

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC



TRẦN HỮU TIỀN

**NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG MỘT SỐ GIẢI
PHÁP GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT CHO
LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP THÀNH PHỐ ĐIỆN
BIÊN PHỦ**

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN

HÀ NỘI, 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC



TRẦN HỮU TIẾN

**NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG MỘT SỐ GIẢI
PHÁP GIẢM TỒN THẤT CÔNG SUẤT CHO
LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP THÀNH PHỐ ĐIỆN
BIÊN PHỦ**

Chuyên Ngành : Kỹ Thuật Điện
Mã số : 8520201

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Trần Thanh Sơn

HÀ NỘI, 2026

LỜI CẢM ƠN

Trước hết tôi xin chân thành gửi lời cảm ơn đến Ban giám hiệu nhà trường, Khoa Kỹ thuật điện và phòng Quản lý đào tạo Đại học Điện lực đã tận tình giúp đỡ, hướng dẫn tạo điều kiện thuận lợi trong quá trình học tập để tôi hoàn thành tốt khóa học.

Đặc biệt, Tôi xin bày tỏ lòng kính trọng, biết ơn sâu sắc đến PGS.TS. Trần Thanh Sơn đã dành nhiều thời gian và tâm huyết, tận tình hướng dẫn và giúp đỡ tôi trong suốt thời gian nghiên cứu và thực hiện luận văn này.

Đồng thời, tôi xin chân thành cảm ơn các cơ quan đoàn thể Sở Công Thương tỉnh Điện Biên, Công ty Điện lực Điện Biên, Đội quản lý điện lực khu vực Điện Biên Phủ đã giúp đỡ, tạo điều kiện thuận lợi để thu thập những thông tin, tài liệu trong suốt thời gian nghiên cứu cũng như thời gian làm luận văn tốt nghiệp.

Trân trọng cảm ơn!

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

TÁC GIẢ LUẬN VĂN

Trần Hữu Tiến

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận văn thạc sĩ này là công trình nghiên cứu khoa học độc lập của tôi. Các số liệu khoa học, kết quả nghiên cứu của Luận văn là trung thực và có nguồn gốc rõ ràng.

Tôi xin cam đoan về các số liệu và kết quả tính toán được trình bày trong luận văn là hoàn toàn do tôi tự tìm hiểu và thực hiện trong quá trình nghiên cứu và thực hiện luận văn của mình.

Tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm về lời cam đoan trên.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

TÁC GIẢ LUẬN VĂN

Trần Hữu Tiến

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Thống kê thực trạng nhà máy thủy điện đang vận hành tỉnh Điện Biên	6
Bảng 1.2: Thống kê thực trạng công trình trạm điện 110kV đang vận hành tỉnh Điện Biên năm 2025	7
Bảng 1.3: Khối lượng đường dây trung, hạ áp tỉnh Điện Biên tính hết 2025 ..	11
Bảng 1.4: Bảng thống kê tổn thất điện năng năm 2025 trên lưới điện Điện lực Thành phố Điện Biên	12
Bảng 3.1: Công suất của các phụ tải trên xuất tuyến 472 E21.2	22
Bảng 3.2: Thông số của các đường dây trên xuất tuyến 472 E21.2.....	24
Bảng 3.3: Thống kê tổn thất công suất tác dụng khi chưa bù và khi có bù ở các chế độ phụ tải cực đại, trung bình và cực tiểu	33

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Sơ đồ vị trí và mối liên hệ vùng	5
Hình 1.2: Bản đồ thực trạng lưới điện 110kV-220kV trên địa bàn tỉnh Điện Biên.....	10
Hình 3.1: Dung lượng bù tối ưu tại các nút phụ tải ở chế độ phụ tải cực đại...	29
Hình 3.2: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải cực đại.....	30
Hình 3.3: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải trung bình.....	31
Hình 3.4: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải cực tiểu	31
Hình 3.5: Tổng tổn thất công suất tác dụng khi chưa bù và khi có bù ở các chế độ phụ tải cực đại, trung bình và cực tiểu.....	32

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Ý nghĩa
TBA	Trạm biến áp
MBA	Máy biến áp
CSTD	Công suất tác dụng
CSPK	Công suất phản kháng
PCĐB	Công ty Điện lực Điện Biên
TP	Thành phố

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	I
LỜI CAM ĐOAN.....	II
DANH MỤC BẢNG BIỂU	III
DANH MỤC HÌNH VẼ	IV
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	V
I. MỞ ĐẦU.....	1
II. NỘI DUNG.....	3
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TỔN THẤT CÔNG SUẤT TRONG LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP TP ĐIỆN BIÊN PHỦ	4
1.1. Đặc điểm lưới điện tỉnh Điện Biên	4
1.1.1. Tổng quan về lưới điện tỉnh Điện Biên	4
1.1.2. Lưới điện trung, hạ áp.....	10
1.2. Lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ	11
1.2.1. Tổng quan lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ.....	11
1.2.2. Tổn thất điện năng trên lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ	12
1.3. Kết luận	13
CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT	14
2.1. Cơ sở lý thuyết	14
2.1.1. Ý nghĩa của việc xác định tổn thất công suất	14
2.2. Các phương pháp giảm tổn thất công suất	14
2.2.1. Tăng tiết diện dây dẫn	14
2.2.2. Nâng cao điện áp vận hành	15
2.2.3. Lọc sóng hài	16
2.2.4. Phương pháp san bằng đồ thị phụ tải	16
2.2.5. Biện pháp bù công suất phản kháng.....	17
2.2.6. Tái cấu trúc lưới	20
2.3. Kết luận chương 2.....	20
CHƯƠNG 3: ÁP DỤNG BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG ĐỂ GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT CHO XUẤT TUYẾN 472 E21.2 THÀNH PHỐ ĐIỆN BIÊN PHỦ	21
3.1. Giới thiệu về xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ.....	21

3.2. Giới thiệu phương pháp tính toán bù tối ưu cho xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ	26
3.3. Tính toán bù tối ưu cho xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ	29
3.4. Kết luận	34
III. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	35
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	36
PHỤ LỤC 1:.....	37
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC ĐẠI KHI CHƯA CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG.....	37
PHỤ LỤC 2:.....	39
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI TRUNG BÌNH KHI CHƯA CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG.....	39
PHỤ LỤC 3:.....	41
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC TIỂU KHI CHƯA CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG.....	41
PHỤ LỤC 4:.....	43
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC ĐẠI KHI CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG.....	43
PHỤ LỤC 5:.....	45
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI TRUNG BÌNH KHI CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG	45
PHỤ LỤC 6:.....	47
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC TIỂU KHI CÓ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG	47

I. MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Việc nghiên cứu, áp dụng các giải pháp để giảm tỷ lệ tổn thất điện năng xuống mức hợp lý đã và đang là mục tiêu của ngành Điện trên toàn thế giới, đặc biệt trong bối cảnh hệ thống đang mất cân đối về lượng cung cầu điện năng như nước ta hiện nay. Tỷ lệ tổn thất điện năng phụ thuộc vào đặc tính của lưới điện, phụ tải, khả năng cung cấp của hệ thống và công tác quản lý vận hành hệ thống điện. Việc phân tích đánh giá tình hình tổn thất và các giải pháp khắc phục đã và đang là vấn đề cấp bách và lâu dài đối với hệ thống điện trong Tổng công ty Điện lực miền Bắc (EVNNPC).

Vận hành trong hệ thống điện tại tỉnh Điện Biên từ trước đến nay chủ yếu vẫn dựa vào kinh nghiệm vận hành thực tế là chính nên chưa có được phương thức kết dây hợp lý, dẫn đến hiệu quả kinh tế trong vận hành thấp và chất lượng điện năng chưa cao. Bên cạnh đó việc lắp đặt các cụm tụ bù hiện có chưa mang lại hiệu quả nhất định.

Trong phạm vi đề tài tác giả đề cập đến: “Nghiên cứu đề xuất giải pháp giảm tổn thất công suất lưới điện trung áp thành phố Điện Biên Phủ” bởi vì sản lượng điện năng thương phẩm của Đội quản lý điện lực khu vực Điện Biên Phủ (Trước đây là Điện lực Thành phố Điện Biên Phủ) chiếm phần lớn nhất trong sản lượng điện năng của cả tỉnh Điện Biên, do đó khi giảm được tổn thất công suất trên lưới điện khu vực Thành phố Điện Biên Phủ (tên gọi trước đây) thì điện năng của toàn tỉnh sẽ giảm xuống đáng kể.

2. Mục đích nghiên cứu

- Khảo sát quá trình phát triển và tình trạng cung cấp điện hiện tại của lưới điện trung áp Điện lực TP Điện Biên Phủ.
- Tính toán và phân tích lưới điện trung áp hiện tại ở Điện lực TP Điện Biên Phủ.
- Đề xuất một số giải pháp để giảm tổn thất công suất trên lưới điện trung áp Điện lực TP Điện Biên Phủ.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu

- Thu thập số liệu lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ.
- Phân tích và tổng hợp một số giải pháp giảm tổn thất công suất trên lưới điện trung áp.
- Áp dụng tính toán giảm tổn thất cho lưới điện trung áp thành phố Điện Biên Phủ.

- Viết báo cáo.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu:

- Đối tượng nghiên cứu: Lưới điện trung áp thành phố Điện Biên Phủ.
- Phạm vi nghiên cứu: Các phương pháp giảm tổn thất công suất trên lưới điện.
- Thời gian nghiên cứu: Trong năm 2024-2025.

5. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp thu thập số liệu;
- Phương pháp phân tích tổng hợp;
- Phương pháp chuyên gia;
- Phương pháp mô phỏng.

II. NỘI DUNG

Luận văn bao gồm: Phần mở đầu, 3 chương chính, kết luận, danh mục các tài liệu tham khảo, các phụ lục. Nội dung chính có 3 chương như sau:

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TỶ LỆ TỶ LỆ CÔNG SUẤT TRONG LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP TP ĐIỆN BIÊN PHỦ

CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP GIẢM TỶ LỆ TỶ LỆ CÔNG SUẤT

CHƯƠNG 3: ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP BÙ CÔNG SUẤT ĐỂ GIẢM GIẢM TỶ LỆ TỶ LỆ CÔNG SUẤT CHO XUẤT TUYẾN 472 E21.2 THÀNH PHỐ ĐIỆN BIÊN PHỦ

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TỒN THẤT CÔNG SUẤT TRONG LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP TP ĐIỆN BIÊN PHỦ

Chương này giới thiệu tổng quan về lưới điện của tỉnh Điện Biên nói chung và phân tích lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ.

1.1. Đặc điểm lưới điện tỉnh Điện Biên

1.1.1. Tổng quan về lưới điện tỉnh Điện Biên

a. Vị trí địa lý

a.1. Tỉnh Điện Biên

Tỉnh Điện Biên nằm trong vùng vùng Tây Bắc đặt trong mối liên kết của Quốc gia, khu vực tam giác tăng trưởng Việt Nam – Lào – Trung Quốc. Có tọa độ địa lý từ 20°54' – 22°33' vĩ độ Bắc và 102°10' – 103°36' kinh độ Đông.

Về địa giới hành chính của tỉnh Điện Biên:

- Phía Bắc giáp tỉnh Lai Châu.
- Phía Tây - Tây Nam giáp tỉnh Phong Xa Ly, Luông Prabăng nước Cộng hòa dân chủ nhân dân Lào.
- Phía Đông - Đông Bắc giáp tỉnh Sơn La.
- Phía Tây Bắc giáp tỉnh Vân Nam nước Cộng hòa nhân dân Trung Hoa.

Tỉnh Điện Biên có tổng diện tích tự nhiên là 9.541,25 km², dân số 613.480 người, trước đây tỉnh gồm 10 đơn vị hành chính cấp huyện là: Thành phố Điện Biên Phủ, Thị xã Mường Lay và các huyện: Mường Nhé, Mường Chà, Tủa Chùa, Tuần Giáo, Điện Biên, Điện Biên Đông, Mường Ảng và Nậm Pồ.

Sau khi hình thành chính quyền địa phương 2 cấp theo Nghị quyết số 1661/NQ-UBTVQH15 ngày 16/6/2025, tỉnh Điện Biên có 45 đơn vị hành chính cấp xã, gồm 42 xã và 3 phường: Mường Nhé, Sín Thầu, Mường Toong, Nậm Kè, Quảng Lâm, Nà Hỳ, Mường Chà, Nà Búng, Chà Tở, Si Pa Phìn, Na Sang, Mường Tùng, Pa Ham, Nậm Nền, Mường Pồn, Tủa Chùa, Sín Chải, Sính Phình, Tủa Thàng, Sáng Nhè, Tuần Giáo, Quài Tở, Mường Mùn, Pú Nhung, Chiềng Sinh, Mường Ảng, Nà Tấu, Búng Lao, Mường Lạn, Mường Phăng, Thanh Nưa, Thanh An, Thanh Yên, Sam Mứn, Núa Ngam, Mường Nhà, Na Son, Xa Dung, Pu Nhi, Mường Luân, Tà Dinh, Phình Giàng, Phường Mường Lay, Phường Điện Biên Phủ, Phường Mường Thanh.

a.2. Thành phố Điện Biên Phủ

Thành phố Điện Biên Phủ (trước đây) là thủ phủ, trung tâm kinh tế - chính trị của tỉnh Điện Biên. Trước đây Thành phố Điện Biên Phủ có diện tích khoảng 306 km², dân số khoảng 88.000 người (Niên giám thống kê tỉnh Điện Biên năm

A map of North Vietnam illustrating the strategic locations of various military units relative to Dien Bien Phu. Concentric dashed circles represent distances of 60km, 100km, 250km, and 500km from Dien Bien Phu. Units are marked with colored dots: green for regular divisions, yellow for independent regiments, red for independent battalions, and orange for independent companies. Key locations include Hanoi, Haiphong, Vinh, Thanh Hoa, and various provincial capitals like Lai Chau, Tuyen Quang, and Lang Son. The map also shows neighboring countries: China to the north and east, Laos to the west, and Cambodia to the south.

b. Nguồn điện

Điện Biên có lợi thế địa hình và có rất nhiều tiềm năng phát triển thủy điện, đặc biệt thủy điện vừa và nhỏ, do có địa hình nhiều đồi núi dốc và có 03 con sông lớn Sông Đà, sông Mã và Sông Mê Kông gồm các nhánh chính là sông Nậm Rốm, Nậm Núa. Do vậy, Điện Biên có rất nhiều tiềm năng phát triển thủy điện, đặc biệt thủy điện vừa và nhỏ. Hiện nay, trên địa bàn tỉnh có khoảng 18 nhà máy thủy điện đang vận hành khai thác, với tổng công suất là 276MW. 10 nhà máy (NM) thủy điện hòa ở cấp 110kV với tổng công suất phát 233 MW; 08 NM thủy điện nhỏ có công suất trên 1MW hòa ở cấp 35kV tổng công suất phát 43MW. Điện năng lượng mặt trời: 476 KH công suất lắp 28,916MW.

