

GIẢI PHÁP NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỆN NĂNG CHO CÁC PHỤ TẢI CÔNG NGHIỆP

A SOLUTION TO ENHANCE ELECTRICAL POWER QUALITY FOR INDUSTRIAL LOADS

Nguyễn Tiến Dũng, Nguyễn Ngọc Trung, Bùi Thị Duyên

Trường Đại Học Điện Lực

Ngày nhận bài: 30/05/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/07/2024, Phản biện: TS. Đào Thị Mai Phương

Tóm tắt:

Bài báo trình bày phương pháp bù phân tán điều khiển tập trung kết hợp lọc sóng hài và cân bằng pha nhằm nâng cao chất lượng điện năng cho lưới điện. Giải pháp áp dụng hiệu quả cho các phụ tải công nghiệp sử dụng động cơ ba pha công suất lớn. Thông qua việc phân tích các yếu tố liên quan đến chất lượng điện năng, các giải pháp nâng cao chất lượng điện áp, bài báo đề xuất sử dụng giải pháp bù phân tán điều khiển tập trung trong đó có xét đến yếu tố cải thiện hiệu suất của động cơ trong hệ thống. Hệ thống bù đề xuất bao gồm các bộ bù phân tán tại mỗi phụ tải cùng với một bộ bù trung tâm được điều khiển bởi một bộ điều khiển duy nhất. Bài báo đề xuất chiến lược nâng cao chất lượng điện áp sử dụng hỗn hợp các phương pháp cân bằng pha, lọc sóng hài bậc cao và bù lai công suất phản kháng giúp tối ưu hóa tổn thất công suất tác dụng của toàn nhà máy, nâng cao chất lượng điện áp cho hệ thống. Qua kết quả mô phỏng và thực nghiệm chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của giải pháp đề xuất.

Từ khóa:

Động cơ không đồng bộ ba pha, Dao động điện áp, Công suất phản kháng, Bù công suất phản kháng

Abstract:

This paper proposes a novel distributed compensation method with centralized control for harmonic filtering and phase balancing, aiming to enhance power quality in power grids. The proposed solution is particularly well-suited for industrial applications employing large three-phase induction motors. Through a comprehensive analysis of power quality factors and voltage enhancement strategies, the paper advocates for a distributed compensation approach with centralized control, emphasizing concomitant improvements in motor performance within the system. The proposed compensation system comprises distributed compensators at each load, coordinated by a central compensator governed by a single controller. The paper outlines a strategy for enhancing voltage quality that utilizes a combination of phase balancing, high-order harmonic filtering, and hybrid reactive power compensation. This strategy aims to optimize total active power losses across the entire facility and elevate the system's voltage quality. The effectiveness and applicability of the proposed solution are validated through simulation and experimental results.

Keywords:

3-phase induction motors, Voltage variation, Reactive power, Reactive power compensator.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hiện nay, giải pháp tiết kiệm năng lượng là một thách thức cho các nhà khoa học trong và ngoài nước. Giải pháp nâng cao chất lượng điện năng và tăng hiệu năng làm việc của các thiết bị sản xuất, truyền tải, phân phối điện luôn là giải pháp nổi bật [1-2]. Bài toán chất lượng điện năng bao gồm các bài toán liên quan đến chất lượng điện áp (CLĐA) và chất lượng tần số [3], trong đó chất lượng tần số được quản lý bởi trung tâm điều độ hệ thống điện quốc gia. Bài báo đề xuất nghiên cứu, phân tích CLĐA do các phụ tải gây ra và tác động ngược trở lại lưới. Với quy mô sản xuất càng lớn, thiết bị sử dụng càng hiện đại thì hậu quả của CLĐA xấu (sụt áp, tần số không ổn định, xuất hiện sóng hài bậc cao, gián đoạn cung cấp điện,...) càng bị ảnh hưởng nghiêm trọng. Cải thiện CLĐA ổn định sẽ giúp cho các thiết bị điện hoạt động với hiệu suất cao, giảm tổn thất, nâng cao tuổi thọ của các thiết bị thì cần có sự phối hợp của các bên cung cấp điện và tiêu thụ điện. Bài toán này thường tập trung vào xét các yếu tố chính của CLĐA sau: (1) Độ lệch điện áp so với định mức, (2) Độ không đối xứng điện áp của hệ thống ba pha, (3) Độ không sin điện áp [4-5]. toán mẫu chốt của việc giảm tổn thất, nâng cao tuổi thọ thiết bị.

Với lưới điện phân phối, sản lượng điện tiêu thụ trong các nhà máy, khu công nghiệp lớn. Phụ tải các động cơ điện không đồng bộ, chiếm khoảng 60% trên tổng số lượng phụ tải nhưng lại tiêu thụ khoảng 70% sản lượng điện hàng năm. Qua đó có thể thấy, ĐC-KĐB là thành phần phụ tải chính trong các nhà máy [6-7] do đó bài báo đề xuất tải là các động cơ không đồng bộ ba pha và áp dụng đường cong Nema để tối ưu toàn diện tổn hao năng lượng có xét đến hiệu suất của tải động cơ. Giải quyết được bài toán CLĐA cho loại phụ tải này không chỉ giúp cho việc nâng cao hiệu quả các dây

chuyền sản xuất, còn giúp nhà máy tiết kiệm điện và phát triển năng lượng bền vững cho xã hội.

Để nâng cao chất lượng điện áp, có nhiều phương thức điều chỉnh điện áp nhưng các phương pháp thường được lựa chọn là lọc sóng hài, cân bằng pha và bù công suất phản kháng [4]. Trong đó, phương pháp bù công suất phản kháng chính xác và hợp lý sẽ giúp giảm đáng kể lượng tổn thất công suất tác dụng trên các thiết bị điện [4-5] từ đó làm giảm thiểu tổn thất điện năng trên lưới. Khi triển khai vị trí các thiết bị bù trong hệ thống lưới điện thường chia ra các loại như sau: bù tập trung phía cao áp và hạ áp, bù phân tán theo nhóm phía hạ áp, bù phân tán tại từng phụ tải phía hạ áp. Hệ thống bù có thể chia làm hai giải pháp bù tập trung và bù phân tán [8] với phương thức điều khiển tập trung hoặc điều khiển phân tán tại từng vị trí. Mỗi giải pháp đều có ưu nhược điểm riêng được trình bày trong mục 2.2.

