truyền tải công suất được tăng cường nhờ mức điện áp cao hơn, tuy nhiên điều này cũng kéo theo việc tăng số lượng bộ chuyển đổi DC-DC trung gian nhằm đáp ứng yêu cầu về mức điện áp của thiết bị tiêu thụ [38]. Mức điện áp thấp sẽ giới hạn khả năng truyền tải công suất trong phạm vi khoảng cách ngắn. Tuy nhiên, cấu trúc này có thể rất hiệu quả ở các khu vực nông thôn xa xôi, nơi lưới điện quốc gia không khả thi. Một hệ thống thanh cái đơn 48V đã được triển khai cho các ngôi nhà ngoài lưới điện ở vùng nông thôn Ấn Độ [56].

Cấu trúc điện áp thấp đã được đề cập rộng rãi trong nhiều tài liệu nghiên cứu [57,63] và có ưu điểm về tính đơn giản cũng như việc không phát sinh sự bất đối xứng giữa hai cực DC [38]. Tuy nhiên, một trong những nhược điểm của cấu trúc này là yêu cầu độ chính xác cao trong thiết kế mạch và các thông số điều khiển [37]. Ngoài ra, người sử dụng cũng không có tính dự phòng về mức điện áp cung cấp, vì họ chỉ được cấp điện thông qua một thanh cái duy nhất ở một mức điện áp cố định.

2.2.2 Cấu hình nhiều thành cái

2.2.3 Các cấu hình khác

2.3 Các phương pháp điều khiển lưới điện siêu nhỏ DC

2.3.1 Phương pháp điều khiển tập trung

2.3.2 Phương pháp điều khiển phân phối

2.3.3 Phương pháp điều khiển phân phối

2.4 Sơ kết

CHƯƠNG 3: PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT CHO LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ DC

CHƯƠNG 4: PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

CHƯƠNG 5: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

5.1 Mô phỏng lưới điện siêu nhỏ DC cấu hình thanh cái đơn

5.1.1 Thiết lập môi trường mô phỏng

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

5.1.2 Phương pháp điều khiển Droop dòng - áp (V-I Droop Control)

5.1.2.1 Mô phỏng với 2 bộ giảm áp

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1.2.2 Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend

at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

5.1.3 Phương pháp điều khiển Droop áp - dòng (I-V Droop control)

5.1.3.1 Mô phỏng với 2 bộ giảm áp

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

5.1.3.2 Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

5.1.4 Phương pháp điều khiển đề xuất

5.1.4.1 Mô phỏng với 2 bộ giảm áp

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non,

nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

5.1.4.2 Mô phỏng với 1 bộ giảm áp và 1 bộ tăng áp hai chiều

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

5.1.5 So sánh phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp đề xuất

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

5.2 Cấu hình thanh cái đơn với 4 bộ giảm áp - phương pháp đề xuất

5.2.1 Thiết lập môi trường mô phỏng

5.2.2 Chế độ làm việc bình thường

5.2.3 Chế độ làm việc sự cố

5.2.3.1 Mất một bộ giảm áp

5.2.3.2 Mất hai bộ giảm áp

5.2.3.3 Mất thông tin liên lạc

5.2.3.4 Kết nối thêm một bộ giảm áp

5.3 Mô phỏng lưới điện siêu nhỏ DC cấu hình thanh dạng vòng

kjahfkjabkjfbkjadifoianfsnz

CHƯƠNG 6: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

CHƯƠNG 7: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

PHỤ LỤC A: THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN GIẢM ÁP

PHỤ LỤC B: THIẾT KẾ VÀ MÔ HÌNH HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN GIẢM ÁP

PHỤ LỤC C: BẢN VẼ SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ PHẦN CỨNG.

**PHỤ LỤC D: CÁC BÀI BÁO ĐƯỢC XUẤT BẢN THEO
NGHIÊN CỨU NÀY.**

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] REN21, *Renewables 2024 global status report - global overview*, 2021.
- [2] G. B. Gharehpetian, H. R. Baghaee, and M. M. Shabestary, *Microgrids and methods of analysis*. Academic Press, 2021.
- [3] A. Tomar, P. Gaur, R. Kandari, and N. Gupta, *Control of standalone microgrid*. Academic Press, 2021.
- [4] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcerá, and R. González-Medina, “Microgrid architectures for low voltage distributed generation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 415–424, 2015, ISSN: 1364-0321.
- [5] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, “Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 24, pp. 387–405, 2013.
- [6] H. Lotfi and A. Khodaei, “Ac versus dc microgrid planning,” *IEEE transactions on smart grid*, vol. 8, no. 1, pp. 296–304, 2015.
- [7] C. Marnay et al., “Microgrid evolution roadmap,” in *2015 international symposium on smart electric distribution systems and technologies (EDST)*, IEEE, 2015, pp. 139–144.
- [8] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng, and S. J. Dale, “The future renewable electric energy delivery and management (freedm) system: The energy internet,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 133–148, 2010.
- [9] A. Huang, “Freedm system-a vision for the future grid,” in *IEEE PES General Meeting*, IEEE, 2010, pp. 1–4.
- [10] G. T. Heydt, “Future renewable electrical energy delivery and management systems: Energy reliability assessment of freedm systems,” in *IEEE PES General Meeting*, IEEE, 2010, pp. 1–4.
- [11] F. Zhang et al., “Advantages and challenges of dc microgrid for commercial building a case study from xiamen university dc microgrid,” in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, IEEE, 2015, pp. 355–358.

- [12] E. R. Diaz, X. Su, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, M. Han, and J. M. Guerrero, “Intelligent dc microgrid living laboratories-a chinese-danish cooperation project,” in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, IEEE, 2015, pp. 365–370.
- [13] J. Cho, H. Kim, Y. Cho, H. Kim, and J. Kim, “Demonstration of a dc microgrid with central operation strategies on an island,” in *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [14] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Dc microgrids—part ii: A review of power architectures, applications, and standardization issues,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3528–3549, 2015.