Bảng 1.1: Thống kê thực trạng nhà máy thủy điện đang vận hành tỉnh Điện Biên

STT	Tên dự án	Địa điểm (huyện/tên gọi trước đây)	Công suất (MW)	Ghi chú
1	Nậm He	Mường Chà	16	Phát lưới 110kV
2	Thác Bay	TP. Điện Biên Phủ	2,4	Phát lưới 35kV
3	Nà Loi	TP. Điện Biên Phủ	9,3	Phát lưới 35kV
4	Thác Trắng	TP. Điện Biên Phủ	6	Phát lưới 35kV
5	Pa Khoang	TP. Điện Biên Phủ	2,4	Phát lưới 35kV
6	Nậm Múc	Huyện Tuần Giáo, Huyện Mường Chà	44	Phát lưới 110kV
7	Trung Thu	Huyện Tủa Chùa, Huyện Mường Chà	30	Phát lưới 110kV
8	Nậm Núa	Điện Biên	10,8	Phát lưới 110kV
9	Nậm Mu 2	Tuần Giáo	10,2	Phát lưới 110kV
10	Nậm Khẩu Hu	Điện Biên	3	Phát lưới 35kV
11	Na Son	Điện Biên Đông	3,2	Phát lưới 35kV
12	Long Tạo	huyện Tuần Giáo và huyện Mường Chà	44	Phát lưới 110kV
13	Nậm Pay	Tuần Giáo	7,5	Phát lưới 35kV
14	Huổi Vang	Mường Chà	11	Phát lưới 110kV
15	Mùn Chung 2	Tuần Giáo	9	Phát lưới 35kV
16	Sông Mã 3	Điện Biên Đông	29,5	Phát lưới 110kV
17	Mường Luân 1	Điện Biên Đông	10	Phát lưới 110kV
18	Huổi Chan 1	H. Mường Chà, H. Điện Biên	15	Phát lưới 110kV
	Tổng		263,3	

(Nguồn: Số liệu Sở Công Thương tỉnh Điện Biên 2025)

c. Trạm biến áp và lưới điện cao áp

Hiện nay trên địa bàn tỉnh Điện Biên đang vận hành với 05 trạm biến áp 110kV kết nối vào hệ thống lưới điện Quốc gia, cụ thể như sau:

- Trạm 110kV Tuần Giáo đặt tại thị trấn Tuần Giáo, huyện Tuần Giáo (nay là xã Tuần Giáo) có công suất 2x16MVA – 110/35/22kV. Trạm là nút giao của đường dây liên kết giữa 3 tỉnh Điện Biên, Lai Châu và Sơn La, được đầu nối vào các tuyến đường dây 110kV mạch kép Sơn La – Thuận Châu – Tuần Giáo, Lai Châu – Tuần Giáo và đường dây mạch đơn Điện Biên – Tuần Giáo. Trạm có nhiệm vụ cấp điện cho các huyện Tuần Giáo, Tủa Chùa và một số xã của hai huyện Mường Ảng và Mường Chà.

- Trạm 110kV Điện Biên đặt tại thành phố Điện Biên Phủ (nay là phường Điện Biên Phủ), có công suất (25+63)MVA – 110/35/22kV. Phía 110kV được đầu nối vào đường dây mạch đơn 110KV Điện Biên – Tuần Giáo là dây AC185, chiều dài khoảng 59,9km. Trạm có nhiệm vụ cấp điện cho thành phố Điện Biên Phủ, các Huyện Điện Biên, Điện Biên Đông, Mường Chà, Nậm Pồ, Mường Nhé, Mường Ảng, thị xã Mường Lay (tên gọi trước đây). Trạm được nhận điện từ các nhà máy thủy điện Nà Loi, Thác Bay, Thác Trắng và Pa Khoang.

- Trạm 110kV Điện Biên 2 đặt tại xã Sam Mứn, huyện Điện Biên; hiện đã thi công xong giai đoạn 1 lắp đặt máy biến áp T1 công suất 1x25MVA – 110/35/22kV. Trạm được cấp điện bằng đường dây nhánh rẽ tuyến mạch đơn 110kV Xi măng Điện Biên – 110kV Điện Biên. Trạm được đóng điện, vận hành máy biến áp T1 vào tháng 09 năm 2021 nhằm đảm bảo cung cấp điện cho khu vực Huyện Điện Biên và Huyện Điện Biên Đông.

- Trạm 110kV Mường Chà đặt tại xã Sa Lông, huyện Mường Chà; hiện đã thi công xong giai đoạn 1 lắp đặt máy biến áp T1 công suất 1x25MVA. Trạm được cấp điện bằng đường dây mạch kép 110KV Mường Lay - Điện Biên. Trạm được đóng điện, vận hành máy biến áp T1 vào tháng 08 năm 2021 nhằm đảm bảo cung cấp điện cho khu vực huyện Mường Chà, Nậm Pồ, Mường Nhé và thị xã Mường Lay.

- Trạm 110kV xi măng Điện Biên đặt tại xã Pom Lót, huyện Điện Biên, đây là trạm khách hàng có công suất 12,5MVA – 110/6kV. Trạm được cấp điện bằng đường dây nhánh rẽ mạch kép 110kV Xi măng Điện Biên – ĐZ 110kV Điện Biên - Tuần Giáo, hiện đường dây mới treo 1 mạch, có chiều dài tuyến 24,56km.

Bảng 1.2: Thống kê thực trạng công trình trạm điện 110kV đang vận hành tỉnh Điện Biên năm 2025

STT	Tên trạm biến áp	Công suất (MVA)	Điện áp (KV)	Pmax (MW)	Khả năng mang tải (%)
I	Tài sản điện lực				
1	Điện Biên	25	110/35/22	26,6	115,7
		25	110/35/22	12,2	82,9
2	Tuần Giáo	16	110/35/22	11,4	77,4
		16	110/35/22	11,4	77,4
3	Điện Biên 2	25	110/35/22	-	-
4	Mường Chà	25	110/35	-	-
	Tổng	132		61,6	
II	Tài sản khách hàng				
1	XM Điện Biên	12,5	110/6	8	69,6
	Tổng	12,5		8	

Do đặc điểm địa hình phức tạp, hiện nay trên địa bàn tỉnh Điện Biên mới chỉ phát triển lưới điện 110kV (hệ thống trạm và đường dây 220kV đang trong quá trình triển khai thi công, chưa được đưa vào vận hành). Hiện trên địa bàn có các tuyến đường dây 110kV như sau:

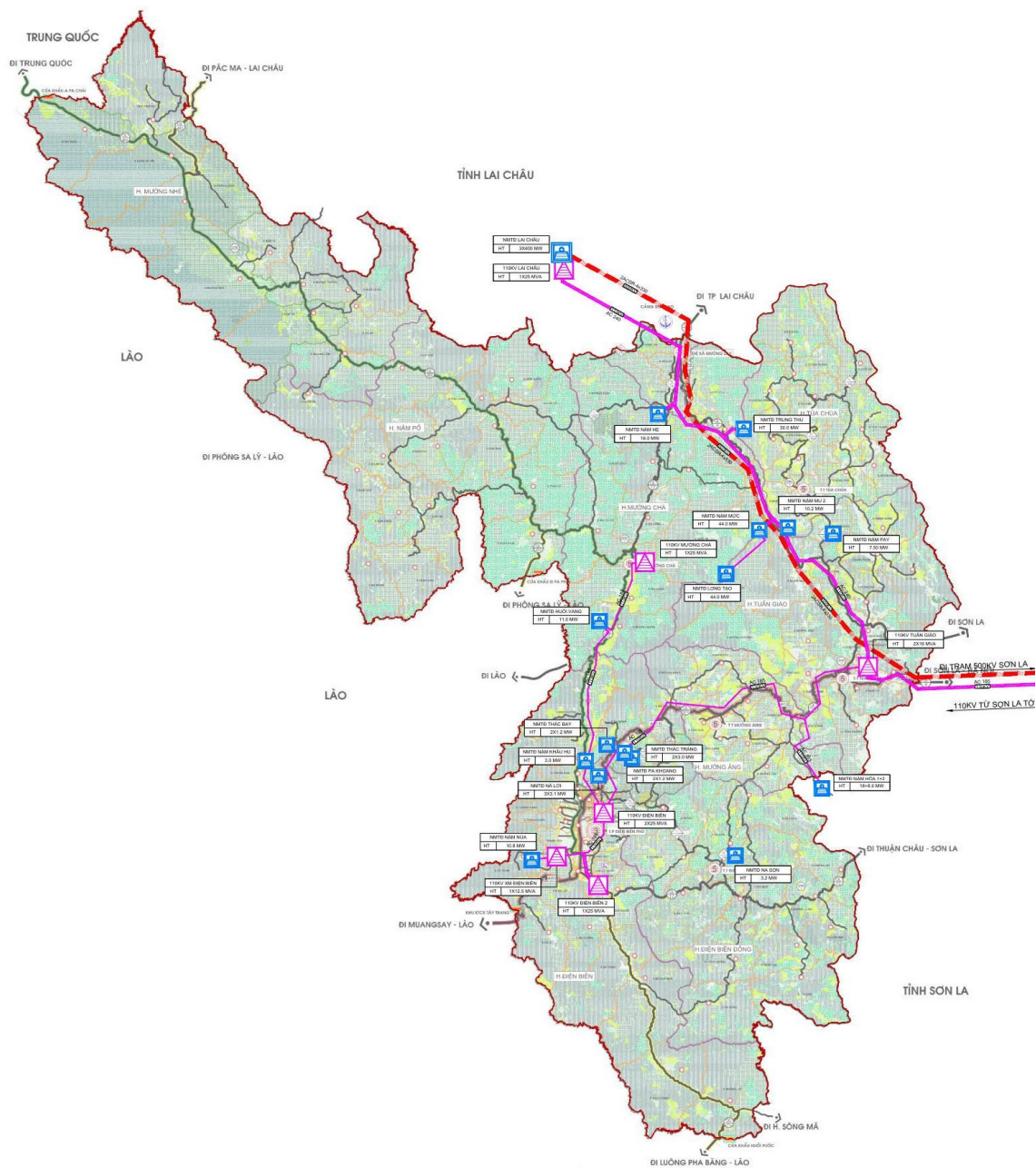
- Tuyến ĐĐK 110kV mạch kép Sơn La – Thuận Châu – Tuần Giáo, có chiều dài toàn tuyến khoảng 75,15km; trong đó mạch 1 là đường dây 110kV Sơn La – Thuận Châu – Tuần Giáo, tiết diện dây dẫn AC185, riêng đoạn đường dây Thuận Châu – Tuần Giáo dài 35,15km; mạch 2 là đường dây 110KV Sơn La - Tuần Giáo, tiết diện dây AC240.

- Tuyến ĐĐK 110kV mạch kép Tuần Giáo – Lai Châu được tách thành các đường dây cụ thể như sau:

- + Mạch 1 là tuyến ĐĐK Tuần Giáo – TĐ Nậm Mức – TĐ Nậm He – Trạm 110kV Lai Châu, chiều dài toàn tuyến khoảng 102,46km, tiết diện dây AC240;

- + Mạch 2 là tuyến ĐĐK Tuần Giáo – TĐ Trung Thu – TĐ Nậm Na 3. Đoạn Tuần Giáo – TĐ Trung Thu có chiều dài tuyến khoảng 50,594km, tiết diện dây AC240; Đoạn TĐ Trung Thu – TĐ Nậm Na 3 có chiều dài tuyến khoảng 71,224km, tiết diện dây AC240-300;

- Tuyến ĐĐK 110kV mạch đơn Điện Biên – Tuần Giáo, có chiều dài toàn tuyến khoảng 59,9km, tiết diện dây AC185.
- Tuyến ĐĐK 110kV mạch kép Điện Biên – Xi măng Điện Biên (hiện treo 1 mạch), có chiều dài toàn tuyến khoảng 24,56km, tiết diện dây AC185.
- Tuyến ĐĐK 110kV rẽ nhánh mạch đơn Thủy điện Nậm Hóa 1,2 – Đz Tuần Giáo – Điện Biên, có chiều dài toàn tuyến khoảng 17,76km, tiết diện dây AC185.
- Tuyến ĐĐK 110kV Điện Biên – Mường Chà, mạch kép, trước mắt treo một mạch.
- Tuyến ĐĐK 110kV nhánh rẽ Thủy điện Nậm Mức – Thủy điện Long Tạo.
- Tuyến ĐĐK 110kV nhánh rẽ Nhà máy Xi măng Điện Biên – Thủy điện Nậm Núa.
- Tuyến ĐĐK 110kV nhánh rẽ Thủy điện Nậm Mu 2.
- Tuyến ĐĐK 110kV nhánh rẽ Thủy điện Huổi Vang.
- Tuyến đường dây 110kV Điện Biên 2 – Điện Biên Đông – TĐ Sông Mã 3 và tuyến đường dây 110kV TĐ Mường Luân 1 – TĐ Sông Mã 3.
- Tuyến đường dây 110kV đầu nối thủy điện Huổi Chan 1.



Hình 1.2: Bản đồ thực trạng lưới điện 110kV-220kV trên địa bàn tỉnh Điện Biên

1.1.2. Lưới điện trung, hạ áp

Lưới điện trung áp tỉnh hiện nay tồn tại các cấp điện áp 35kV, 22kV và 6kV. Trong đó lưới điện 6kV tồn tại là do nhà máy thủy điện Thác Bay phát ra ở cấp điện áp 6kV. Lưới điện 22kV phát triển ở thành phố Điện Biên Phủ, thị xã Mường Lay, huyện Điện Biên và thị trấn Tuần Giáo và còn lại chủ yếu là lưới điện 35kV cấp điện cho các huyện thị.

Tính đến hết 2025, lưới điện trung áp cấp điện cho tỉnh Điện Biên có 22 lộ đường dây trung áp (trong đó 13 lộ đường dây 35kV và 8 lộ đường dây 22kV) sau 4 trạm biến áp 110kV với tổng chiều dài đường dây trung áp là 2.933,14km;

trong đó tài sản ngành điện là 2.846,58; tài sản khách hàng 86,56; Đường dây 35kV dài 2.600,46km (chiếm 91,3%); ĐZ 22kV dài 254,7km (chiếm 8,68%).
 Thống kê chi tiết khối lượng đường dây như sau:

Bảng 1.3: Khối lượng đường dây trung, hạ áp tỉnh Điện Biên tính hết 2025

STT	Hạng mục	Đơn vị	Khối lượng (km)	Tỷ lệ (%)
I	Tài sản ngành điện		2.846,58	100
1.1	Đường dây 35kV		2.600,46	91,4
<i>a</i>	<i>Đường dây trên không</i>	km	2.599,45	100
<i>b</i>	<i>Cáp ngầm</i>	km	1,01	
1.2	Đường dây 22kV	km	246,12	8,6
<i>a</i>	<i>Đường dây trên không</i>	km	222,89	90,6
<i>b</i>	<i>Cáp ngầm</i>	km	23,23	9,4000
II	Tài sản khách hàng		86,56	100
2.1	Đường dây 35kV		77,98	90,1
<i>a</i>	<i>Đường dây trên không</i>	km	77,74	99,7
<i>b</i>	<i>Cáp ngầm</i>	km	0,24	0,3000
2.2	Đường dây 22kV		8,58	9,9
<i>a</i>	<i>Đường dây trên không</i>	km	4,51	52,6
<i>b</i>	<i>Cáp ngầm</i>	km	4,07	47,4000

(Nguồn: Số liệu Báo cáo PCDB năm 2025)

1.2. Lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ

1.2.1. Tổng quan lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ

Lưới điện trung hạ áp trên địa bàn Thành phố Điện Biên Phủ được PC Điện Biên giao Đội quản lý điện lực khu vực Điện Biên Phủ (tên gọi trước đây Điện lực Thành phố Điện Biên Phủ) làm đơn vị quản lý vận hành. Quy mô lưới điện được Điện lực TP Điện Biên quản lý như sau:

- Điện lực thực hiện quản lý vận hành 11 lộ đường dây trung áp, có 07 lộ đường dây 22 kV, 04 lộ đường dây 35 kV. Tổng chiều dài khoảng 451.91 km. Tình trạng mang tải lộ đường dây cao nhất trên 52%.

- Đường dây hạ thế có chiều dài: 543.05km.

-TBA tổng: 386 trạm, phân phối: 324 TBA với tổng công suất: 64.527 kVA (Trong đó tài sản khách hàng là: 62 TBA, công suất: 24.431.5 kVA).

- Tổng số khách hàng: 41.146 khách hàng.