Bài báo đề xuất giải pháp điều chỉnh điện áp dựa trên bù công suất phản kháng dạng phân tán điều khiển tập trung để tối ưu hóa toàn diện hoạt động của lưới điện. Bài báo tập trung tìm cách xác định lượng bù công suất phản kháng tốt nhất để giảm tổn thất đối với hệ thống gồm tải là các động cơ không đồng bộ dựa trên phương pháp tìm cực trị hoặc phương pháp Lagrange.

Trình tự tiếp theo của bài báo được trình bày bao gồm: Mục 2 là phương pháp bù công suất phản kháng và giải pháp lắp đặt các thiết bị bù công suất phản kháng. Mục 3 đề xuất sơ đồ điện của một nhà máy sử dụng nhiều động cơ không đồng bộ và áp dụng giải pháp đề xuất, thuật toán xử lý, kết quả tính toán và so sánh với các công bố khác được trình bày trong mục này. Mục 4 là kết luận của bài báo.

2. PHƯƠNG PHÁP BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

2.1. Phương pháp bù công suất phản kháng

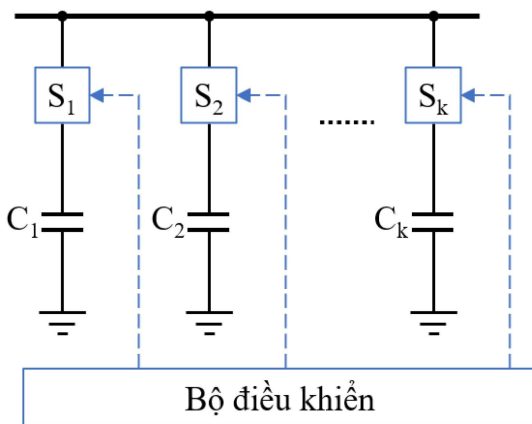
Có nhiều phương pháp bù công suất phản kháng (CSPK) khác nhau [9] [10] thường chia thành ba loại chính như sau:

2.1.1. Bù bằng máy bù đồng bộ

Phương pháp này có thể điều chỉnh trơn công suất bù và có thể bù dương hoặc âm. Tuy nhiên, nhược điểm của giải pháp này là thiết bị cồng kềnh, ồn, chi phí bảo dưỡng, sửa chữa lớn, giá thành cao, tổn thất công suất lớn.

2.1.2. Bù tĩnh đóng cắt theo bậc

Đây là phương pháp được thực hiện bằng cách đóng cắt các tụ điện tùy theo phụ tải điện nhằm thay đổi lượng công suất bù [9]. Sơ đồ nguyên lý của phương pháp được trình bày như trong Hình 1, trong đó $S_1, S_2, \dots, S_k$ là các chuyển mạch có điều khiển. Ưu điểm của phương án này là thiết bị đơn giản, giá thành thấp. Nên phương án bù công suất phản kháng này phổ biến nhất trên toàn thế giới. Nhược điểm: tốc độ phản ứng rất chậm; thiết bị không thể điều chỉnh trơn công suất phản kháng theo đúng yêu cầu của phụ tải.



Hình 1. Bù tĩnh đóng cắt theo bậc

Do tốc độ phản ứng chậm nên thiết bị này chưa thực sự hiệu quả trong việc điều chỉnh điện áp theo sự biến thiên của phụ tải.

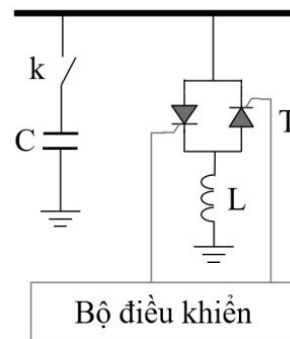
2.1.3. Sử dụng các thiết bị bù công suất phản ứng nhanh (FACTS)

Thiết bị FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) có khả năng điều khiển các thông số cơ bản của hệ thống: dòng điện, điện áp, góc pha; với thời gian tác động cực nhanh, chiếm ít diện tích lắp đặt và chi phí thấp, đó là các thiết bị [11-12].

Thiết bị FACTS có khả năng điều khiển linh hoạt và tốc độ đáp ứng nhanh khi hệ thống thay đổi. Các thiết bị này có tác dụng để giảm nhấp nháy điện áp, bù công suất phản kháng, ổn định lưới và nâng cao chất lượng điện năng. FACTS được đấu nối vào hệ thống điện theo kiểu bù nối tiếp; bù song song hoặc cả hai. Thiết bị FACTS hay được áp dụng trong hệ thống điện bao gồm các thiết bị bù tĩnh SVC và thiết bị STATCOM (Static Synchronous Compensator). Bên cạnh đó một thiết bị bù mới, được cải tiến từ thiết bị SVC (Static Var Compensator) cũng đang được sử dụng gọi là thiết bị bù lai.

a) Thiết bị bù công suất phản kháng kiểu tĩnh SVC

Sơ đồ nguyên lý của một thiết bị bù theo phương pháp SVC được trình bày Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý của thiết bị SVC

Trong đó công suất của SVC sẽ là công suất của tụ điện C và công suất của cuộn kháng L. Thiết bị bù tĩnh SVC là thiết bị có thể được điều chỉnh tron công suất phản kháng với tốc độ phản nhanh [9], [13-15]. Qua (1) có thể thấy là công suất tổng của SVC cũng có thể điều chỉnh tron thông qua việc điều chỉnh tron công suất cuộn kháng L. Tuy theo yêu thực tế thiết bị SVC được thiết kế theo chức năng bù công suất phản kháng kết hợp lọc sóng hài. Bù công suất phản kháng nâng cao $\cos\phi$ hay bù công suất phản kháng điều chỉnh điện áp.

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_L(\alpha) \quad (1)$$

Sơ đồ khối SVC của phương pháp điều khiển công suất phản kháng để điều chỉnh điện áp được trình bày như Hình 3 [16] có ưu điểm tốc độ phản ứng nhanh, bù tron công suất phản kháng, giá thành thấp. Tuy vậy, thiết bị này cũng có những nhược điểm như tổn thất do thiết bị gây ra lớn vì phải sử dụng một cuộn kháng có công suất cao. Trong quá trình điều chỉnh tron công suất cuộn kháng thì thiết bị gây ra sóng hài rất lớn trên lưới điện.