1.2.2. Tổn thất điện năng trên lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ

Bảng 1.4: Bảng thống kê tổn thất điện năng năm 2025 trên lưới điện Điện lực Thành phố Điện Biên

Stt	Mã lộ	Tổn thất lũy kế năm 2025			
		Điện nhận khu vực (kWh)	Thương phẩm (kWh)	Tổn thất	
				Δ Att (kWh)	TT%
1	2	15	18	19	20
	Điện lực TP:	121.419.894	118.278.511	3.141.383	1,97
	Lưới 22kV:	85.367.397	83335101	2.032.296	2,21
	Lưới 35kV:	36.052.497	34.943.410	1.109.087	1,65
1	471E21.2	401.201	396429	4.772	1,07
2	472E21.2	36.973.540	36073315	900.225	2,24
3	473E21.2	29.282.838	27881148	634.321	2,19
4	474E21.2	5.808.689	5664853	143.836	2,33
5	475E21.2	1.120.802	1095577	25.225	2,14
6	477E21.2	12.547.696	12223779	323.917	2,19
7	371E21.2	1.059.825	1010136	49.689	0,44
8	373E21.2	12.681.354	12134895	546.459	1,82
9	373E21.1	18.425.767	18.051.057	374.710	1,98
10	377E21.2	3.885.551	3747322	138.229	2,02

Đối với đường dây trung thế có 10 lộ đường dây trung thế thực hiện theo dõi tính toán tổn thất điện năng, (có 01 lộ đường dây đang tạm cắt điện do chưa có phụ tải, do vậy không theo dõi tính toán tổn thất). Trong đó có 06 lộ đường dây 22 kV, 04 lộ đường dây 35 kV. Thực hiện năm 2025 không có lộ đường dây tổn thất $> 3\%$; 06 lộ đường dây tổn thất từ 2-3%; 04 lộ đường dây có tổn thất $< 2\%$;

Từ 10 lộ đường dây trung áp trên địa bàn thành phố Điện Biên Phủ, luận văn chọn lộ 472E21.2 là lộ đường dây quan trọng, có phụ tải lớn và tổn thất công suất tương đối cao để thực hiện tính toán trong luận văn này.

1.3. Kết luận

Tỉnh Điện Biên là một tỉnh miền núi phía Bắc có địa thế, địa hình rất phức tạp. Hệ thống điện của tỉnh được cấp điện từ nguồn lưới điện Quốc gia khu vực miền Bắc thông qua 2 đường dây 110kV và 5 TBA 110kV. Lưới điện trên địa bàn TP Điện Biên Phủ trước đây (nay là phường Điện Biên Phủ) do Đội quản lý điện lực khu vực Điện Biên Phủ quản lý có bán kính cấp điện rộng, phụ tải phân tán không tập trung.

Chương này đã giới thiệu tổng quan về nguồn điện, lưới điện và phụ tải điện của tỉnh Điện Biên, làm cơ sở để lựa chọn xuất tuyến để nghiên cứu.

CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP GIẢM TỶ THẤT CÔNG SUẤT

Chương 2 sẽ nghiên cứu lý thuyết tổn thất công suất trên lưới điện, TBA và các phương pháp giảm tổn thất công suất, từ đó có cơ sở lựa chọn giải pháp hiệu quả để giảm tổn thất công suất cho lưới điện trung áp Thành phố Điện Biên Phủ.

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Ý nghĩa của việc xác định tổn thất công suất

Để truyền tải điện năng đến các phụ tải, người ta dùng hệ thống lưới điện và các máy biến áp. Do dòng điện chạy qua có điện trở và điện kháng nên gây ra tổn thất công suất tác dụng (ΔP) và công suất phản kháng (ΔQ). Xét mạng điện ở chế độ xác lập là chế độ các thông số không thay đổi hoặc thay đổi không đáng kể. Từ đó làm cơ sở cho việc thiết kế, quản lý và vận hành lưới điện một cách hợp lý nhất.

Điện năng tổn thất do dòng điện truyền tải ΔA biến thành nhiệt năng làm nóng dây dẫn và MBA, sau đó tỏa ra môi trường xung quanh. Trong mạng điện có chiều dài ngắn, công suất bé thì tổn thất công suất và năng lượng không nhiều, nhưng đối với mạng điện lớn và bán kính truyền tải xa thì tổn thất công suất rất lớn (chiếm từ 10-15% công suất truyền tải).

Lượng điện bị tổn thất trong quá trình truyền tải do nhà máy điện cung cấp. Như vậy công suất nguồn phát phải tăng lên để bù vào phần công suất bị tổn thất, lượng nhiên liệu cũng tăng làm cho giá thành điện tăng cao. Mặt khác tổn thất công suất phản kháng tuy không ảnh hưởng đến chi phí nguyên liệu nhưng cũng phải dùng thêm các thiết bị như tụ điện, máy bù đồng bộ cũng làm vốn đầu tư của mạng điện tăng lên. Như vậy việc nghiên cứu tổn thất công suất và điện năng có ý nghĩa rất quan trọng. Trên cơ sở đó đề ra các biện pháp làm giảm tổn thất và hạ giá thành điện năng.

2.2. Các phương pháp giảm tổn thất công suất [4]

2.2.1. Tăng tiết diện dây dẫn

Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây được xác định theo công thức

$$\Delta P = \sum \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i 10^3 [\text{kW}] \quad (2.1)$$

Mặt khác ta có:

$$R_i = \rho_i \frac{l_i}{S_i} \quad (2.2)$$

Từ hai công thức trên ta có:

$$\Delta P = \frac{P_{tt_i}^2 + Q_{tt_i}^2}{U_i^2} \rho_i \frac{l_i}{s_i} 10^3 [\text{kW}] \quad (2.3)$$

Trong đó:

- ΔP : Tổn thất công suất tác dụng trên dây dẫn
- U : Điện áp truyền tải của dây dẫn
- P_{tt} : Công suất tác dụng truyền tải trên đường dây
- Q_{tt} : Công suất phản kháng truyền tải trên đường dây
- l : chiều dài dây dẫn
- s : tiết diện dây dẫn
- ρ : Điện trở suất của dây dẫn

Từ công thức trên ta thấy tổn thất công suất tác dụng trên dây dẫn tỷ lệ nghịch với tiết diện dây và tỷ lệ thuận với điện trở suất của dây dẫn. Ta coi $\frac{P_{tt}^2 + Q_{tt}^2}{U^2}$ là không đổi, do vậy để giảm tổn thất công suất trên đường dây ta có thể tăng tiết diện dây dẫn hoặc thay loại dây dẫn có điện trở suất nhỏ hơn. Thông thường hay dùng trường hợp thay dây có tiết diện lớn hơn vì nó có tính khả thi hơn trường hợp thay vật liệu làm dây dẫn vì thường thì thay dây dẫn có điện trở suất nhỏ hơn thì chi phí cho dây dẫn lớn hơn.

Việc thay đổi dây dẫn đối với các lộ đường dây có tiết diện nhỏ hơn với nhu cầu phụ tải thì sẽ giảm được tổn thất công suất trên đường dây.

Tuy nhiên giải pháp tăng tiết diện dây dẫn trên lộ 472E21.2 là không khả thi vì làm tăng vốn đầu tư. Khi tháo dây cũ thay dây mới sẽ làm tăng tần suất mất điện, ảnh hưởng đến quá trình dự báo phụ tải vì thay dây đảm bảo khả năng truyền tải trong vòng bao nhiêu năm tiếp theo. Việc thay đổi dây dẫn cũng phải dựa trên cơ sở so sánh kinh tế kỹ thuật, phương án nào có vốn đầu tư thấp và các chi phí khác nhỏ thì lựa chọn.

2.2.2. Nâng cao điện áp vận hành

Từ công thức:

$$\Delta P = \frac{P_{tt_i}^2 + Q_{tt_i}^2}{U_i^2} \rho_i \frac{l_i}{s_i} 10^3 [\text{kW}] \quad (2.4)$$

Ta thấy tổn thất công suất tác dụng truyền tải trên đường dây tỷ lệ nghịch với bình phương điện áp như vậy nếu tăng điện áp vận hành sẽ làm giảm rất nhiều tổn thất công suất. Tuy nhiên việc nâng điện áp vận hành bị giới hạn bởi khả năng cách điện của vật liệu cách điện trên lưới điện.

2.2.3. Lọc sóng hài

Sóng hài là một dạng nhiễu không mong muốn, ảnh hưởng trực tiếp tới chất lượng lưới điện và cần được chú ý tới khi tổng các dòng điện hài cao hơn mức độ giới hạn cho phép. Dòng điện hài là dòng điện có tần số là bội của tần số cơ bản. Ví dụ dòng 250Hz trên lưới 50Hz là sóng hài bậc 5.

Dòng điện 250Hz là dòng năng lượng không sử dụng được với các thiết bị trên lưới. Vì vậy, nó sẽ bị chuyển hoá sang dạng nhiệt năng và gây tổn hao.

Sóng hài có thể làm cho cáp bị quá nhiệt, phá hỏng cách điện. Động cơ cũng có thể bị quá nhiệt hoặc gây tiếng ồn và sự dao động của momen xoắn trên rotor dẫn tới sự cộng hưởng cơ khí và gây rung. Tụ điện quá nhiệt và trong phần lớn các trường hợp có thể dẫn tới phá hủy chất điện môi. Các thiết bị hiển thị sử dụng điện và đèn chiếu sáng có thể bị chập chờn, các thiết bị bảo vệ có thể ngắt điện, máy tính lỗi (data network) và thiết bị đo cho kết quả sai.

Có thể sử dụng bộ biến đổi điện tử công suất để làm giảm thiểu sự ảnh hưởng của sóng hài đến tổn thất công suất.

Tuy nhiên giải pháp này cũng không hiệu quả vì suất đầu tư vào các bộ biến đổi điện tử công suất có giá thành cao, kết quả mang lại không như mong muốn của chủ đầu tư.

2.2.4. Phương pháp san bằng đồ thị phụ tải

Mức tiêu thụ điện năng luôn luôn thay đổi theo thời gian. Quy luật biến thiên của phụ tải theo thời gian được biểu thị trên hình vẽ gọi là đồ thị phụ tải. Trục tung của đồ thị có thể biểu diễn: công suất tác dụng, công suất phản kháng, công suất biểu kiến ở dạng đơn vị có tên hay tương đối; còn trục hoành biểu diễn thời gian.

Đồ thị phụ tải có ý nghĩa rất quan trọng đối với việc tính toán và thiết kế và đặc biệt trong việc vận hành mạng điện. Từ đồ thị phụ tải chúng ta xác định được nhiều tham số quan trọng của mạng điện như: thời gian sử dụng công suất cực đại, thời gian hao tổn cực đại, hệ số điện kén, hệ số mang tải. Thông qua các tham số này chúng ta đánh giá được đặc tính của lưới điện.

Trong vận hành mạng điện việc sắp xếp các phụ tải một cách hợp lý sao cho đồ thị phụ tải được san bằng sẽ tránh được hiện tượng điện áp sụt quá mức do phụ tải tăng vọt. Đối với lưới điện có đồ thị phụ tải không bằng phẳng, tác hại của nó gây ra không chỉ khó khăn trong vận hành, lãng phí vốn đầu tư trang thiết bị, công suất nguồn, mà nó còn gây ra tổn thất công suất. Để khắc phục cần sớm đưa ra các biện pháp để san bằng đồ thị phụ tải, song với lưới điện miền núi

phụ tải chủ yếu là thấp sáng, sinh hoạt phục vụ nhu cầu cho người dân, áp dụng biện pháp này là rất khó khăn.

Tuy nhiên, đối với những phụ tải sản xuất như: máy xay sát, trạm bơm, trạm nghiền đá... chúng ta có thể áp dụng biện pháp hạn chế các đỉnh nhọn của đồ thị phụ tải, đó là hạn chế mức tối đa sự làm việc của các phụ tải vào thời điểm cực đại. Để mang lại hiệu quả cao cho phương pháp này ta có thể đặt các công tơ điện tử để có thể tính tiền điện tại giờ cao điểm và thấp điểm.

Việc san phẳng đồ thị phụ tải là một công việc rất khó khăn nhưng vẫn có thể thực hiện được. Trên lộ 472 E21.2 phụ tải chủ yếu là sinh hoạt cho nên ta khuyến khích người dân hạn chế sử dụng điện vào giờ cao điểm để tránh đỉnh nhọn của đồ thị. Để khuyến khích người dân, nên áp dụng giá bán điện tại giờ cao điểm và thấp điểm. Giá điện năng ở giờ cao điểm sẽ cao hơn giờ thấp điểm. Có như vậy mới làm giảm được đỉnh nhọn của đồ thị phụ tải.

2.2.5. Biện pháp bù công suất phản kháng

a. Công suất phản kháng và phân bố công suất phản kháng trong hệ thống điện

Khi nói đến khái niệm công suất trong hệ thống điện, chúng ta được biết đến với hai thành phần: công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q . Một cách đơn giản, công suất tác dụng trong một mạch điện là giá trị trung bình trong một chu kỳ T của công suất trung bình:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (2.5)$$

Trong một mạch điện không thuần trở sẽ có sự thay đổi tương đối giữa dòng điện $i(t)$ và điện áp $u(t)$ về góc pha và chính sự thay đổi này đã hình thành công suất phản kháng trong mạch. Công suất phản kháng thể hiện mối tương quan giữa công suất thực và công suất biểu kiến S :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.6)$$

Trong đó công suất biểu kiến S được hiểu là công suất tác dụng lớn nhất, đạt được khi góc lệch pha giữa $u(t)$ và $i(t)$ bằng 0 (chẳng hạn như trong trường hợp mạch điện thuần trở).

Trong hệ thống điện, bên cạnh công suất thực, luôn tồn tại thành phần công suất phản kháng vì tính chất của hầu hết các thiết bị tiêu thụ điện yêu cầu cung cấp Q và đôi khi lượng công suất này khá lớn, thế nhưng việc truyền công suất phản kháng trên lưới điện là một điều không tốt vì các lý do sau:

- Gây tổn thất một lượng công suất tác dụng trong khi tạo ra công suất này rất tốn kém, vì khi truyền tải công suất tác dụng và phản kháng qua một phần tử có điện trở R sẽ gây tổn thất một lượng công suất tác dụng là:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_P + \Delta P_Q \quad (2.7)$$

Phần tổn thất ΔP_Q gây ra do phải tải công suất phản kháng Q, tỷ lệ với bình phương giá trị của nó.

- Gây tổn thất điện áp, đặc biệt trong các mạng điện cung cấp cho các xí nghiệp, gây ảnh hưởng đến hoạt động của các thiết bị, chẳng hạn nếu truyền tải công suất P và Q qua phần tử có điện trở R và điện kháng X, tổn thất điện áp bằng:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_P + \Delta U_Q \quad (2.8)$$

Trong đó: ΔU_Q là tổn thất điện áp do công suất phản kháng gây ra.

Trường hợp đối với một hệ thống điện lớn, lượng tổn thất này rất lớn do có nhiều đường dây truyền tải cao áp mà thành phần X lớn hơn nhiều so với R. Chính phần tổn thất làm tăng độ lệch điện áp trên đầu cực của các máy phát điện so với trị số định mức, khi thay đổi phụ tải và chế độ của lưới điện. Để khắc phục độ lệch điện áp, yêu cầu phải tăng công suất và do đó tăng cả chi phí cho các phương tiện điều chỉnh điện áp.

- Hạn chế khả năng tải công suất tác dụng vì phải tải thêm một lượng công suất phản kháng trên lưới điện.

b. Sự cần thiết phải bù công suất phản kháng

Từ những lý do đã nêu trên, để nâng cao hiệu quả về mặt kinh tế và kỹ thuật, cần đưa nguồn công suất Q tới gần những nơi tiêu thụ để giảm lượng công suất Q nhận từ các nhà máy điện lúc cao điểm và rút bớt công suất Q lúc thấp điểm vì dung dẫn của các đường dây cao áp và siêu cao áp là khá lớn, có thể làm gia tăng điện áp (không cần thiết) tại một số nút. Để làm được điều này, chúng ta có thể dùng máy bù đồng bộ, tụ điện tĩnh hay kháng điện. Để bù cho dòng công suất phản kháng tải trên đường dây, tổng trở của thiết bị bù phải có tính chất: khi dòng công suất phản kháng mang tính cảm thì thiết bị bù phát công suất phản kháng, còn khi dòng công suất phản kháng mang tính dung thì thiết bị bù phải tiêu thụ công suất phản kháng.

Ở những nút tải tiêu thụ công suất tác dụng, thường cũng tiêu thụ công suất phản kháng nên công suất phản kháng mang tính cảm, tại đó thiết bị bù sử dụng

những phần tử dung kháng như: tụ điện tĩnh (điều chỉnh được hay không điều chỉnh), máy bù đồng bộ...

c. Biện pháp bù công suất phản kháng trên lưới điện phân phối 24 kV dùng tụ điện

Như đã nói ở phần trước, việc bù Q là cần thiết, đặc biệt khi hệ thống điện ngày càng phát triển và liên kết tạo thành những hệ thống lớn với nhiều mạch vòng kín, đồng thời việc tiêu thụ công suất phản kháng ngày càng tăng do sự phát triển các ngành công nghiệp đòi hỏi sử dụng nhiều động cơ và các thiết bị khác. Khi đó vấn đề bù Q bằng thiết bị bù chuyên dụng được sử dụng rộng rãi.

Ở đây, chúng ta chỉ nghiên cứu vấn đề bù Q dùng tụ điện (có hoặc không có điều khiển). Khi đặt tụ bù sẽ làm tăng vốn đầu tư cho công trình, do vậy cần tính toán cân nhắc kỹ lợi ích về mặt kinh tế và kỹ thuật. Trong hệ thống điện, vấn đề bù Q được phân thành 2 loại:

- Bù kỹ thuật: dùng tụ bù và các thiết bị bù khác để bù một lượng Q nhất định để đảm bảo cân bằng công suất Q trong toàn hệ thống. Dung lượng bù phải đảm bảo đáp ứng với các chế độ vận hành khác nhau của hệ thống điện. Tổng công suất Q của các nhà máy điện và các thiết bị bù phải lớn hơn công suất Q yêu cầu của phụ tải ở chế độ cực đại để dự phòng khi có sự cố.

- Bù kinh tế: đặt tụ bù để nâng cao hiệu quả kinh tế của mạng điện, nghĩa là trong quá trình vận hành, công suất Q có thể thiếu cục bộ, do vậy cần phải bù thêm. Hơn nữa, khi bù cưỡng bức, một lượng công suất Q đáng kể vẫn phải lưu thông trong hệ thống điện và gây ra tổn thất công suất và tổn thất điện năng. Khi bù kinh tế, cần tính toán để đạt được các chỉ tiêu về mặt kinh tế đã đề ra. Về nguyên tắc, nếu lợi ích thu được do việc lắp đặt tụ bù lớn hơn chi phí lắp đặt thì việc bù kinh tế sẽ được thực hiện.

d. Các lợi ích khi lắp đặt tụ bù

- Góp phần làm giảm bớt công suất P yêu cầu đối với các nhà máy điện do giảm bớt tổn thất công suất ΔP , đặc biệt là ở chế độ tải cực đại, từ đó tăng độ dự trữ và nâng cao độ tin cậy của hệ thống điện.

- Giảm bớt tải cho các máy biến áp trung gian và các đường dây trục chính do giảm bớt công suất Q.

- Giảm tổn thất điện năng.

- Nâng cao chất lượng điện áp tại các nút tải vì giảm độ sụt áp trên đường dây.

- Cải thiện hệ số công suất,...

e. Ưu, nhược điểm khi lắp đặt tụ bù so với các thiết bị bù khác

*** Ưu điểm:**

- Chi phí cho một đơn vị dung lượng bù (1 kVAr) rẻ, ưu điểm này càng nổi bật khi dung lượng bộ tụ càng lớn.
- Có thể lắp ghép thành những bộ tụ có công suất và điện áp theo yêu cầu.
- Tổn thất công suất trong bộ tụ rất nhỏ, khoảng $(3 \div 5)$ W/kVAr. Với máy bù đồng bộ lượng tổn thất này lớn hơn, thường từ $(10 \div 30)$ W/kVAr.
- Lắp đặt và vận hành đơn giản, chi phí quản lý vận hành thấp, có thể phân ra nhiều cụm để lắp đặt trên lưới điện để mang lại hiệu quả cao hơn.

*** Nhược điểm:**

- Tụ bù chỉ có thể phát công suất phản kháng, trong khi đó các thiết bị bù khác có thể phát hoặc thu công suất phản kháng.
- Chỉ điều chỉnh theo từng cấp, không thể điều chỉnh trơn.
- Công suất phát của tụ bù phụ thuộc vào điện áp vận hành, dễ hư hỏng khi bị ngắn mạch, quá điện áp.

Với các ưu điểm vượt trội và điều kiện tài chính của ngành điện Việt Nam, hiện nay phần lớn lưới điện phân phối 35 kV trên cả nước đều dùng tụ bù để bù công suất Q trên lưới điện.

2.2.6. Tái cấu trúc lưới

Đây là một giải pháp lâu dài cho lưới điện trung áp TP Điện Biên Phủ, việc sử dụng quá nhiều chủng loại MBA, dây dẫn nhiều cấp điện áp làm cho cấu trúc lộ phức tạp, giảm độ tin cậy, tính linh hoạt trong vận hành, gây khó khăn trong vận hành sửa chữa cải tạo lưới điện. Vì vậy trong công tác quy hoạch cải tạo và phát triển lưới điện phải tuân thủ quy hoạch tổng thể, thống nhất với sự phát triển của khoa học kỹ thuật.

2.3. Kết luận chương 2

Chương này giới thiệu một số giải pháp giảm tổn thất điện năng trên lưới điện trung áp. Dựa trên các phân tích thực tế của lưới điện tỉnh Điện Biên ở chương 1 và các giải pháp ở chương 2 này, luận văn đề xuất áp dụng bù công suất phản kháng để giảm tổn thất công suất, do giải pháp này có chi phí thấp và mang lại hiệu quả cao, là giải pháp hiệu quả và phù hợp nhất cho lưới điện khu vực. Ở chương tiếp theo, luận văn áp dụng bù công suất phản kháng để giảm tổn thất công suất cho xuất tuyến 472 E21.2 thành phố Điện Biên Phủ.

CHƯƠNG 3: ÁP DỤNG BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG ĐỂ GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT CHO XUẤT TUYẾN 472 E21.2 THÀNH PHỐ ĐIỆN BIÊN PHỦ

3.1. Giới thiệu về xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ

Xuất tuyến 472 E21.2 thuộc Điện lực Thành phố Điện Biên Phủ được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu trong luận văn do đây là một trong những xuất tuyến có quy mô tương đối lớn, kết cấu lưới phức tạp và mức tổn thất công suất cao trong khu vực. Để phục vụ cho công tác tính toán, mô phỏng và phân tích một cách hiệu quả, mô hình lưới điện thực tế của xuất tuyến đã được tiến hành biến đổi và rút gọn trên cơ sở vẫn bảo đảm phản ánh đầy đủ các đặc trưng kỹ thuật quan trọng của hệ thống.

Cụ thể, sau quá trình khảo sát, chuẩn hóa số liệu và đơn giản hóa mô hình, xuất tuyến 472 E21.2 được biểu diễn dưới dạng một lưới điện hình tia gồm 56 nút và 55 nhánh (Sơ đồ rút gọn chi tiết tại Phụ lục 7). Việc rút gọn mô hình nhằm mục đích giảm độ phức tạp tính toán, rút ngắn thời gian mô phỏng, đồng thời vẫn giữ được tính chính xác cần thiết trong việc đánh giá phân bố điện áp, dòng điện và tổn thất công suất trên toàn xuất tuyến. Các thông số điện trở, điện kháng của từng nhánh, cũng như vị trí và quy mô phụ tải tại các nút, được kế thừa và hiệu chỉnh từ số liệu vận hành thực tế, bảo đảm mô hình rút gọn có mức độ đại diện cao cho lưới điện đang được khai thác.

Trên cơ sở mô hình xuất tuyến đã được xây dựng, luận văn tiến hành xác định công suất phụ tải tương ứng với ba chế độ vận hành đặc trưng của lưới điện phân phối, bao gồm chế độ phụ tải cực đại, phụ tải trung bình và phụ tải cực tiểu. Đây là các chế độ phản ánh tương đối đầy đủ các trạng thái làm việc chủ yếu của xuất tuyến trong suốt chu kỳ vận hành. Công suất phụ tải ở từng chế độ được tổng hợp và trình bày chi tiết trong Bảng 3.1, làm cơ sở cho các bước tính toán tiếp theo.

Chế độ phụ tải cực đại đại diện cho thời điểm lưới điện phải làm việc trong điều kiện nặng nề nhất, khi nhu cầu tiêu thụ điện của phụ tải đạt mức cao nhất, dòng điện trên các nhánh tăng lớn và tổn thất công suất có xu hướng gia tăng mạnh. Chế độ phụ tải trung bình phản ánh trạng thái vận hành phổ biến của xuất tuyến trong phần lớn thời gian trong năm, có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá hiệu quả tổng thể của các giải pháp giảm tổn thất điện năng. Trong khi đó, chế độ phụ tải cực tiểu mô tả điều kiện vận hành khi nhu cầu phụ tải thấp, thường xảy ra vào ban đêm hoặc các thời điểm ngoài giờ cao điểm, giúp kiểm tra khả năng làm việc ổn định của lưới điện cũng như tính hợp lý của các phương án bù công suất phản kháng.

Việc xây dựng mô hình xuất tuyến rút gọn với 56 nút, 55 nhánh cùng với việc xác định rõ ràng công suất phụ tải ở ba chế độ vận hành đặc trưng đã tạo nền tảng quan trọng cho các phân tích kỹ thuật trong luận văn. Đây là cơ sở để tiến hành tính toán phân bố điện áp, xác định tổn thất công suất và triển khai các thuật toán tối ưu nhằm đề xuất giải pháp bù công suất phản kháng hiệu quả cho xuất tuyến 472 E21.2 trong các nội dung nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 3.1: Công suất của các phụ tải trên xuất tuyến 472 E21.2

Chế độ	Phụ tải cực đại		Phụ tải trung bình		Phụ tải cực tiểu	
Nút	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,09242	0,06932	0,05602	0,02713	0,02704	0,01888
3	0,04625	0,02240	0,02803	0,02030	0,01353	0,00693
4	0,15762	0,11822	0,09554	0,05414	0,04612	0,02979
5	0,00406	0,00283	0,00246	0,00159	0,00119	0,00089
6	0,00517	0,00279	0,00313	0,00194	0,00151	0,00113
7	0,15308	0,11481	0,09278	0,05505	0,04479	0,03010
8	0,00134	0,00083	0,00081	0,00046	0,00039	0,00019
9	0,15782	0,11016	0,09566	0,04633	0,04618	0,02492
10	0,20348	0,15261	0,12333	0,07966	0,05954	0,03690
11	0,01112	0,00776	0,00674	0,00435	0,00325	0,00202
12	0,13440	0,10080	0,08146	0,05049	0,03933	0,02437
13	0,00117	0,00085	0,00071	0,00040	0,00034	0,00025
14	0,00235	0,00127	0,00142	0,00103	0,00069	0,00050
15	0,64712	0,31341	0,39223	0,20094	0,18935	0,12724
16	0,00221	0,00160	0,00134	0,00093	0,00065	0,00040
17	0,11476	0,06194	0,06956	0,04674	0,03358	0,02081
18	0,08135	0,06101	0,04931	0,03570	0,02380	0,01412
19	0,20475	0,11604	0,12410	0,07364	0,05991	0,03395
20	0,49233	0,25223	0,29841	0,17706	0,14406	0,09681
21	0,22161	0,16044	0,13432	0,09725	0,06484	0,04019

Chế độ	Phụ tải cực đại		Phụ tải trung bình		Phụ tải cực tiểu	
Nút	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
22	0,19938	0,10761	0,12085	0,07171	0,05834	0,03920
23	0,42589	0,30834	0,25814	0,18018	0,12462	0,07394
24	0,00137	0,00103	0,00083	0,00054	0,00040	0,00029
25	0,11011	0,05333	0,06674	0,04311	0,03222	0,01651
26	0,39012	0,22109	0,23646	0,17119	0,11415	0,06469
27	0,25984	0,16103	0,15749	0,11812	0,07603	0,04104
28	0,23272	0,13189	0,14105	0,08370	0,06810	0,03298
29	0,11440	0,07390	0,06934	0,04114	0,03347	0,01715
30	0,23652	0,12117	0,14336	0,10379	0,06921	0,04470
31	0,01600	0,01158	0,00970	0,00626	0,00468	0,00290
32	0,00082	0,00046	0,00050	0,00032	0,00024	0,00018
33	0,26557	0,17154	0,16097	0,10817	0,07771	0,05626
34	0,00077	0,00037	0,00047	0,00026	0,00023	0,00011
35	0,00044	0,00024	0,00027	0,00020	0,00013	0,00010
36	0,00032	0,00022	0,00019	0,00014	0,00009	0,00006
37	0,00040	0,00026	0,00024	0,00012	0,00012	0,00008
38	0,00057	0,00038	0,00035	0,00024	0,00017	0,00009
39	0,02247	0,01627	0,01362	0,00772	0,00657	0,00355
40	0,34860	0,25238	0,21129	0,14748	0,10200	0,06322
41	0,00071	0,00053	0,00043	0,00026	0,00021	0,00011
42	0,09513	0,06393	0,05766	0,03724	0,02784	0,01502
43	0,12790	0,06903	0,07752	0,04804	0,03742	0,02417
44	0,21999	0,14783	0,13334	0,06831	0,06437	0,03298
45	0,20319	0,15239	0,12316	0,05965	0,05945	0,03685
46	1,00747	0,54377	0,61064	0,44210	0,29479	0,15911
47	0,10503	0,05952	0,06366	0,04775	0,03073	0,02145
48	0,50984	0,24693	0,30902	0,15832	0,14918	0,09636

Chế độ	Phụ tải cực đại		Phụ tải trung bình		Phụ tải cực tiểu	
Nút	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
49	0,00008	0,00005	0,00005	0,00003	0,00002	0,00002
50	0,00008	0,00004	0,00005	0,00004	0,00002	0,00002
51	0,25512	0,14458	0,15463	0,08346	0,07465	0,03615
52	0,14639	0,09456	0,08873	0,06655	0,04283	0,02990
53	0,04062	0,02517	0,02462	0,01461	0,01189	0,00799
54	0,11390	0,07059	0,06904	0,04278	0,03333	0,01978
55	0,09592	0,05177	0,05814	0,03755	0,02807	0,01813
56	0,13878	0,06721	0,08412	0,06090	0,04061	0,02410

(Nguồn: Số liệu được PCDB cung cấp năm 2025)

Bảng 3.2 trình bày các thông số kỹ thuật cơ bản của các đoạn đường dây trên xuất tuyến 472 E21.2, bao gồm chiều dài, điện trở và điện kháng của từng đoạn. Đây là những tham số quan trọng phản ánh đặc tính truyền tải điện năng của lưới điện phân phối, có ảnh hưởng trực tiếp đến phân bố dòng điện, sụt áp cũng như mức tổn thất công suất trên toàn xuất tuyến. Các dữ liệu này được sử dụng trực tiếp trong các bài toán phân bố công suất, tính toán tổn thất và đánh giá hiệu quả của các giải pháp bù công suất phản kháng được đề xuất trong các phân nghiên cứu tiếp theo của luận văn.