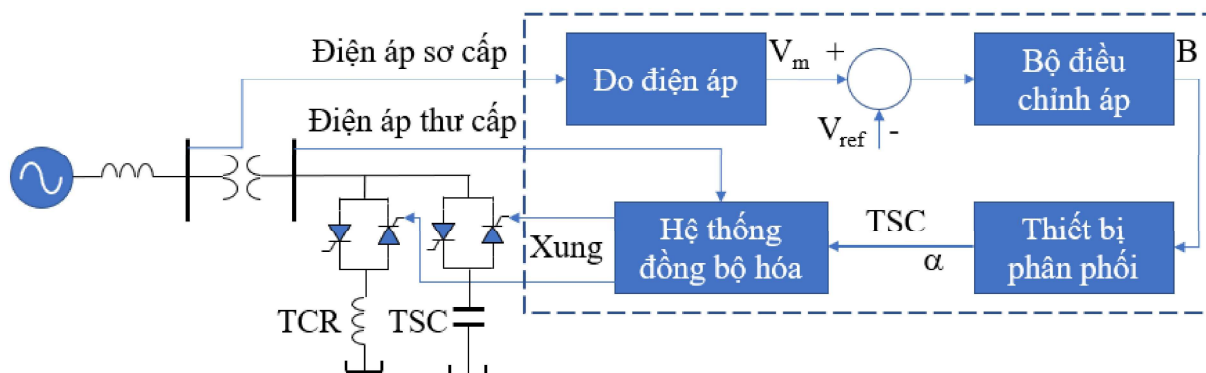
b) Thiết bị bù công suất phản kháng kiểu đồng bộ tĩnh (STATCOM)

Thiết bị STATCOM [17] hoạt động dựa trên nguyên lý biến đổi nguồn áp DC-AC với thiết bị lưu trữ năng lượng thường là tụ điện.

Điện áp đầu ra cùng pha với điện áp dây và được điều khiển để tiêu thụ hoặc cung cấp công suất phản kháng tương tự như máy bù đồng bộ nhưng với tốc độ đáp ứng nhanh hơn rất nhiều. Bản chất STATCOM là một nguồn điện áp, do đó công suất của thiết bị ít phụ thuộc vào điện áp trên thiết bị. Khi điện áp lưới rất thấp, STATCOM vẫn làm việc hiệu quả khác với SVC. Bên cạnh đó còn giải quyết được các bài toán sóng hài bậc cao trong hệ thống điện. Nhược điểm của thiết bị này có giá thành cao và công kênh nên hiện nay thường được sử dụng để bù công suất phản kháng, điều chỉnh điện áp, trên lưới điện trung và cao áp [18].

c) Thiết bị bù tron công suất phản kháng dựa trên nguyên lý lai

Thiết bị bù lai là sự cải tiến của SVC, bao gồm các bộ tụ điện mắc song song được điều chỉnh bằng các thiết bị điện tử như thyristor, công suất của



Hình 3. Sơ đồ khối của phương pháp điều chỉnh theo điện áp SVC

cuộn kháng được điều chỉnh bằng cách thay đổi góc mở của thyristor. Hệ thống điều khiển đóng mở được thực hiện thông qua bộ điều khiển. Công suất của cuộn kháng được chọn bằng công suất của một bộ tụ điện trên một mạch nhánh song song Hình 4. Thiết bị này có ưu điểm là kết cấu gọn nhẹ, tổn hao công suất thấp, ít gây sóng hài và đặc biệt là giá thành rẻ hơn [19].

Thiết bị bù lai có thể giúp điều khiển trơn công suất phản kháng theo từng pha, có thể điều chỉnh điện áp khi có sự không đối xứng giữa các pha. So với SVC, thiết bị bù lai có những ưu điểm sau: (i) Chỉ sử dụng một cuộn kháng có công suất nhỏ giúp giá thành thiết bị thấp; (ii) Lượng sóng hài do cuộn kháng sinh ra rất nhỏ, tỉ lệ thuận với công suất cuộn kháng do đó không cần sử dụng các bộ lọc; (iii) Lượng tổn thất công suất rất thấp, thường là dưới 0,5%. Phương pháp này sẽ được thực hiện và áp dụng cho hệ thống đề xuất trong bài báo giải pháp bù lai với một bộ điều khiển trung tâm.

2.2. Phương pháp bố trí thiết bị bù

Bên cạnh các phương pháp bù đã được trình bày trong mục 2.1, chiến lược bố trí các thiết bị bù cũng được nhiều nhà nghiên cứu khảo sát thực hiện và lựa chọn phù hợp với mục tiêu tối ưu của hệ thống. Các giải pháp như bù phân tán hay bù tập trung là các phương pháp lắp đặt vị trí bù, bên cạnh đó phương án điều khiển tập trung hay phân tán cũng được xét đến. Trong bài báo đề xuất hệ thống bù phân tán điều khiển tập trung mang lại tối ưu cho toàn hệ thống về mặt tổn thất công suất tác dụng cho toàn hệ thống.

2.2.1. Bù tập trung

Ưu điểm nổi bật của bù tập trung là lắp đặt thiết bị thuận lợi, dễ theo dõi, kiểm tra tình trạng hoạt động của thiết bị; làm nhẹ tải cho máy biến áp, do

đó có khả năng dễ dàng mở rộng và thay thế [8], [20]. Trong [8] đề xuất phương pháp bù tập trung với giải pháp tối ưu chi phí giá thành cho hệ thống bù. Tài liệu [21] đã chỉ ra bù tập trung có nhiều ưu điểm như tổn thất công suất nhỏ, chi phí cho tụ bù thấp hơn bù phân tán, tuy nhiên dao động điện áp còn cao, tỷ số dao động điện áp trong dải từ $0,96U_{dm}$ đến $1,05U_{dm}$. Bên cạnh ưu điểm, giải pháp này có các nhược điểm điển hình như không kiểm soát và điều khiển được điện áp tại các nút phụ tải. Dẫn tới chất lượng điện áp tại các nút của phụ tải và tổn hao của toàn hệ thống được không tối ưu.