Bảng 3.2: Thông số của các đường dây trên xuất tuyến 472 E21.2

Nhánh	Nút đầu	Nút Cuối	Chiều dài (km)	R0 (Ohm/km)	X0 (Ohm/km)
1	1	2	0,75	0,153	0,08
2	2	3	0,12	0,253	0,386
3	3	4	0,29	0,253	0,386
4	4	5	0,33	0,253	0,386
5	5	6	0,15	0,153	0,08
6	6	7	0,15	0,253	0,386
7	7	8	0,48	0,253	0,386
8	8	9	0,04	0,253	0,386
9	9	10	0,16	0,253	0,386

Nhánh	Nút đầu	Nút Cuối	Chiều dài (km)	R0 (Ohm/km)	X0 (Ohm/km)
10	10	11	0,08	0,253	0,386
11	11	12	0,32	0,253	0,386
12	12	13	0,04	0,253	0,386
13	13	14	0,12	0,253	0,386
14	14	15	0,2	0,253	0,386
15	15	16	0,12	0,253	0,386
16	16	17	0,09	0,253	0,386
17	17	18	0,09	0,253	0,386
18	18	19	0,06	0,253	0,386
19	19	20	0,12	0,253	0,386
20	20	21	0,22	0,253	0,386
21	21	22	0,06	0,253	0,386
22	22	23	0,25	0,253	0,386
23	23	24	0,05	0,253	0,386
24	24	25	0,1	0,253	0,386
25	25	26	0,06	0,253	0,386
26	26	27	0,05	0,253	0,386
27	27	28	0,12	0,253	0,386
28	28	29	0,21	0,253	0,386
29	29	30	0,13	0,253	0,386
30	30	31	0,07	0,253	0,386
31	31	32	0,15	0,253	0,386
32	32	33	0,14	0,253	0,386
33	33	34	0,12	0,253	0,386
34	34	35	0,12	0,253	0,386
35	35	36	0,07	0,253	0,386
36	36	37	0,05	0,253	0,386
37	37	38	0,08	0,153	0,08
38	38	39	0,09	0,253	0,386

Nhánh	Nút đầu	Nút Cuối	Chiều dài (km)	R0 (Ohm/km)	X0 (Ohm/km)
39	39	40	0,08	0,253	0,386
40	40	41	0,06	0,253	0,386
41	41	42	0,14	0,253	0,386
42	42	43	0,34	0,253	0,386
43	43	44	0,11	0,253	0,386
44	44	45	0,27	0,253	0,386
45	45	46	0,19	0,253	0,386
46	46	47	0,18	0,253	0,386
47	47	48	0,45	0,253	0,386
48	48	49	0,23	0,253	0,386
49	49	50	0,21	0,253	0,386
50	50	51	0,26	0,253	0,386
51	51	52	0,1	0,253	0,386
52	52	53	0,42	0,32	0,392
53	53	54	0,5	0,32	0,392
54	54	55	1	0,32	0,392
55	55	56	2,1	0,32	0,392

(Nguồn: Số liệu được PCDB cung cấp năm 2025)

Thực tế hiện nay trên lộ xuất tuyến 472 E21.2 đã được trang bị 2 cụm tụ bù tại vị trí nút 36 và nút 50, với tổng công suất 300kVAr, tuy nhiên việc tính toán và đặt hệ thống bù chưa đạt được hiệu quả cao do việc bố trí mới chỉ dựa nhiều vào yếu tố kinh nghiệm vận hành, chưa tính toán tối ưu và hợp lý.

3.2. Giới thiệu phương pháp tính toán bù tối ưu cho xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ

Để thực hiện tính toán bù công suất phản kháng tối ưu nhằm cực tiểu hóa tổn thất công suất trên xuất tuyến, luận văn sử dụng phương pháp quét tiến/lùi [1-4] kết hợp với giải thuật di truyền [5-6] với hàm mục tiêu là giảm tổn thất công suất.

a. Thuật toán di truyền:

Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm – GA) là một phương pháp tìm kiếm và tối ưu hóa dựa trên cơ chế tiến hóa của sinh học, mô phỏng quá trình chọn lọc tự nhiên và di truyền của các quần thể sinh vật. Ý tưởng nền tảng của phương pháp này được đề xuất bởi John Henry Holland vào những năm 1970, với mục tiêu xây dựng một cơ chế tìm kiếm thích nghi có khả năng giải quyết các bài toán tối ưu phức tạp, bao gồm cả các bài toán có ràng buộc và không ràng buộc. Đặc biệt trong lĩnh vực hệ thống điện, nơi các bài toán như tính toán bù công suất phản kháng tối ưu, phân bố tụ bù, hay tái cấu trúc lưới điện thường có không gian nghiệm lớn và phi tuyến, thuật toán di truyền thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội so với các phương pháp truyền thống dựa trên đạo hàm.

Thuật toán di truyền khởi tạo một tập hợp các nghiệm khả thi ban đầu gọi là quần thể (population). Mỗi nghiệm trong quần thể được biểu diễn dưới dạng một nhiễm sắc thể (chromosome), bao gồm các gen (gene) mã hóa các biến quyết định của bài toán. Trong bài toán bù tối ưu lưới điện, mỗi gen có thể đại diện cho dung lượng tụ bù tại một nút, trạng thái đóng/cắt của thiết bị bù, hoặc vị trí lắp đặt thiết bị. Cách mã hóa có thể ở dạng nhị phân, số nguyên hoặc số thực tùy thuộc vào đặc điểm của biến điều khiển.

Để đánh giá chất lượng của từng nhiễm sắc thể, thuật toán sử dụng một hàm thích nghi (fitness function), còn gọi là hàm mục tiêu. Hàm này phản ánh mức độ “tốt” của nghiệm đối với mục tiêu tối ưu đặt ra. Trong bài toán bù công suất phản kháng, hàm mục tiêu thường là cực tiểu hóa tổn thất công suất tác dụng trên lưới, cải thiện điện áp tại các nút, hoặc tối thiểu hóa chi phí đầu tư và vận hành thiết bị bù. Khi bài toán có các ràng buộc như giới hạn điện áp, dòng điện nhánh, hoặc công suất phản kháng phát/thu của nguồn, các điều kiện này thường được tích hợp vào hàm thích nghi thông qua phương pháp phạt (penalty function), nhằm đảm bảo các nghiệm vi phạm ràng buộc sẽ có giá trị thích nghi thấp hơn.

Quá trình tiến hóa của quần thể qua các thế hệ được thực hiện thông qua ba toán tử cơ bản: lựa chọn (selection), lai ghép (crossover) và đột biến (mutation). Đây chính là các cơ chế mô phỏng lại quá trình sinh sản và biến dị trong tự nhiên.

Toán tử lựa chọn đóng vai trò sàng lọc các cá thể trong quần thể dựa trên giá trị hàm thích nghi. Những nhiễm sắc thể có giá trị thích nghi cao sẽ có xác suất được chọn lớn hơn để tham gia vào quá trình sinh sản, từ đó truyền lại đặc tính tốt cho thế hệ sau. Có nhiều chiến lược lựa chọn khác nhau như bánh xe roulette (roulette wheel selection), giải đấu (tournament selection) hay xếp hạng (rank selection). Trong thực tế ứng dụng cho lưới điện, việc lựa chọn phù hợp

phương pháp selection giúp duy trì cân bằng giữa khai thác (exploitation) các nghiệm tốt hiện có và khám phá (exploration) các vùng nghiệm mới trong không gian tìm kiếm.

Toán tử lai ghép, hay còn gọi là trao đổi chéo, là cơ chế kết hợp thông tin di truyền từ hai nhiễm sắc thể cha mẹ để tạo ra một hoặc nhiều nhiễm sắc thể con. Thông thường, hai cá thể được chọn ngẫu nhiên từ quần thể theo xác suất đã xác định, sau đó thực hiện trao đổi một điểm (single-point crossover), hai điểm (two-point crossover) hoặc nhiều điểm trên chuỗi gen. Đối với bài toán tối ưu bù công suất, lai ghép cho phép kết hợp cấu hình tụ bù tối ưu tại một nhóm nút của cá thể này với cấu hình tốt ở nhóm nút khác của cá thể kia, qua đó tạo ra các nghiệm mới có tiềm năng cải thiện đáng kể giá trị hàm mục tiêu.

Bên cạnh đó, toán tử đột biến thực hiện việc thay đổi ngẫu nhiên một hoặc một số gen trong nhiễm sắc thể với xác suất nhỏ. Mục đích chính của đột biến là duy trì tính đa dạng di truyền của quần thể, tránh hiện tượng hội tụ sớm vào nghiệm cục bộ. Trong bối cảnh lưới điện, đột biến có thể làm thay đổi dung lượng tụ bù tại một nút hoặc thay đổi trạng thái đóng/cắt của một thiết bị, từ đó mở ra khả năng tìm kiếm các cấu hình mới mà quá trình lai ghép đơn thuần có thể không tạo ra được.

Quá trình lựa chọn, lai ghép và đột biến được lặp lại qua nhiều thế hệ cho đến khi đạt tiêu chí dừng, chẳng hạn như số thế hệ tối đa, sai số mục tiêu nhỏ hơn ngưỡng cho phép hoặc giá trị hàm thích nghi không còn cải thiện đáng kể. Kết quả cuối cùng là nhiễm sắc thể có giá trị thích nghi tốt nhất, đại diện cho phương án bù tối ưu.

b. Phương pháp quét tiến/lùi:

Quá trình tính toán của phương pháp quét tiến/lùi có bỏ qua tổn thất công suất ở bước đầu tiên như sau:

- Bỏ qua tổn thất công suất để tính phân bố công suất: Trong bước này, tổn thất công suất trên đường dây hoặc máy biến áp được giả thiết bằng không. Thực hiện tính toán các dòng công suất trên đường dây theo thứ tự từ cuối lên đầu nguồn.

- Cho $k = 1$

- Vòng lặp k :

- + Bước 1: Tính tổn thất điện áp: Sử dụng kết quả dòng công suất tính được ở trên và điện áp nguồn để tính tổn thất điện áp và điện áp tại các nút theo thứ tự từ nút nguồn đến nút cuối của lưới điện.

$$\Delta \underline{U} = Z \frac{\underline{S}^*}{\underline{U}^*} \quad (3.1)$$

+ Bước 2: Tính tổn thất công suất, dòng công suất, công suất nguồn và tổn thất điện năng: Sử dụng điện áp tính được ở trên để tính tổn thất công suất, dòng công suất theo thứ tự từ cuối lưới lên đầu nguồn.

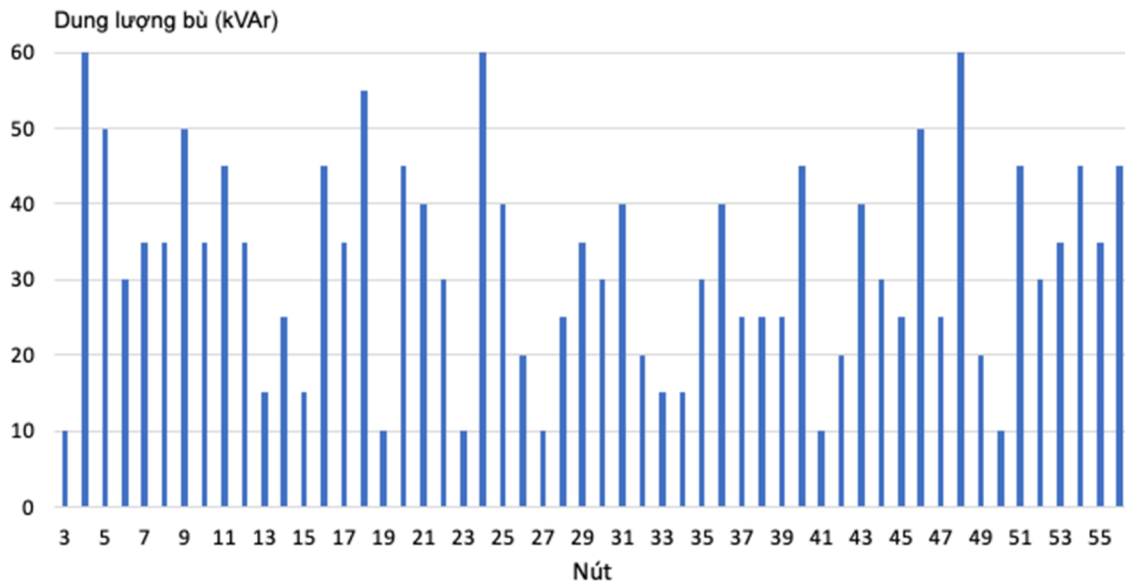
$$\Delta \underline{S} = 3 Z I^2 = Z \frac{S^2}{U^2} \quad (3.2)$$

+ Vòng lặp k+1: Sử dụng dòng công suất tính được ở bước 2 vòng lặp k để tính tổn thất điện áp và sau đó tính phân bố công suất như vòng lặp k.

Điều kiện dừng lặp là độ lệch điện áp lớn nhất giữa vòng lặp trước và vòng lặp sau nhỏ hơn sai số cho phép. Trong tính toán của luận văn này, ta lựa chọn sai số cho phép là 1%.

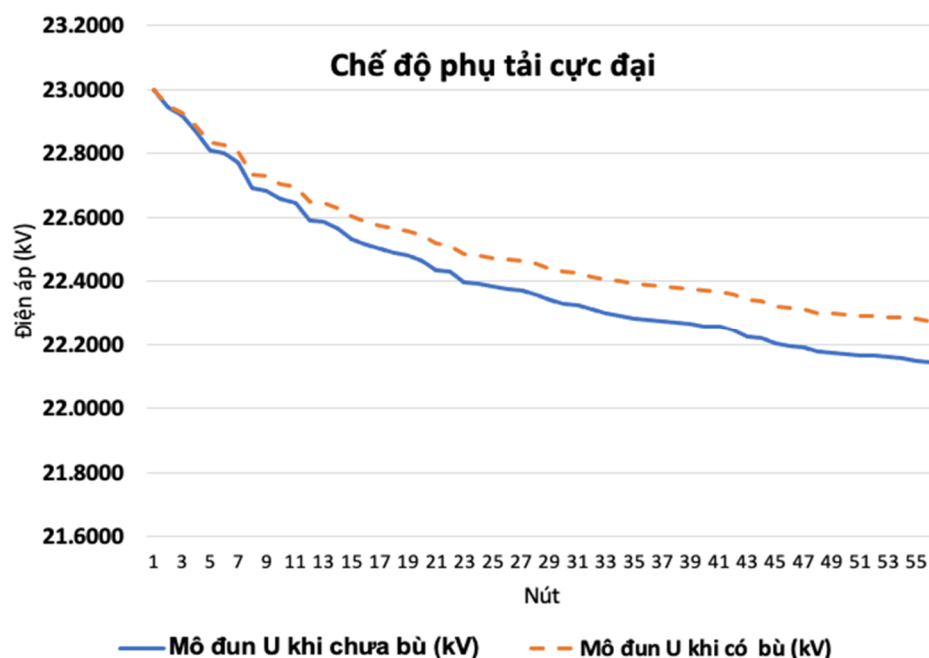
3.3. Tính toán bù tối ưu cho xuất tuyến 472 E21.2 Điện lực TP Điện Biên Phủ

Áp dụng phương pháp quét tiến/lùi kết hợp với giải thuật di truyền đã được nêu ở trên, với hàm mục tiêu là tổng tổn thất công suất, để thực hiện tính toán bù công suất phản kháng tối ưu nhằm cực tiểu hóa tổn thất công suất trên xuất tuyến. Kết quả tính toán dung lượng bù tối ưu ở chế độ phụ tải cực đại được biểu diễn trên Hình 3.1.



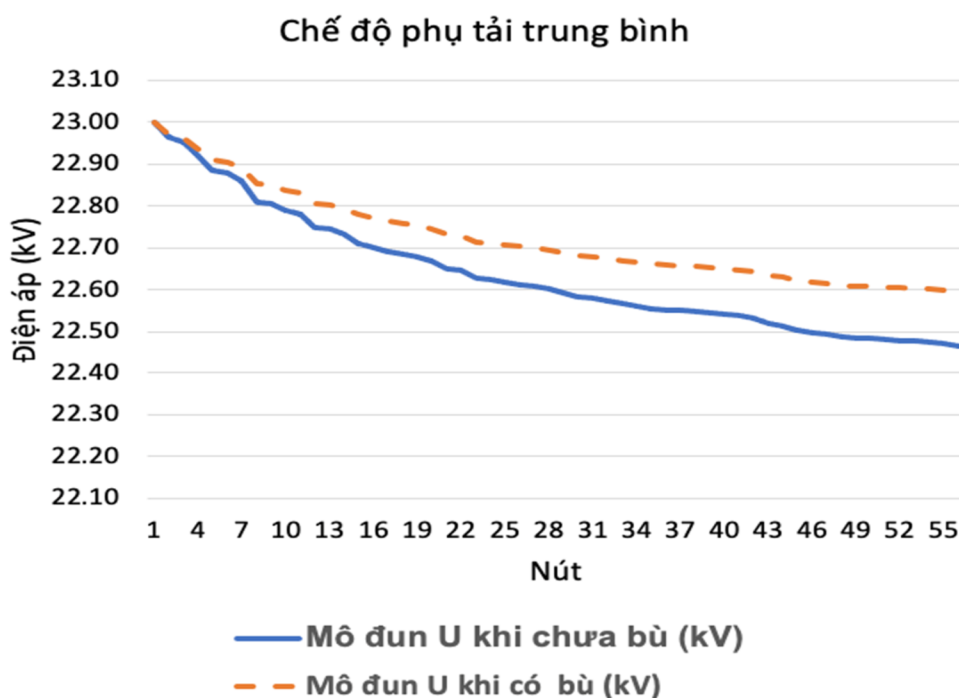
Hình 3.1: Dung lượng bù tối ưu tại các nút phụ tải ở chế độ phụ tải cực đại

Hình 3.2 biểu diễn điện áp tại các nút trên lưới khi chưa bù và khi có bù (Giá trị cụ thể được trình bày ở Phụ lục 1 và Phụ lục 4). Qua đồ thị trên hình này ta thấy điện áp tại các nút được cải thiện so với chế độ khi chưa có bù.

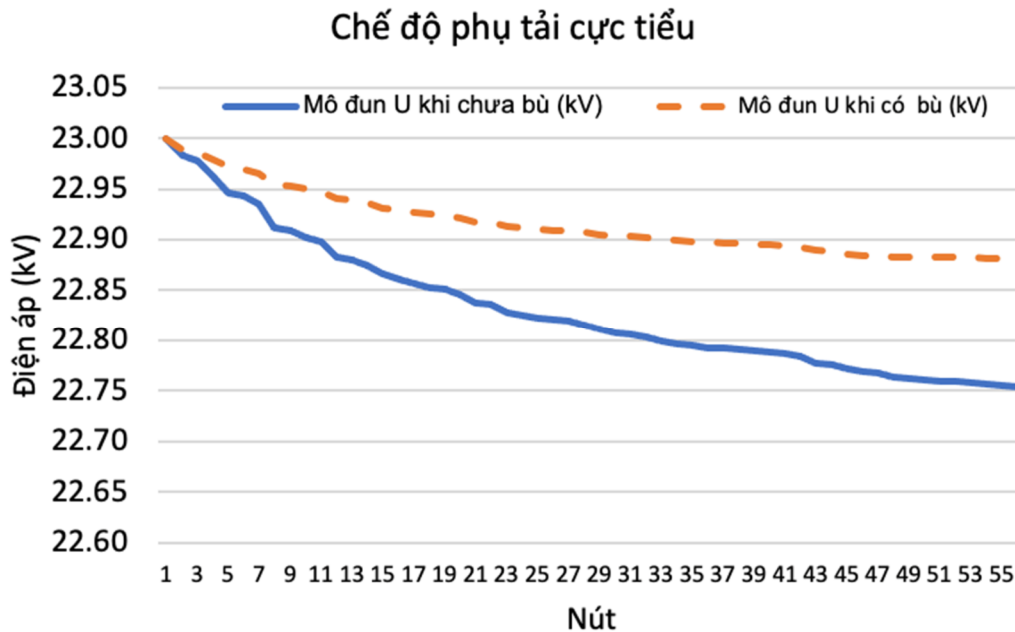


Hình 3.2: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải cực đại

Sử dụng công suất bù tính được ở trên để tính toán áp dụng cho chế độ phụ tải trung bình và phụ tải cực tiểu ta nhận được giá trị điện áp trên Hình 3.3 và Hình 3.4 (Giá trị cụ thể được trình bày ở Phụ lục 2, 3, 5 và 6).



Hình 3.3: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải trung bình



Hình 3.4: Điện áp tại các nút khi chưa bù và khi có bù ở chế độ phụ tải cực tiểu

Kết quả mô phỏng phân bố điện áp trên xuất tuyến, thể hiện ở Hình 3.3 và Hình 3.4, cho thấy sự cải thiện rõ rệt về chất lượng điện áp khi áp dụng phương án bù công suất phản kháng. Trong trường hợp chưa thực hiện bù, điện áp tại các nút, đặc biệt là khu vực cuối xuất tuyến, có xu hướng suy giảm mạnh do ảnh hưởng của chiều dài đường dây lớn và dòng điện tải cao. Tình trạng sụt áp này không chỉ làm giảm chất lượng điện năng cung cấp cho phụ tải mà còn có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến khả năng vận hành an toàn, ổn định của các thiết bị điện phía khách hàng.

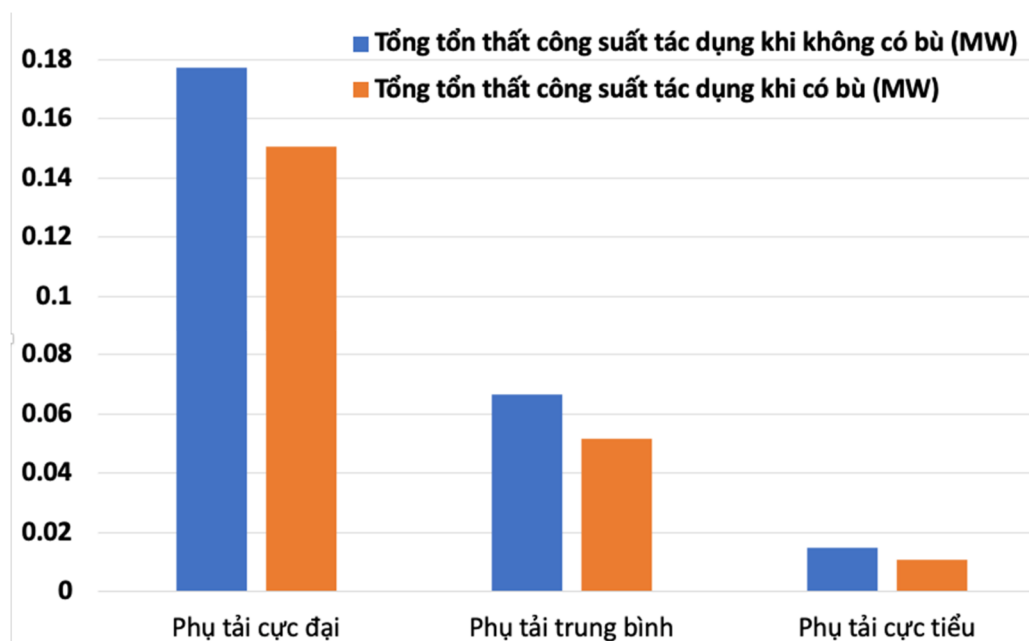
Sau khi bố trí và đưa vào vận hành các thiết bị bù công suất phản kháng theo phương án tối ưu, điện áp tại cuối xuất tuyến đã được nâng lên đáng kể và tiệm cận giá trị định mức. Các đồ thị trong Hình 3.3 và Hình 3.4 cho thấy biên độ dao động điện áp giữa các nút được thu hẹp, phân bố điện áp dọc theo xuất tuyến trở nên đồng đều hơn. Điều này chứng tỏ công suất phản kháng đã được cung cấp cục bộ cho phụ tải, làm giảm dòng công suất phản kháng truyền tải trên đường dây, từ đó hạn chế sụt áp và nâng cao chất lượng điện áp trên toàn xuất tuyến.

Bên cạnh việc cải thiện điện áp, hiệu quả của giải pháp bù công suất phản kháng còn được thể hiện rõ qua kết quả tổng hợp tổn thất công suất tác dụng trên xuất tuyến, được trình bày trong Hình 3.5. Hình này so sánh tổng tổn thất công

suất trong hai trường hợp: chưa bù và có bù, tương ứng với ba chế độ phụ tải đặc trưng là phụ tải cực đại, phụ tải trung bình và phụ tải cực tiểu. Kết quả cho thấy ở cả ba chế độ vận hành, tổng tổn thất công suất tác dụng đều giảm khi áp dụng phương án bù.

Cụ thể, ở chế độ phụ tải cực đại, khi dòng điện trong đường dây lớn, việc bù công suất phản kháng giúp giảm đáng kể dòng công suất truyền tải, qua đó làm giảm tổn thất công suất trên các phần tử đường dây và máy biến áp. Ở chế độ phụ tải trung bình, hiệu quả giảm tổn thất vẫn được duy trì ổn định, phản ánh tính phù hợp của phương án bù trong điều kiện vận hành thường xuyên của lưới điện phân phối. Đối với chế độ phụ tải cực tiểu, mặc dù tổng tổn thất công suất ban đầu không lớn, nhưng kết quả mô phỏng cho thấy tổn thất vẫn tiếp tục giảm khi có bù, đồng thời cho thấy phương án bù được lựa chọn là hợp lý, tránh được hiện tượng bù thừa gây tăng điện áp hoặc làm phát sinh tổn thất không cần thiết.

Nhìn chung, các kết quả thể hiện trong Hình 3.3, Hình 3.4 và Hình 3.5 đã chứng minh một cách rõ ràng rằng giải pháp bù công suất phản kháng không chỉ góp phần cải thiện đáng kể chất lượng điện áp, đặc biệt tại khu vực cuối xuất tuyến, mà còn làm giảm tổng tổn thất công suất tác dụng trong mọi chế độ phụ tải của lưới điện phân phối. Đây là minh chứng quan trọng cho hiệu quả kỹ thuật và tính khả thi của phương án đề xuất, đồng thời tạo cơ sở vững chắc cho việc xem xét mở rộng áp dụng giải pháp này cho các xuất tuyến khác trong thực tiễn vận hành.



Hình 3.5: Tổng tổn thất công suất tác dụng khi chưa bù và khi có bù ở các chế độ phụ tải cực đại, trung bình và cực tiểu

Bảng 3.3: Thống kê tổn thất công suất tác dụng khi chưa bù và khi có bù ở các chế độ phụ tải cực đại, trung bình và cực tiểu

Chế độ	Tổng công suất phụ tải (MW)	Tổng tổn thất công suất tác dụng khi không có bù (MW)	Tỉ lệ tổn thất (%)	Tổng tổn thất công suất tác dụng khi có bù (MW)	Tỉ lệ tổn thất (%)	Độ giảm (%)
Phụ tải cực đại	8,42087	0,17720432	2,104	0,150588876	1,788	0,316
Phụ tải trung bình	5,104	0,06638476	1,301	0,051468233	1,009	0,292
Phụ tải cực tiểu	2,464	0,01464428	0,594	0,010749461	0,436	0,158

Bảng 3.3 trình bày kết quả so sánh tỉ lệ tổn thất công suất trên xuất tuyến nghiên cứu trước và sau khi áp dụng phương án bù công suất phản kháng tối ưu trong các chế độ phụ tải khác nhau, bao gồm phụ tải cực đại, phụ tải trung bình và phụ tải cực tiểu. Các số liệu trong bảng cho thấy hiệu quả rõ rệt của giải pháp đề xuất trong việc giảm tổn thất công suất trên lưới điện phân phối.

Cụ thể, tại chế độ phụ tải cực đại – thời điểm lưới điện làm việc trong điều kiện căng thẳng nhất với dòng điện lớn và tổn thất công suất cao – tỉ lệ tổn thất công suất đã giảm từ 2,104% xuống còn 1,788% sau khi thực hiện bù công suất phản kháng. Mặc dù mức giảm tương đối không quá lớn so với các chế độ phụ tải khác, song đây lại là chế độ có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong vận hành hệ thống điện. Việc giảm tổn thất công suất ở chế độ phụ tải cực đại không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả truyền tải và phân phối điện năng mà còn giúp giảm nguy cơ quá tải đường dây và thiết bị, qua đó nâng cao độ tin cậy vận hành của lưới điện.

Ở chế độ phụ tải trung bình, kết quả tính toán cho thấy tỉ lệ tổn thất công suất giảm từ 1,301% xuống còn 1,009%. Mức giảm này phản ánh sự phù hợp của phương án bù tối ưu trong điều kiện vận hành phổ biến của lưới điện phân phối, bởi trên thực tế, lưới điện thường xuyên làm việc trong khoảng phụ tải trung bình trong phần lớn thời gian. Do đó, việc giảm tổn thất công suất ở chế độ này có ý nghĩa lớn về mặt điện năng tiết kiệm được trong cả chu kỳ vận hành dài hạn, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế – kỹ thuật của hệ thống.

Ở chế độ phụ tải cực tiểu, tỉ lệ tổn thất công suất giảm từ 0,594% xuống chỉ còn 0,436% sau khi áp dụng phương án bù công suất phản kháng. Kết quả này cho thấy việc bố trí và lựa chọn dung lượng tụ bù hợp lý không chỉ mang lại hiệu quả ở điều kiện phụ tải cao mà còn giúp cải thiện đáng kể chế độ vận hành của lưới điện trong những thời điểm phụ tải thấp. Việc giảm tổn thất công suất ở chế độ phụ tải cực tiểu đồng thời cho thấy hiện tượng bù thừa đã được hạn chế, góp phần ổn định điện áp và tránh các vấn đề kỹ thuật phát sinh trong quá trình vận hành.

Tổng hợp các kết quả phân tích từ Bảng 3.3 cho thấy phương án bù công suất phản kháng tối ưu được đề xuất đã phát huy hiệu quả trên toàn dải chế độ phụ tải của xuất tuyến nghiên cứu. Tỉ lệ tổn thất công suất đều giảm ở cả ba chế độ vận hành đặc trưng, qua đó khẳng định tính hợp lý của phương pháp tính toán cũng như khả năng ứng dụng thực tiễn của giải pháp. Đây là cơ sở quan trọng để tiếp tục xem xét mở rộng nghiên cứu và áp dụng phương án bù công suất phản kháng tối ưu cho các xuất tuyến khác trên lưới điện phân phối trong những nghiên cứu và triển khai tiếp theo.

3.4. Kết luận

Chương này đã thực hiện tính toán bù tối ưu công suất phản kháng cho xuất tuyến 472 E21.2 nhằm cực tiểu hóa tổn thất công suất tác dụng của cả xuất tuyến. Kết quả tính toán cho thấy chất lượng điện áp đã được cải thiện đáng kể và tổn thất công suất giảm được đáng kể khi thực hiện bù công suất phản kháng.

III. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Luận văn tập trung nghiên cứu bài toán giảm tổn thất công suất trên lưới điện phân phối tỉnh Điện Biên, một địa bàn có đặc thù lưới điện trải dài, phụ tải phân tán và điều kiện vận hành còn nhiều hạn chế. Trước hết, luận văn đã trình bày một cách hệ thống tổng quan về cấu trúc và hiện trạng vận hành của lưới điện phân phối tỉnh Điện Biên, làm rõ các đặc điểm về sơ đồ lưới, mức độ phát triển phụ tải, chất lượng điện áp cũng như thực trạng tổn thất điện năng trong những năm gần đây. Trên cơ sở đó, các nguyên nhân chủ yếu gây ra tổn thất công suất và điện năng trên lưới điện phân phối của tỉnh đã được phân tích, bao gồm cả các yếu tố kỹ thuật như chiều dài đường dây, tiết diện dẫn điện, phân bố phụ tải và chế độ bù công suất phản kháng chưa hợp lý.