2.2.2. Bù phân tán

Bù nhiều vị trí khác nhau hay còn gọi là bù phân tán thường sử dụng khi mạng điện lớn, phức tạp, khi chế độ tải tiêu thụ theo thời gian của các nhánh thay đổi khác nhau hoặc tải động có nhiều nguồn phân tán. Hiện nay hệ thống bù phân tán đang được nghiên cứu đưa vào áp dụng cho các mạng lưới điện phân phối, lưới điện có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo nhằm kiểm soát điện áp tại các điểm nút và điều chỉnh tần số của hệ thống nhằm nâng cao độ tin cậy, giảm tổn thất điện năng và chia sẻ lợi nhuận thu được cho cả nhà cung cấp và người dùng [8] [22] [23]. Các nghiên cứu như [22], [24], [25] đề xuất phương án bù phân tán công suất phản kháng nhằm tối ưu hóa dung lượng bù, giảm tổn hao và tăng độ tin cậy cho hệ thống. Hầu như các phương pháp bù phân tán còn tồn tại một nhược điểm cơ bản đó là không có sự kết nối giữa các thiết bị bù phân tán với nhau [29]; dẫn đến việc điều chỉnh chỉ thực hiện ở phạm vi cục bộ. và không thể tính toán được ảnh hưởng tương tác giữa từng phần tử phân tán tới các thiết bị khác trong cùng hệ thống. Do đó phương pháp này không thể tính toán lượng bù tối ưu để tổng tổn thất trong hệ thống nhỏ nhất

mà chỉ tính được các lượng công suất bù tối ưu tại từng phần tử riêng rẽ. Do không có phần đo lường ở thanh cái và hệ thống, khi điều kiện điện áp tại đây thay đổi thì việc điều chỉnh theo điện áp thanh cái không thể thực hiện được. Tương tự như công bố [30] sử dụng đường cong Q-V để xác định dung lượng bù, đây là một hệ thống nhỏ, tự trị không cần kết nối truyền thông, hệ thống đơn giản và có độ tin cậy cao, nhưng hạn chế của hệ thống là khó khăn khi mở rộng hệ thống.

Như vậy, có thể thấy xu hướng sử dụng phương pháp bù phân tán đang là xu hướng của các nhà nghiên cứu trên thế giới với nhiều những ưu điểm như: tối ưu dung lượng bù, tối ưu vị trí lắp đặt thiết bị bù, tối ưu về chi phí sử dụng hay tối ưu tổn thất công suất tác dụng cho hệ thống... đó là những tham số giúp nâng cao hiệu năng của các hệ thống. Ngoài ra các hệ thống đó còn có các chỉ tiêu về lọc sóng hài, ổn định điện áp, tăng độ tin cậy của hệ thống hoặc cân bằng pha trong hệ thống 3 pha. Cùng với xu hướng trên, việc đề xuất hệ thống điều khiển bù phân tán tích hợp phân thu thập dữ liệu và điều khiển giữa các thiết bị bù phân tán hay thiết bị đo lường và điều khiển tập trung cho toàn hệ thống là cần thiết. Để hệ thống kiểm soát được sự ổn định điện áp trên các nút cũng như tối

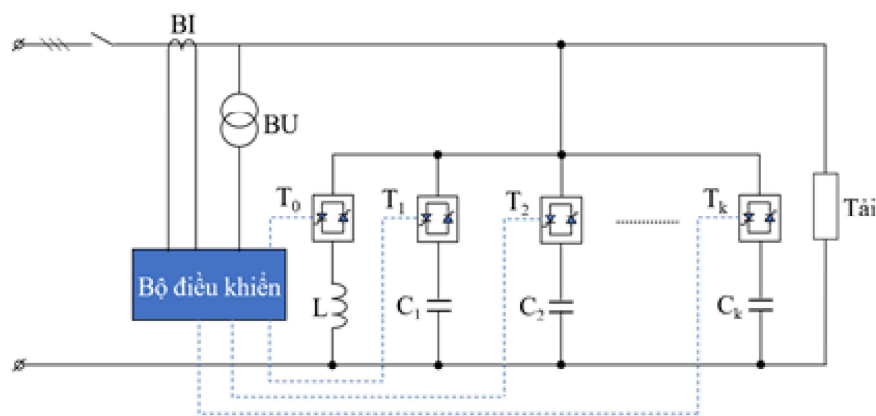
ưu được tổn thất công suất tác dụng toàn hệ thống. Bài báo nghiên cứu đề xuất giải pháp bù phân tán điều khiển tập trung, điều này sẽ được trình bày cụ thể trong mục 3.

3. PHƯƠNG PHÁP TỐI THIỂU TỔN THẤT CÔNG SUẤT TÁC DỤNG

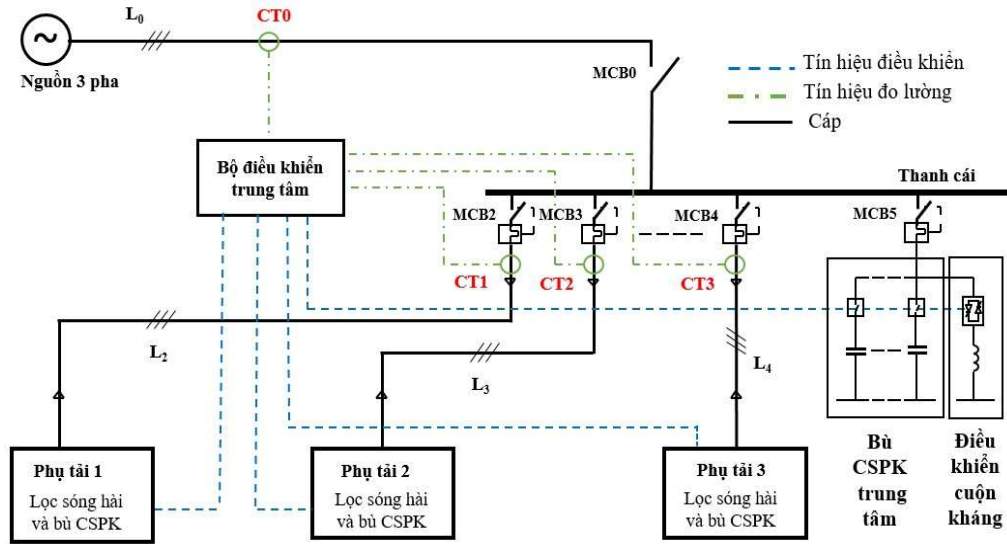
3.1. Các phần tử chính của hệ thống

Sơ đồ nguyên lý của hệ thống điều chỉnh điện áp dạng phân tán điều khiển tập trung đề xuất được cho trong Hình 5. Trong Hình 5 hệ thống bao gồm các phần tử: Đường dây phân phối L_0 cấp điện cho nhà máy; Các dây dẫn L_1, L_2, L_3, L_4 cung cấp điện cho các phụ tải. Bài báo đề xuất thử nghiệm với ba phụ tải là các động cơ không đồng bộ ba pha được tích hợp bù CSPK và lọc sóng hài. Một thiết bị bù CSPK trung tâm giúp tối ưu hóa dung lượng bù cho cả hệ thống. Các hệ thống bảo vệ MCB0, MCB1, MCB2, MCB3, MCB4, MCB5 lần lượt là các thiết bị bảo vệ; Thiết bị CM1, CM2, CM3 là các chuyển mạch cho thiết bị phân tán; CT0, CT1, CT2, CT3 là thiết bị đo lường dòng điện để cung cấp tín hiệu cho bộ điều khiển.