Từ kết quả phân tích hiện trạng, luận văn đã tổng hợp và đánh giá các giải pháp kỹ thuật thường được áp dụng nhằm giảm tổn thất trên lưới điện phân phối, trong đó nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc bù công suất phản kháng hợp lý. Trên cơ sở lựa chọn đối tượng nghiên cứu cụ thể, luận văn đã tập trung vào xuất tuyến 472 E21.2 – xuất tuyến có mức tổn thất công suất lớn nhất trong khu vực nghiên cứu – để đề xuất và tính toán phương án bù công suất phản kháng tối ưu.

Để giải quyết bài toán bù tối ưu, luận văn đã ứng dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm – GA) nhằm xác định vị trí và dung lượng tụ bù tối ưu, với mục tiêu đồng thời giảm tổn thất công suất và cải thiện chất lượng điện áp trên toàn xuất tuyến. Song song với đó, phương pháp quét tiến – quét lùi (Forward/Backward Sweep) được sử dụng để tính toán phân bố điện áp và tổn thất công suất trên lưới điện hình tia, phù hợp với đặc điểm của lưới điện phân phối tỉnh Điện Biên. Việc kết hợp thuật toán tối ưu hiện đại với phương pháp tính toán công suất đặc thù cho lưới phân phối đã bảo đảm độ tin cậy và tính khả thi của các kết quả thu được.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, sau khi áp dụng phương án bù công suất phản kháng tối ưu, điện áp tại các nút trên xuất tuyến 472 E21.2 được cải thiện rõ rệt, các nút có điện áp thấp trước đây đều được nâng lên trong giới hạn cho phép theo quy định kỹ thuật. Đồng thời, tổn thất công suất tác dụng trên xuất tuyến giảm đáng kể so với phương án vận hành ban đầu, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả khai thác và vận hành lưới điện phân phối của khu vực nghiên cứu. Những kết quả này khẳng định tính đúng đắn của phương pháp tiếp cận và hiệu quả của giải pháp bù công suất phản kháng được đề xuất.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng phạm vi nghiên cứu của luận văn hiện mới dừng lại ở khía cạnh kỹ thuật. Để các giải pháp đề xuất có thể được xem xét và áp dụng một cách toàn diện trong thực tiễn, các phân tích kinh tế như chi phí đầu tư

tự bù, thời gian hoàn vốn, lợi ích kinh tế do giảm tổn thất điện năng mang lại cần được nghiên cứu bổ sung trong các công trình tiếp theo. Việc kết hợp chặt chẽ giữa phân tích kỹ thuật và đánh giá kinh tế sẽ là cơ sở quan trọng để các đơn vị quản lý, vận hành lưới điện đưa ra quyết định đầu tư hợp lý và hiệu quả hơn trong thực tế.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Eminoglu U. and Hocaoglu M.H.: ‘Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: a review and comparison study’, *Electr. Power Compon. Syst.*, 2008, 37, (1), pp. 91–110
- [2] Bompard E., Carpaneto E., Chicco G., et al: ‘Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems’, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2000, 22, (7), pp. 521–530
- [3] Augugliaro A., Dusonchet L., Favuzza S., et al: ‘A backward sweep method for power flow solution in distribution networks’, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2010, 32, (4), pp. 271–280
- [4] PGS. TS. Trần Thanh Sơn (chủ biên), TS. Đặng Thu Huyền, TS. Kiều Thị Thanh Hoa, TS. Đặng Đình Lâm, TS. Đặng Thành Trung, TS. Trần Anh Tùng, *Hệ thống điện đại cương*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, năm 2024, Mã ISBN: 978-604-357-294-0
- [5] Kumar KV, Singh T, Naresh R. Optimal capacitor placement for real power loss minimization in distribution systems using genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012;42(1):330-337.
- [6] Juan Miguel Lujano Rojas, Rodolfo Dufo Lopez, Jose Antonio Dominguez Navarro, *Genetic Optimization Techniques for Sizing and Management of Modern Power Systems*, Elsevier, 1st Edition - September 29, 2022, ISBN: 9780128238899

PHỤ LỤC 1:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC ĐẠI KHI CHƯA CÓ BÙ
CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,0000000000000 + 0,00000000000000i	23,0000	0,0000
2	22,9433135770358 + 0,00394267626408088i	22,9433	0,0098
3	22,9215808370100 - 0,00630069745698316i	22,9216	-0,0157
4	22,8693175255292 - 0,0309014213559375i	22,8693	-0,0774
5	22,8110799591079 - 0,0584506602425850i	22,8112	-0,1468
6	22,8001551440946 - 0,0577182831661600i	22,8002	-0,1450
7	22,7737131977458 - 0,0702266650756800i	22,7738	-0,1767
8	22,6908512580941 - 0,109625698538620i	22,6911	-0,2768
9	22,6839472617628 - 0,112908415533195i	22,6842	-0,2852
10	22,6569139778329 - 0,125809079596622i	22,6573	-0,3181
11	22,6437878788305 - 0,132120579740181i	22,6442	-0,3343
12	22,5913657702006 - 0,157334153116868i	22,5919	-0,3990
13	22,5849424226953 - 0,160440050060023i	22,5855	-0,4070
14	22,5656756990182 - 0,169756503559850i	22,5663	-0,4310
15	22,5335741402747 - 0,185278803170000i	22,5343	-0,4711
16	22,5158367017585 - 0,193696760764061i	22,5167	-0,4929
17	22,5025383415640 - 0,200008477786986i	22,5034	-0,5092
18	22,4894527321594 - 0,206207593448443i	22,4904	-0,5253
19	22,4808471146918 - 0,210298827161275i	22,4818	-0,5360
20	22,4641539116850 - 0,218220975662697i	22,4652	-0,5566
21	22,4357348509601 - 0,231529965602783i	22,4369	-0,5913
22	22,4283009682100 - 0,235042750657829i	22,4295	-0,6004
23	22,3983574438930 - 0,249135788990866i	22,3997	-0,6373
24	22,3928770390459 - 0,251767215411764i	22,3943	-0,6442
25	22,3819195614535 - 0,257028905056343i	22,3834	-0,6579
26	22,3754758128183 - 0,260109651282754i	22,3770	-0,6660

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
27	22,3705196823896 - 0,262470244069243i	22,3721	-0,6722
28	22,3593146977537 - 0,267824285873324i	22,3609	-0,6863
29	22,3407433049038 - 0,276675988737410i	22,3425	-0,7095
30	22,3295829085395 - 0,282011609748336i	22,3314	-0,7236
31	22,3239100254442 - 0,284698789439711i	22,3257	-0,7307
32	22,3118113597687 - 0,290435959113903i	22,3137	-0,7458
33	22,3005217149467 - 0,295789434279680i	22,3025	-0,7599
34	22,2915668214064 - 0,300069629309633i	22,2936	-0,7712
35	22,2826137658475 - 0,304348756995394i	22,2847	-0,7825
36	22,2773917923792 - 0,306844578791031i	22,2795	-0,7891
37	22,2736621814064 - 0,308627158619892i	22,2758	-0,7938
38	22,2711931539735 - 0,308471489423117i	22,2733	-0,7935
39	22,2644818578701 - 0,311679303627513i	22,2667	-0,8020
40	22,2585594720503 - 0,314514922660281i	22,2608	-0,8095
41	22,2546206184963 - 0,316458146364525i	22,2569	-0,8147
42	22,2454323952453 - 0,320991493085678i	22,2477	-0,8267
43	22,2238675191875 - 0,331697829790443i	22,2263	-0,8551
44	22,2171849943517 - 0,335008124594341i	22,2197	-0,8639
45	22,2021607032069 - 0,342576749174296i	22,2048	-0,8840
46	22,1925364165339 - 0,347576203259784i	22,1953	-0,8973
47	22,1872194730389 - 0,350333734648367i	22,1900	-0,9046
48	22,1749399637368 - 0,356726727295137i	22,1778	-0,9216
49	22,1710120640708 - 0,358638797659749i	22,1739	-0,9267
50	22,1674260965873 - 0,360384433434444i	22,1704	-0,9314
51	22,1629867540683 - 0,362545463143599i	22,1660	-0,9372
52	22,1618267792605 - 0,363106303971894i	22,1648	-0,9387
53	22,1578432446400 - 0,364630205215937i	22,1608	-0,9428
54	22,1536197161476 - 0,366275380530450i	22,1566	-0,9472
55	22,1480826103785 - 0,368618052396267i	22,1511	-0,9535
56	22,1413211297187 - 0,371624332289415i	22,1444	-0,9616

PHỤ LỤC 2:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI TRUNG BÌNH KHI CHƯA CÓ BÙ
CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,0000000000000 + 0,00000000000000i	23,0000	0,0000
2	22,9655473456340 + 0,00306841911405547i	22,9655	0,0077
3	22,9521680504719 - 0,00288674532615837i	22,9522	-0,0072
4	22,9200233560665 - 0,0172065751080233i	22,9200	-0,0430
5	22,8840940665950 - 0,0331683171522605i	22,8841	-0,0830
6	22,8774396360509 - 0,0325627041135565i	22,8775	-0,0816
7	22,8611263685626 - 0,0398097681045423i	22,8612	-0,0998
8	22,8098637798041 - 0,0625424896183887i	22,8099	-0,1571
9	22,8055925702637 - 0,0644365393660676i	22,8057	-0,1619
10	22,7888034834967 - 0,0718367587199943i	22,7889	-0,1806
11	22,7806267291705 - 0,0754411883572132i	22,7808	-0,1897
12	22,7479673401715 - 0,0898379916847430i	22,7481	-0,2263
13	22,7439555518705 - 0,0916050393226426i	22,7441	-0,2308
14	22,7319219557080 - 0,0969052815849571i	22,7321	-0,2442
15	22,7118726455200 - 0,105736505329021i	22,7121	-0,2667
16	22,7007796400756 - 0,110508277419096i	22,7010	-0,2789
17	22,6924626657812 - 0,114086007942504i	22,6927	-0,2881
18	22,6842873416874 - 0,117604867300362i	22,6846	-0,2970
19	22,6789067031317 - 0,119924681433517i	22,6792	-0,3030
20	22,6684627691135 - 0,124411097100396i	22,6688	-0,3145
21	22,6507152873167 - 0,131960751181556i	22,6511	-0,3338
22	22,6460649307948 - 0,133948685489873i	22,6465	-0,3389
23	22,6273333635571 - 0,141920878282269i	22,6278	-0,3594
24	22,6238857870827 - 0,143397743714698i	22,6243	-0,3632
25	22,6169924829678 - 0,146350669359175i	22,6175	-0,3707
26	22,6129456897233 - 0,148083594329086i	22,6134	-0,3752

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
27	22,6098524328917 - 0,149423478737410i	22,6103	-0,3786
28	22,6028831449190 - 0,152478164010940i	22,6034	-0,3865
29	22,5913206679965 - 0,157519015591152i	22,5919	-0,3995
30	22,5843559283767 - 0,160546770927351i	22,5849	-0,4073
31	22,5808429036567 - 0,162088661790936i	22,5814	-0,4113
32	22,5733474552849 - 0,165378608038145i	22,5740	-0,4198
33	22,5663532568383 - 0,168448549824322i	22,5670	-0,4277
34	22,5607981725886 - 0,170898340090615i	22,5614	-0,4340
35	22,5552442639199 - 0,173347536987091i	22,5559	-0,4403
36	22,5520049340955 - 0,174776076206850i	22,5527	-0,4440
37	22,5496913524175 - 0,175796373061916i	22,5504	-0,4467
38	22,5481846572251 - 0,175655101729681i	22,5489	-0,4463
39	22,5440213709095 - 0,177491108258593i	22,5447	-0,4511
40	22,5403435627674 - 0,179111568579722i	22,5411	-0,4553
41	22,5378799562960 - 0,180211479471790i	22,5386	-0,4581
42	22,5321328347284 - 0,182777318018680i	22,5329	-0,4648
43	22,5186141385712 - 0,188818542333947i	22,5194	-0,4804
44	22,5144275529970 - 0,190687829192451i	22,5152	-0,4853
45	22,5048755821457 - 0,194872243533660i	22,5057	-0,4961
46	22,4986136030845 - 0,197546870794207i	22,4995	-0,5031
47	22,4952909920209 - 0,199112726266080i	22,4962	-0,5071
48	22,4876774784480 - 0,202783580971233i	22,4886	-0,5167
49	22,4852179741399 - 0,203862376827634i	22,4861	-0,5195
50	22,4829725543906 - 0,204847256421945i	22,4839	-0,5220
51	22,4801928104753 - 0,206066520151332i	22,4811	-0,5252
52	22,4794425606930 - 0,206366808260753i	22,4804	-0,5260
53	22,4768824560593 - 0,207139351699142i	22,4778	-0,5280
54	22,4741383547887 - 0,207951145555909i	22,4751	-0,5301
55	22,4703847529457 - 0,208995829607753i	22,4714	-0,5329
56	22,4656257458606 - 0,210211906893906i	22,4666	-0,5361

PHỤ LỤC 3:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC TIỂU KHI CHƯA CÓ BÙ
CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,0000000000000 + 0,00000000000000i	23,0000	0,0000
2	22,9836953623342 + 0,00106608124535878i	22,9837	0,0027
3	22,9774569011501 - 0,00190331382733160i	22,9775	-0,0047
4	22,9624576129549 - 0,00903556749855541i	22,9625	-0,0225
5	22,9457224668907 - 0,0170041837759727i	22,9457	-0,0425
6	22,9425788514821 - 0,0168015213896352i	22,9426	-0,0420
7	22,9349815481853 - 0,0204201616336085i	22,9350	-0,0510
8	22,9111506974803 - 0,0317977664477434i	22,9112	-0,0795
9	22,9091650946685 - 0,0327457202460531i	22,9092	-0,0819
10	22,9013715896717 - 0,0364572972869626i	22,9014	-0,0912
11	22,8975772879121 - 0,0382655775517002i	22,8976	-0,0958
12	22,8824224807687 - 0,0454883135312309i	22,8825	-0,1139
13	22,8805619988096 - 0,0463754661855400i	22,8806	-0,1161
14	22,8749815096941 - 0,0490365619053787i	22,8750	-0,1228
15	22,8656838982580 - 0,0534705088800659i	22,8657	-0,1340
16	22,8606150081072 - 0,0559174415482411i	22,8607	-0,1401
17	22,8568145950285 - 0,0577520606002024i	22,8569	-0,1448
18	22,8530793401978 - 0,0595565385693527i	22,8532	-0,1493
19	22,8506193337233 - 0,0607448611692346i	22,8507	-0,1523
20	22,8458479481756 - 0,0630455680973008i	22,8459	-0,1581
21	22,8378120485716 - 0,0669658717898774i	22,8379	-0,1680
22	22,8357044086142 - 0,0679962442320898i	22,8358	-0,1706
23	22,8272502445715 - 0,0721524919995340i	22,8274	-0,1811
24	22,8256911908762 - 0,0729197728648674i	22,8258	-0,1830
25	22,8225740197321 - 0,0744539813691682i	22,8227	-0,1869
26	22,8207419675254 - 0,0753529148236834i	22,8209	-0,1892

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
27	22,8193334449844 - 0,0760417362615026i	22,8195	-0,1909
28	22,8161377759291 - 0,0775957895427145i	22,8163	-0,1949
29	22,8108216512613 - 0,0801511947087499i	22,8110	-0,2013
30	22,8076168784319 - 0,0816845042792591i	22,8078	-0,2052
31	22,8059980983988 - 0,0824632379930041i	22,8061	-0,2072
32	22,8025444661212 - 0,0841249501895231i	22,8027	-0,2114
33	22,7993218762256 - 0,0856755954226205i	22,7995	-0,2153
34	22,7967777401576 - 0,0869225817177169i	22,7969	-0,2185
35	22,7942341270486 - 0,0881692575372973i	22,7944	-0,2216
36	22,7927505675227 - 0,0888964083371390i	22,7929	-0,2235
37	22,7916909834327 - 0,0894157550812803i	22,7919	-0,2248
38	22,7909857673410 - 0,0893782812387716i	22,7912	-0,2247
39	22,7890790507192 - 0,0903128387920360i	22,7893	-0,2271
40	22,7873948622410 - 0,0911378415245276i	22,7876	-0,2292
41	22,7862641639509 - 0,0916955643310871i	22,7864	-0,2306
42	22,7836264446033 - 0,0929965926104216i	22,7838	-0,2339
43	22,7774126113808 - 0,0960533993524413i	22,7776	-0,2416
44	22,7754932105238 - 0,0970025221188958i	22,7757	-0,2440
45	22,7711267519715 - 0,0991380082456331i	22,7713	-0,2494
46	22,7682987323920 - 0,100528118212598i	22,7685	-0,2530
47	22,7666972777919 - 0,101268479580804i	22,7669	-0,2549
48	22,7630115500152 - 0,102993594353603i	22,7632	-0,2592
49	22,7618864281741 - 0,103543248027427i	22,7621	-0,2606
50	22,7608592517173 - 0,104045058154853i	22,7611	-0,2619
51	22,7595876493872 - 0,104666291529297i	22,7598	-0,2635
52	22,7592432656476 - 0,104819477830985i	22,7595	-0,2639
53	22,7580623323953 - 0,105224608017857i	22,7583	-0,2649
54	22,7568090203632 - 0,105661401847957i	22,7571	-0,2660
55	22,7551130472137 - 0,106242739478938i	22,7554	-0,2675
56	22,7530384325611 - 0,106990525873253i	22,7533	-0,2694

PHỤ LỤC 4:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC ĐẠI KHI CÓ BÙ CÔNG SUẤT
PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,00000000000000 + 0,000000000000000i	23	0
2	22,9480674600167 - 0,00482573642483553i	22,94806797	-0,0120487
3	22,9299373196774 - 0,0173539028996134i	22,92994389	-0,0433628
4	22,8863314770517 - 0,0474443551453995i	22,88638065	-0,1187765
5	22,8376114234326 - 0,0810221748728887i	22,83775515	-0,2032703
6	22,8275744780962 - 0,0819231069982128i	22,82772148	-0,205621
7	22,8052562726853 - 0,0970381182833741i	22,80546272	-0,2437965
8	22,7353050486897 - 0,144593702318042i	22,73576484	-0,3643891
9	22,7294532746977 - 0,148540404863972i	22,72993864	-0,3744312
10	22,7064927941994 - 0,164008448695253i	22,7070851	-0,4138388
11	22,6953550999265 - 0,171573054065634i	22,69600362	-0,4331382
12	22,6506427919123 - 0,201636895608896i	22,65154026	-0,5100358
13	22,6451592001235 - 0,205333598156739i	22,64609011	-0,5195117
14	22,6286812399365 - 0,216402091492048i	22,62971596	-0,547913
15	22,6011428560830 - 0,234787778522836i	22,60236235	-0,5951852
16	22,5861101379146 - 0,244909288679969i	22,58743792	-0,6212543
17	22,5747715919942 - 0,252452574674930i	22,57618313	-0,6407092
18	22,5635919086664 - 0,259848208538310i	22,5650881	-0,659804
19	22,5562005941535 - 0,264699887639323i	22,55775368	-0,6723424
20	22,5419144949768 - 0,274131333910835i	22,54358128	-0,6967374
21	22,5177356692029 - 0,290103766342658i	22,51960435	-0,7381205
22	22,5114165621119 - 0,294316692615510i	22,51334044	-0,7490485
23	22,4859880221415 - 0,311245718527453i	22,48814201	-0,793024
24	22,4814006174142 - 0,314440711840177i	22,4835995	-0,8013269
25	22,4721270758809 - 0,320760599112843i	22,47441618	-0,8177677
26	22,4666525403678 - 0,324449333365023i	22,46899517	-0,8273723
27	22,4624859568768 - 0,327307083343430i	22,46487047	-0,8348135

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
28	22,4531534928432 - 0,333843725986327i	22,45563523	-0,851837
29	22,4377667662673 - 0,344709666704881i	22,44041448	-0,8801614
30	22,4284993201401 - 0,351241328623709i	22,43124946	-0,8972067
31	22,4238090166112 - 0,354550125469619i	22,4266118	-0,9058467
32	22,4137134965633 - 0,361550290238185i	22,41662935	-0,9241445
33	22,4042457486229 - 0,368050198927637i	22,40726865	-0,9411531
34	22,3968194027762 - 0,373295938101195i	22,39993012	-0,9548812
35	22,3893642147421 - 0,378519776353868i	22,39256366	-0,9685634
36	22,3849802020437 - 0,381542347862616i	22,38823158	-0,9764873
37	22,3818150409439 - 0,383677993890302i	22,38510338	-0,9820909
38	22,3795312017080 - 0,383857675084884i	22,38282296	-0,982651
39	22,3737591915191 - 0,387648833806458i	22,37711715	-0,9926101
40	22,3686374625594 - 0,390979995611699i	22,37205416	-1,0013673
41	22,3652511644740 - 0,393266122423118i	22,36870845	-1,0073738
42	22,3573283513206 - 0,398583331847022i	22,36088101	-1,021353
43	22,3387178498015 - 0,411118385972292i	22,34250061	-1,0543438
44	22,3329150641708 - 0,414970927358454i	22,33677005	-1,0644982
45	22,3199065933620 - 0,423783911711724i	22,32392938	-1,0877336
46	22,3116158405944 - 0,429608743780296i	22,3157515	-1,1030903
47	22,3073950860612 - 0,433067474444899i	22,3115984	-1,1121793
48	22,2976602093305 - 0,441088525692131i	22,30202255	-1,1332676
49	22,2947890780993 - 0,443687654910895i	22,29920355	-1,1400904
50	22,2920962450257 - 0,446011518576719i	22,29655761	-1,1461986
51	22,2887182741456 - 0,448858055599399i	22,29323745	-1,1536866
52	22,2878875332416 - 0,449633527742492i	22,2924225	-1,1557223
53	22,2850836383830 - 0,452121971599344i	22,28966951	-1,162263
54	22,2819594779632 - 0,454660937220990i	22,28659765	-1,1689519
55	22,2778296044396 - 0,458145777729602i	22,28254001	-1,1781273
56	22,2727309814734 - 0,462498976779844i	22,27753242	-1,1895906

PHỤ LỤC 5:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI TRUNG BÌNH KHI CÓ BÙ CÔNG
SUẤT PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,00000000000000 + 0,000000000000000i	23	0
2	22,9702012635444 - 0,00565095697512370i	22,97020196	-0,014095479
3	22,9603770333687 - 0,0138933710120796i	22,96038124	-0,034669789
4	22,9367749787397 - 0,0337088521813713i	22,93679975	-0,084204234
5	22,9102334988590 - 0,0557060869778989i	22,91030122	-0,139314049
6	22,9044471342005 - 0,0567242521447744i	22,90451737	-0,141896182
7	22,8921991662592 - 0,0665817261493085i	22,89229599	-0,166643716
8	22,8536620576815 - 0,0974829856422391i	22,85386997	-0,244395396
9	22,8504277244895 - 0,100042149382773i	22,85064672	-0,250846784
10	22,8376510841847 - 0,110014463512993i	22,83791607	-0,276005429
11	22,8314330696380 - 0,114874261575922i	22,83172206	-0,288276027
12	22,8063659244122 - 0,134131876724987i	22,80676036	-0,336971785
13	22,8032794446617 - 0,136491076114044i	22,80368793	-0,342944936
14	22,7939914226103 - 0,143547626970939i	22,79444342	-0,3608216
15	22,7784337374954 - 0,155250024055966i	22,7789628	-0,390502416
16	22,7700037266028 - 0,161727865275917i	22,77057807	-0,406946279
17	22,7636156591269 - 0,166539671856599i	22,76422486	-0,419171112
18	22,7573157758214 - 0,171257716712366i	22,75796016	-0,431165048
19	22,7531295735388 - 0,174340128156726i	22,75379748	-0,439005897
20	22,7450535794647 - 0,180339493574535i	22,7457685	-0,454273511
21	22,7314770967001 - 0,190557134845239i	22,7322758	-0,480297158
22	22,7279232605109 - 0,193246388158659i	22,72874479	-0,487151224
23	22,7136323352219 - 0,204058968135535i	22,71454895	-0,514730666
24	22,7110636160804 - 0,206099522342752i	22,71199876	-0,5199364
25	22,7058266598611 - 0,210112074173568i	22,70679879	-0,530180718
26	22,7027328825835 - 0,212454057715035i	22,70372694	-0,536163007
27	22,7004160897436 - 0,214291384558814i	22,70142752	-0,540854722

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
28	22,6952886671206 - 0,218528294419609i	22,69634072	-0,551672298
29	22,6868590118317 - 0,225581728501932i	22,68798049	-0,569689045
30	22,6817561913053 - 0,229804826992069i	22,68292032	-0,580483984
31	22,6792094816668 - 0,231967676833326i	22,68039576	-0,586012728
32	22,6736831847564 - 0,236520438706797i	22,67491678	-0,597659025
33	22,6684795196365 - 0,240737279159371i	22,66975779	-0,608453317
34	22,6644273181452 - 0,244151918556003i	22,66574234	-0,617193332
35	22,6603458527230 - 0,247545550025107i	22,66169793	-0,625884141
36	22,6579299351628 - 0,249501177429911i	22,6593036	-0,630895529
37	22,6561706823856 - 0,250875262420597i	22,65755963	-0,63441905
38	22,6548436757499 - 0,251066974995359i	22,65623483	-0,634941003
39	22,6516020736020 - 0,253488710725616i	22,6530204	-0,641156727
40	22,6487096415759 - 0,255607233131422i	22,65015195	-0,646597275
41	22,6467883597954 - 0,257051550626194i	22,64824714	-0,650305743
42	22,6422829767784 - 0,260405102920084i	22,64378036	-0,65892011
43	22,6316633860635 - 0,268284452729447i	22,6332535	-0,679174421
44	22,6283396464804 - 0,270699431979895i	22,62995876	-0,68538812
45	22,6207662291474 - 0,276135636359383i	22,62245158	-0,699384829
46	22,6158147496259 - 0,279640062981636i	22,61754353	-0,708414846
47	22,6135711348424 - 0,281903842485105i	22,61532819	-0,714219956
48	22,6084619005300 - 0,287195046306513i	22,61028594	-0,727788521
49	22,6070439561312 - 0,288954169380246i	22,60889053	-0,732291799
50	22,6056784253239 - 0,290512306865004i	22,60754508	-0,736284597
51	22,6039440517929 - 0,292411655651452i	22,60583534	-0,741154695
52	22,6035185578073 - 0,292924288992159i	22,60541652	-0,742467859
53	22,6021229710511 - 0,294649235712975i	22,60404347	-0,746885654
54	22,6004636825935 - 0,296344921486847i	22,60240649	-0,751238581
55	22,5981001172850 - 0,298520032132288i	22,60007175	-0,756831019
56	22,5949851677730 - 0,301070266975839i	22,59699091	-0,763401026

PHỤ LỤC 6:
ĐIỆN ÁP CÁC NÚT Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI CỰC TIỂU KHI CÓ BÙ CÔNG
SUẤT PHẢN KHÁNG

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
1	23,00000000000000 + 0,000000000000000i	23	0
2	22,9882548481129 - 0,00760661169818209i	22,98825611	-0,0189587
3	22,9855264463132 - 0,0128654639803148i	22,98553005	-0,0320696
4	22,9789611131229 - 0,0254986773261589i	22,97897526	-0,0635784
5	22,9714907346742 - 0,0395089824174328i	22,97152471	-0,0985437
6	22,9691964359329 - 0,0409209766127290i	22,96923289	-0,1020757
7	22,9656089653848 - 0,0471533328975552i	22,96565737	-0,1176404
8	22,9543271832820 - 0,0667100012843807i	22,95442412	-0,1665129
9	22,9533638385326 - 0,0683240455798364i	22,95346553	-0,1705488
10	22,9495249322879 - 0,0746117909661538i	22,94964622	-0,1862751
11	22,9476607992422 - 0,0776774044460949i	22,94779227	-0,1939444
12	22,9399849551028 - 0,0897699549529152i	22,9401606	-0,2242117
13	22,9390357920704 - 0,0912504067180123i	22,93921729	-0,2279187
14	22,9361590484647 - 0,0956714297645438i	22,93635858	-0,2389911
15	22,9312837583311 - 0,102983095557894i	22,931515	-0,2573104
16	22,9288370466795 - 0,107138371060634i	22,92908736	-0,267721
17	22,9269352947963 - 0,110209245888300i	22,92720018	-0,2754174
18	22,9250457043085 - 0,113215205721961i	22,92532526	-0,2829526
19	22,9237606973054 - 0,115167940370339i	22,92404999	-0,287849
20	22,9213188747232 - 0,118984719971995i	22,9216277	-0,2974201
21	22,9173860633388 - 0,125577062306705i	22,91773011	-0,3139522
22	22,9163569761412 - 0,127309805104423i	22,9167106	-0,3182984
23	22,9122701107725 - 0,134310421343521i	22,91266377	-0,3358607
24	22,9115758071040 - 0,135641598654067i	22,91197732	-0,3391997
25	22,9100874449462 - 0,138236753104033i	22,91050449	-0,3457117
26	22,9091923160445 - 0,139745695945160i	22,90961854	-0,349499
27	22,9085474914969 - 0,140932275774553i	22,90898099	-0,3524764

Nút	Điện áp phức (kV)	Mô đun U (kV)	Góc pha điện áp (độ)
28	22,9071641159547 - 0,143668479304847i	22,90761464	-0,3593413
29	22,9049307728828 - 0,148235556231420i	22,90541044	-0,3708002
30	22,9035578268367 - 0,150963889014563i	22,90405534	-0,3776474
31	22,9028898684012 - 0,152363184889451i	22,90339667	-0,3811588
32	22,9013729903940 - 0,155287799210720i	22,90189947	-0,3885007
33	22,8999110534574 - 0,157985905583862i	22,90045602	-0,3952759
34	22,8988451406147 - 0,160197379659448i	22,89940549	-0,4008274
35	22,8977495478393 - 0,162388447555356i	22,89832536	-0,4063289
36	22,8970754315795 - 0,163643041737740i	22,89766019	-0,4094801
37	22,8965604644944 - 0,164516795579532i	22,8971515	-0,4116756
38	22,8960297003484 - 0,164809965862504i	22,89662286	-0,4124188
39	22,8950277904441 - 0,166332191968206i	22,89563198	-0,4162461
40	22,8941142869744 - 0,167657283742391i	22,89472817	-0,4195787
41	22,8935158820582 - 0,168560628300426i	22,89413641	-0,4218504
42	22,8920966891985 - 0,170652466199202i	22,89273276	-0,4271118
43	22,8887274718595 - 0,175554942007525i	22,88940071	-0,439446
44	22,8876542549650 - 0,177052498815566i	22,88833906	-0,4432153
45	22,8852278606132 - 0,180445702110423i	22,88593924	-0,451757
46	22,8836845422836 - 0,182669156195294i	22,88441361	-0,4573542
47	22,8831457473786 - 0,184105041340354i	22,88388634	-0,46096
48	22,8819267365111 - 0,187444846468918i	22,88269448	-0,4693468
49	22,8818280973159 - 0,188669809697404i	22,88260591	-0,4724159
50	22,8816676804594 - 0,189741187864373i	22,88245436	-0,4751017
51	22,8814255894703 - 0,191038491921989i	22,88222307	-0,478355
52	22,8814012240955 - 0,191402317586476i	22,88220175	-0,4792665
53	22,8813684302749 - 0,192750222999534i	22,88218027	-0,4826422
54	22,8811835714382 - 0,194062942956295i	22,88200651	-0,4859329
55	22,8808556411112 - 0,195764994303214i	22,88169309	-0,4902017
56	22.8803971918006 - 0.197836010754790i	22.88125247	-0.4953973