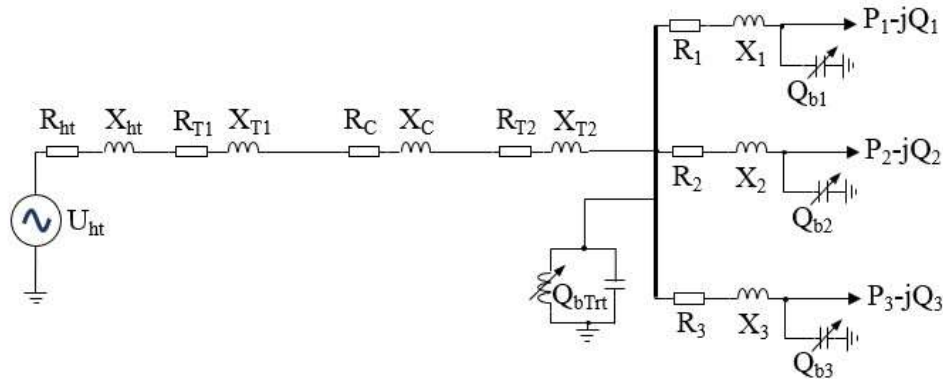
Hệ thống điều chỉnh điện áp bù phân tán điều khiển tập trung gồm các thành phần sau:



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị bù lai



Hình 5. Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều chỉnh điện áp phân tán điều khiển tập trung



Hình 6. Sơ đồ điện trong nhà máy khi có thiết bị bù phân tán

Bảng 1. Bảng thông số của hệ thống đề xuất trên Hình 6

Thông số	Động cơ 1	Động cơ 2	Động cơ 3
P (kW) - jQ (kVAr)	160- j99,16	200 -j 123,95	185-j114,65
Điện trở các cấp hạ thế tới các tải động cơ.	0,053+j0,009Ω	0,088+j0,015Ω	0,070+j0,012Ω
Cáp cao thế: $R_{ht} + jX_{ht} = (32,1 + j32) \times 10^{-6} \Omega$;			
Cáp trung thế: $R_C + jX_C = (812,9 + j446,3) \times 10^{-6} \Omega$;			
MBA trung thế 110kV/22kV: $R_{T1} + jX_{T1} = (16 + j440) \times 10^{-6} \Omega$;			
MBA hạ thế 22kV/0,4kV : $R_{T2} + jX_{T2} = (1,368 + j8) \times 10^{-3} \Omega$;			

Bộ điều khiển tập trung; Thiết bị bù trung tâm; Thiết bị kháng trung tâm; Các thiết bị bù phân tán tại các phụ tải. Công suất của cuộn kháng này cần chọn cho phù hợp với yêu cầu về CSPK trong quá trình hoạt động của phụ tải.

Bài báo đề xuất xem xét một cấu hình cấp điện của một nhà máy, xí nghiệp điển hình được trình bày trong Hình 6 bao gồm: nguồn cao thế 110kV; cáp cao thế; trạm biến áp (MBA) trung thế; cáp trung thế; trạm biến áp hạ thế; ba phụ tải $i = 1 \div 3$ động cơ không đồng bộ; các cáp hạ thế; được thể

hiện trong Bảng 1; thiết bị bù tại trung tâm (Q_{bTr}) và các thiết bị bù phân tán tại từng phụ tải (Q_{bi1-3}).

Tất cả các thông số của hệ thống được đo lường thu thập vào tủ điều khiển, từ đó hệ thống tính toán tối ưu sao cho tổng tổn thất nhỏ nhất và ra lệnh điều khiển tới các tủ bù phân tán đóng ngắt cung cấp dung lượng bù cho từng vị trí theo yêu cầu của thuật toán. Trong Hình 6 cho biết các thông số của hệ thống đề xuất.

Bảng 2. So sánh tổng tổn thất của hệ thống sau khi bù phân tán - điều khiển tập trung (PT-TT) với bù phân tán điều khiển phân tán (PT-PT) và hệ thống chưa có bù hay không bù (KB)

ΔP_{Σ} (kW)	0,9U _{dm}	0,95U _{dm}	1,0U _{dm}	1,02U _{dm}	1,05U _{dm}	1,1U _{dm}
PT-TT	102,89	77,93	59,72	54,24	47,90	42,20
PT-PT	112,00	85,54	66,05	60,12	53,14	46,49
Không bù	146,75	113,64	88,44	80,45	70,59	59,64
% Tổng tổn thất giảm khi áp dụng bù PT-TT so với hệ thống truyền thống không bù hoặc bù PT-PT						
$\Delta P_{\Sigma KB} - \Delta P_{\Sigma PT-TT} \%$	29,89%	31,42%	32,48%	32,58%	32,15%	29,24%
$\Delta P_{\Sigma PT-PT} - \Delta P_{\Sigma PT-TT} \%$	8,85%	9,77%	10,60%	10,84%	10,94%	10,17%

Bảng 3. Các nghiên cứu có liên quan đã được công bố trên thế giới.

STT	Vị trí bù	Phương pháp điều khiển	Tổn thất giảm (%)	Ghi chú
[28], 2012	Phân tán	Tập trung	31,00%	Hệ thống sử dụng tụ bù
[27], 2013	Phân tán	Tập trung	18,41%	Hệ thống nhỏ
[26] the single-phase distributed photovoltaic (PV, 2019	Phân tán	Tập trung	18,66%	Xét cân bằng pha
[24], 2021	Phân tán	Tập trung	66,17%	Sử dụng nguồn phân tán DG
			23,46 %	Sử dụng tụ bù
			31,98 %	Sử dụng DSTATCOM
Đề xuất	Phân tán	Tập trung	31,89 %	Sử dụng tụ bù Tính toán CSPK sử dụng phương pháp cực trị
Đề xuất	Phân tán	Tập trung	32,58%	Sử dụng tụ bù Tính toán CSPK sử dụng phương pháp Lagrange

3.2. Các thuật toán của hệ thống

Có ba yếu tố về CLĐN ảnh hưởng lớn nhất tới hiệu suất của ĐC-KĐB lần lượt là: độ không đối xứng điện áp, tỷ lệ sóng hài và độ lệch điện áp định mức. Hiện nay đã có rất nhiều những tiêu chuẩn và quy định bắt buộc của pháp luật đối với những phụ tải làm xấu CLĐN của hệ thống điện như: Độ không đối xứng điện áp phải nhỏ hơn 5%, tổng sóng hài điện áp nhỏ hơn 8% và tổng dòng điện nhỏ hơn 12% [31].

Thuật toán của hệ thống sử dụng hỗn hợp các phương pháp được thể hiện trong Hình 7; sau khi khởi tạo bộ điều khiển, bộ điều khiển trung tâm luôn cập nhật các thông tin đo từ hệ thống thực, từ đó lần lượt kiểm tra các trạng thái và thực hiện các bài toán cân bằng pha, lọc sóng hài và bù CSPK theo yêu cầu và chỉ tiêu đặt ra. Thuật toán của các chương trình con cân bằng pha, lọc sóng hài và bù CSPK lần lượt được thể hiện trong các Hình 8, Hình 9 và Hình 10.

Bộ điều khiển trung tâm đã được chế tạo hoàn chỉnh, gồm có 1 tủ trung tâm với công suất bù thành phần dung kháng là 90kVAr, thành phần cảm kháng là 30kVAr và các tủ phân tán được thể hiện trong Hình 11 với dung lượng bù 90kVAr. Hệ thống đã được làm thực nghiệm tại nhà máy thông tin M1, An Khánh, Hoài Đức, Hà Nội.

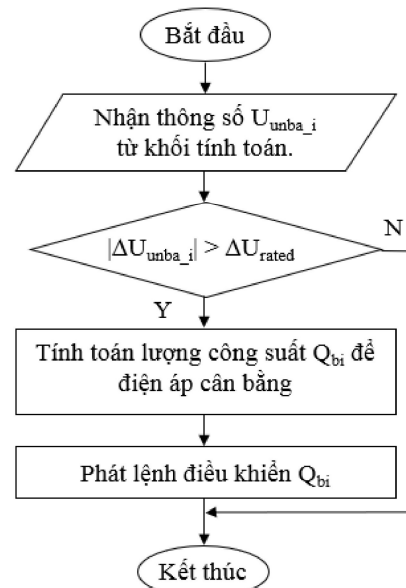
3.3. Kết quả đạt được

Với hệ thống lưới đề xuất, tổng tổn thất khi hệ thống chưa sử dụng các thiết bị bù và sử dụng hệ thống bù phân tán điều khiển phân tán truyền thống được tính toán và xác định. Bảng 2 trình bày chi tiết các kết quả của các giải pháp: Không bù, bù phân tán điều khiển phân tán và bù phân tán điều khiển phân tán. Kết quả cho thấy phương pháp bù mới do bài báo đề xuất có mặt nổi bật về mức độ giảm tổn thất công suất tác dụng tổng (giảm tới

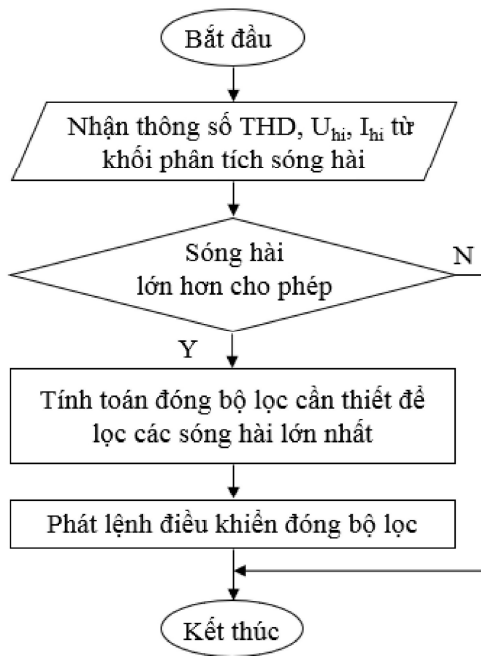
32,58 % so với hệ thống chưa bù và 10,94% so với hệ thống bù phân tán - điều khiển phân tán). Qua khảo sát các công trình công bố trên thế giới, các hệ thống khảo sát đều sử dụng giải pháp bù phân tán điều khiển tập trung và dùng phần tử thụ động là tụ bù được mô tả chi tiết trong Bảng 3.



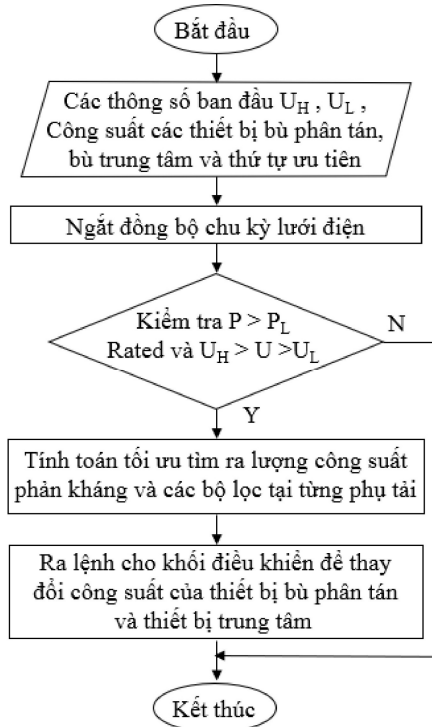
Hình 7. Lưu đồ thuật toán chính của hệ thống



Hình 8. Lưu đồ thuật toán cân bằng pha

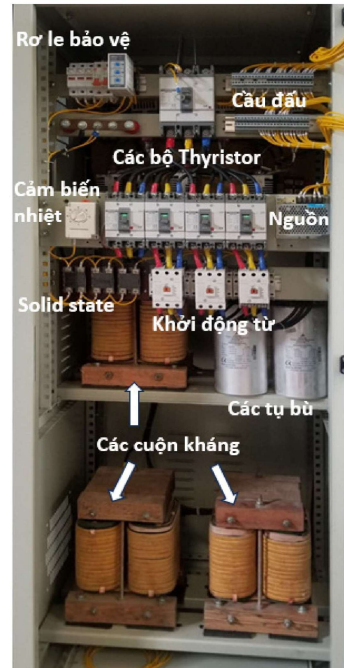


Hình 9. Lưu đồ thuật toán lọc sóng hài

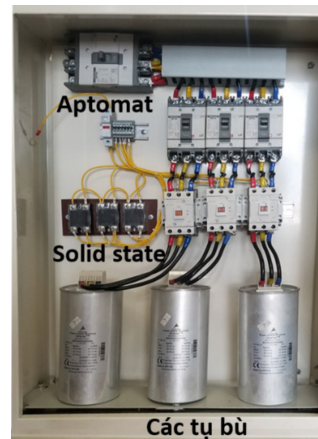


Hình 10. Lưu đồ thuật toán bù CSPK

a) Tủ điều khiển trung tâm



b) Tủ bù phân tán



Hình 11. Các thiết bị được chế tạo thử nghiệm

Công bố [24] sử dụng thuật toán BAT để tối thiểu tổn hao công suất tác dụng cho hệ thống bù phân tán khi sử dụng các thiết bị bù như nguồn phân tán DG (Distributed Generation), tụ, DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator), bài báo phân tích sự đóng góp của thuật toán dẫn tới giảm tổn thất công suất tác dụng cho hệ thống là 66,17% khi dùng DG; 23,46% khi dùng tụ bù và

31,98% khi sử dụng DSTATCOM [25] đề xuất hệ thống điều khiển tự động cho hệ thống lưới điện vùng Wuho. Trong [26] sử dụng phương pháp bù công suất phản kháng (CSPK) phân tán, tổn thất tổng giảm lên tới 18,66% khi lắp đặt hệ thống bù phân tán. Tài liệu [27] đề xuất bù công suất phản kháng tối ưu để giảm thiểu tổn thất phân phối điện trong lưới điện siêu nhỏ thông minh, tổn thất giảm tới 18,41%. Đề xuất [28] hệ thống phân tán điều khiển tập trung, hệ gồm nhiều bộ đầu cuối RTU (Remote Terminal Unit) được nối với mỗi tụ hoặc mỗi nguồn phân tán để đo lường và truyền tín hiệu về bộ trung tâm nhằm điều khiển tối ưu dung lượng bù. Hệ thống tối ưu hóa tổn thất, ổn định điện áp ở mức chấp nhận được ở tỷ số 1,06 - 1,035, tổn thất giảm từ 11,6kW xuống 8kW, như vậy giảm 31%.

Bảng 3 trình bày kết quả của các nghiên cứu có liên quan trên thế giới với cùng phương pháp bù phân tán và điều khiển tập trung. Chúng ta nhận thấy với giải pháp đề xuất của bài báo tổn thất tổng giảm nổi bật lên tới 31,89 % khi sử dụng phương pháp cực trị và 32,58% khi sử dụng phương pháp Lagrange; phần trăm giảm cao hơn so với các nghiên cứu khác trên thế giới.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích các phương pháp nâng cao chất lượng điện áp trong đó báo đề xuất chiến lược nâng cao chất lượng điện áp sử dụng hỗn hợp các phương pháp cân bằng pha, lọc sóng hài bậc cao và bù lai công suất phản kháng giúp tối ưu hóa tổn thất công suất tác dụng của toàn nhà máy. Đồng thời bài báo cũng đã phân tích các phương pháp bù khác nhau, các phương thức lắp đặt và điều khiển khác nhau. Từ đó, đề xuất một giải pháp bù phân tán điều khiển tập trung, xác định công suất bù dựa việc áp dụng thuật toán tối thiểu tổn thất công suất tác dụng dựa trên hàm Lagrange và phương pháp cực trị đã mang lại hiệu quả cao. Kết quả tính toán và mô phỏng đã cho thấy rõ việc giảm tổn thất đáng kể của hệ thống đề xuất so với công bố của tác giả trước đó cũng như các công bố khác trên thế giới. Với các bước thực hiện hợp lý, thuật toán đề xuất trong nghiên cứu này hoàn toàn có thể triển khai được trên cả hai lĩnh vực lý thuyết và thực tiễn. Các kết quả tính toán, mô phỏng, thực nghiệm trong công trình này đã chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của phương pháp đề xuất. Vì vậy, đề xuất có đóng góp đáng kể vào việc vận hành và phân phối trong hệ thống điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Omkar Pawar, P. Marshall Arockia Dass, and Dr. A Peer Fathima, 'Power Quality Improvement Using Compensating Type Custom Power Devices: A Review', National Conference on Science, Engineering and Technology, vol. 4, no. 6, pp. 155–158, 2016.
- [2]. Sumit Mazumder Ami, 'Power quality improvements in low voltage distribution networks containing distributed energy resources', Queensland University of Technology, 2015.
- [3]. IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality', p. 76.
- [4]. Trần Đình Long, 'Sổ tay tra cứu về chất lượng điện năng', in Sổ tay tra cứu về chất lượng điện năng, 2014: Hội điện lực Việt Nam.
- [5]. A. Askarzadeh, 'Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology', IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 14, pp. 3631–3638, Nov. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0419.

- [6]. Colin Debruyne, Lieven Vandevelde, and Jan Desmet, 'Harmonic effects on induction and line start permanent magnet machines', presented at the Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS - 2013), Rio de Janeiro: Energy Efficiency of Motor Driven Systems, Proceedings, Oct. 2013. [Online]. Available: <https://biblio.ugent.be/publication/4196062>
- [7]. Y. Lee and H. Song, 'A Reactive Power Compensation Strategy for Voltage Stability Challenges in the Korean Power System with Dynamic Loads', *Sustainability*, vol. 11, no. 2, p. 326, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11020326.
- [8]. S. S. Kanojia and Suketu Rajyaguru, 'Reactive Power Compensation for LV Distribution Network', *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, no. 6, 2019.
- [9]. J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke, 'Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review', *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, Dec. 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
- [10]. X. Zhou, K. Wei, Y. Ma, and Z. Gao, 'A Review of Reactive Power Compensation Devices', in 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Changchun: IEEE, Aug. 2018, pp. 2020–2024. doi: 10.1109/ICMA.2018.8484519.
- [11]. S. Mirsaeidi et al., 'Optimization of FACTS Devices: Classification, Recent Trends, and Future Outlook', in 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China: IEEE, May 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510336.
- [12]. V. N. Sewdien, 'Operation of FACTS Controllers', in *Flexible AC Transmission Systems*, B. R. Andersen and S. L. Nilsson, Eds., in CIGRE Green Books. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1063–1070. doi: 10.1007/978-3-030-35386-5_23.
- [13]. V. Yarlagadda, K. R. M. Rao, and B. V. S. Ram, 'Hardware Circuit Implementation of Automatic Control of Static Var Compensator (SVC) using Micro Controller', *IJICA*, pp. 159–162, Oct. 2011, doi: 10.47893/IJICA.2011.1029.
- [14]. J. M. Maza-Ortega, E. Acha, S. García, and A. Gómez-Expósito, 'Overview of power electronics technology and applications in power generation transmission and distribution', *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 499–514, Jul. 2017, doi: 10.1007/s40565-017-0308-x.
- [15]. Aushiq Ali Memon, 'Analyses of reactive power compensation strategies in medium and low voltage electrical network systems in the wake of renewable energy infeed', 2013, doi: 10.13140/RG.2.1.3130.8002.
- [16]. Q. Salem, 'Overall Control Strategy of Grid Connected to Wind Farm Using FACTS', *BIJPSIC*, vol. 4, no. 1, pp. 05–13, Feb. 2014, doi: 10.9756/BIJPSIC.10289.
- [17]. T. A. Boghdady and Y. A. Mohamed, 'Reactive power compensation using STATCOM in a PV grid connected system with a modified MPPT method', *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 8, p. 102060, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.102060.
- [18]. Hà Văn Du, 'Ứng dụng STATCOM để điều chỉnh điện áp và bù công suất phản kháng cho hệ thống điện', *Tạp chí Khoa học Đại học Thủ Dầu Một*, vol. 46, no. 3, 2020.
- [19]. Bùi Anh Tuấn, Đinh Ngọc Quang, Nguyễn Tiến Dũng, 'Nghiên cứu, chế tạo thiết bị bù công suất phản kháng trong lưới điện hạ áp dựa trên nguyên lý lai'. Đề tài cấp bộ Công Thương, 2014.
- [20]. В.В. Карагодин and Д.В. Рыбаков, 'ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ', *Вопросы электромеханики*, p. T144, 2015.

- [21]. S. X. Chen, Y. S. Foo, Eddy, H. B. Gooi, M. Q. Wang, and S. F. Lu, 'A Centralized Reactive Power Compensation System for LV Distribution Networks', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 274–284, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2326520.
- [22]. F. Rezaei and S. Esmaili, 'Decentralized reactive power control of distributed PV and wind power generation units using an optimized fuzzy-based method', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 87, pp. 27–42, May 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.10.015.
- [23]. E. V. Tumaeva, S. S. Kuzin, and E. N. Gavrilov, 'Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0.4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 643, no. 1, p. 012100, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/643/1/012100.
- [24]. T. Yuvaraj et al., 'Comparative analysis of various compensating devices in energy trading radial distribution system for voltage regulation and loss mitigation using Blockchain technology and Bat Algorithm', *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8312–8321, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.184.
- [25]. L. Sun, X. Jian, and W. Yuan, 'The Application and Practice of the Voltage Reactive Power Optimization Automatic Control System (AVC) in the Power Grid of Wuhu Region', *Int. J. Onl. Eng.*, vol. 12, no. 02, p. 10, Feb. 2016, doi: 10.3991/ijoe.v12i02.5036.
- [26]. S. Lin et al., 'Robust Optimal Allocation of Decentralized Reactive Power Compensation in Three-Phase Four-Wire Low-Voltage Distribution Networks Considering the Uncertainty of Photovoltaic Generation', *Energies*, vol. 12, no. 13, p. 2479, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12132479.
- [27]. S. Bolognani and S. Zampieri, 'A Distributed Control Strategy for Reactive Power Compensation in Smart Microgrids', *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 58, no. 11, pp. 2818–2833, Nov. 2013, doi: 10.1109/TAC.2013.2270317.
- [28]. M. E. Elkhatab, R. E. Shatshat, and M. M. A. Salama, 'Decentralized Reactive Power Control for Advanced Distribution Automation Systems', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1482–1490, Sep. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2197833.
- [29]. A. F. Savadkouhi, F. Elyasichamazkoti, and M. F. Fard, 'Decentralized Reactive Power Sharing in Autonomous Microgrids', in *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Toronto, ON, Canada: IEEE, Oct. 2021, pp. 75–80. doi: 10.1109/EPEC52095.2021.9621415.
- [30]. M. Kosari and S. H. Hosseini, 'Decentralized Reactive Power Sharing and Frequency Restoration in Islanded Microgrid', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2901–2912, Jul. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2621033.
- [31]. Thông tư 39/2015/TT-BCT quy định hệ thống điện phân phối. Thông tư, Bộ Công thương, 2015. [Online]. Available: <https://hoatieu.vn/download/thong-tu-39-2015-tt-bct-quy-dinh-he-thong-dien-phan-phoi-105628>
- [32]. T.-D. Nguyen, A.-T. Bui, N.-K. Nguyen, T.-D. Bui, N.-Q. Dinh, and T.-D. Pham, 'A Novel Hybrid DC–CC–Based Reactive Power Compensation Scheme to Improve Power Quality of an Electric Grid Considering the Efficiency of Asynchronous Induction Motors', *SSRG-IJEEE*, vol. 10, no. 8, pp. 156–169, Sep. 2023, doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V10I8P115.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Tiến Dũng tốt nghiệp đại học ngành Tự động hóa năm 2008 tại Trường đại học Bách Khoa Hà Nội, nhận bằng Thạc sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2014 tại Học viện kỹ thuật quân sự và nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2024 tại Học viện kỹ thuật quân sự. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện Lực.

Hướng nghiên cứu chính: Điều khiển hệ thống bù để nâng cao chất lượng điện năng, tự động hóa trong các nhà máy, khu công nghiệp.



Tác giả Nguyễn Ngọc Trung tốt nghiệp đại học ngành Hệ thống điện, nhận bằng Thạc sĩ ngành Kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2006; nhận bằng tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 2014 tại Đại học Palermo, Cộng hòa Italia. Hiện nay tác giả là giảng viên, Trường Đại học điện lực

Hướng nghiên cứu chính: Lưới điện thông minh, giám sát đo lường điều khiển tự động hóa và bảo vệ trong hệ thống điện.



Tác giả Bùi Thị Duyên tốt nghiệp đại học ngành Kỹ thuật đo và Tin học công nghiệp năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ ngành Tự động hóa năm 2007, nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2020 tại Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện Lực.

Hướng nghiên cứu chính: Hệ thống đo lường điều khiển, thiết kế các hệ thống nhúng ứng dụng trong điều khiển và tự động hóa, mạng cảm biến không dây, anten và mạch cao tần.