

Giải pháp bù phân tán điều khiển tập trung nhằm tối thiểu tổn thất điện năng của lưới điện chứa các phụ tải động cơ không đồng bộ ba pha

Nguyễn Tiến Dũng, Bùi Thị Duyên*

Trường Đại học Điện lực, 235 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: duyenbt@epu.edu.vn

Nhận bài: 19/2/2024; Hoàn thiện: 06/4/2024; Chấp nhận đăng: 12/6/2024; Xuất bản: 25/6/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.96.2024.51-60>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tối ưu hóa nhằm giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng của lưới điện dựa trên phương pháp Lagrange. Phương pháp được áp dụng cho lưới điện chứa nhiều phụ tải động cơ ba pha công suất lớn. Thông qua việc phân tích các giải pháp, 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 giới thiệu chiến lược từng bước điều khiển khả năng bù công suất phản kháng cho từng phụ tải nhằm tối ưu hóa tổn thất công suất tác dụng của toàn nhà máy, nâng cao chất lượng điện áp cũng như kéo dài tuổi thọ của thiết bị. Kết quả mô phỏng cũng được cung cấp để chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của phương 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; Hiệu suất động cơ.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, chiến lược phát triển năng lượng cũng như sử dụng năng lượng tiết kiệm hiệu quả là nhiệm vụ cấp bách trong nước cũng như trên thế giới. Trong đó, vấn đề 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 vấn đề thời sự không chỉ của riêng ngành điện [1, 2]. Bài toán nâng cao chất lượng điện năng ngày càng trở nên quan trọng, giải quyết tốt bài toán này sẽ giúp sử dụng hiệu quả và tiết kiệm năng lượng; giúp tăng hiệu quả cạnh tranh, tăng cường độ tin cậy, an toàn cung cấp điện, tăng tuổi thọ và khả năng làm việc của các thiết bị sản xuất, truyền tải và phân phối. Bên cạnh đó còn đảm bảo sức khỏe, giảm chi phí cho những khách hàng sử dụng điện. Chất lượng điện năng kém có thể gây nhiều ảnh hưởng tới hoạt động của các thiết bị điện, trong đó, động cơ không đồng bộ là loại phụ tải phổ biến, chiếm tới 45-50% công suất của các loại phụ tải [3]. Những ảnh hưởng chính của chất lượng điện năng tới động cơ không đồng bộ như làm tăng tổn thất công suất, tăng nhiệt độ trong động cơ dẫn đến hiệu suất làm việc và tuổi thọ của các động cơ giảm xuống [4, 5]. Nói cách khác khi chất lượng điện giảm, sẽ giảm hiệu năng của các phụ tải động cơ không đồng bộ ba pha.

Để nâng cao chất lượng điện áp, có các phương thức điều chỉnh điện áp như: điều chỉnh dòng điện kích từ máy phát điện; thay đổi đầu phân áp cố định hoặc sử dụng bộ điều áp dưới tải của máy biến áp; điều chỉnh điện áp bằng máy biến áp điều chỉnh và biến áp bù trợ hoặc sử dụng bộ tụ có điều chỉnh; sa thải phụ tải; thay đổi tiết diện đường dây; lọc sóng hài và bằng phương pháp bù công suất phản kháng [6]. Mỗi phương pháp có ưu nhược điểm riêng, tuy nhiên, 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 [6] từ đó làm giảm thiểu tổn thất điện năng trên lưới.

Có nhiều phương pháp triển khai lắp đặt vị trí các thiết bị bù trong hệ thống lưới điện phân phối, mỗi loại có những ưu nhược điểm riêng. Việc tối ưu về vị trí lắp đặt, dung lượng bù cần được phân tích và thiết kế dựa trên mục tiêu tối ưu về kỹ thuật, kinh tế, tổn thất công suất tác dụng hay giảm thiểu chi phí lắp đặt các thiết bị bù. Thường chia ra các loại như: Bù tập trung phía cao áp; bù tập trung phía hạ áp, bù phân tán theo nhóm phía hạ áp, bù phân tán tại từng phụ tải phía hạ áp

[7]. 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.

Để phân tích tối ưu tổn hao năng lượng toàn diện, đặc biệt là hệ thống gồm nhiều tải động cơ, bài báo áp dụng đường cong NEMA [9] để tăng hiệu suất cho động cơ ; giải pháp đặt thêm các thiết bị điều chỉnh điện áp dựa trên bù công suất phản kháng và lọc sóng hài, làm tăng đáng kể hiệu suất của nhà máy cũng như giảm tổn thất, nâng cao tuổi thọ của thiết bị [10]. Bài báo đề xuất giải pháp điều chỉnh điện áp dựa trên bù công suất phản kháng phân tán điều khiển tập trung để tối ưu hóa toàn diện hoạt động của lưới điện; việc xác định lượng bù công suất phản kháng tốt nhất để giảm tổn thất đối với hệ thống dựa trên phương pháp Lagrange.

Trình tự của bài báo gồm: Mục 2 trình bày phương pháp bù công suất phản kháng, các phương pháp bù 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, phương trình tối ưu, trình tự tính toán, kết quả tính toán và so sánh với các giải pháp khác được trình bày trong mục này. Mục 4 là kết luận của bài báo.

2. CÁC PHƯƠNG PHÁP BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG

2.1. Phương pháp bù công suất phản kháng

Có thể chia các giải pháp bù công suất phản kháng khác nhau [11] thành ba loại chính:

Bù bằng máy bù đồng bộ: Sử dụng máy bù đồng bộ, thực chất là động cơ điện đồng bộ làm việc ở chế độ quá kích từ. Biện pháp này có thể điều chỉnh tron và có thể điều chỉnh dương hoặc âm công suất bù. Tuy nhiên, nhược điểm cơ bản 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, hay hỏng hóc do sử dụng thiết bị quay với vận tốc lớn.

Bù tĩnh đóng cắt theo bậc: Đây là phương pháp có điều chỉnh công suất của thiết bị bù bằng cách đóng cắt các tụ điện khác nhau tùy theo yêu cầu của phụ tải điện. 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. Tuy nhiên, phương pháp bù này còn có nhược điểm như: tốc độ phản ứng rất chậm; thiết bị không thể điều chỉnh tron công suất phản kháng theo đúng yêu cầu của phụ tải. Ngoài ra, 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.

Sử dụng các thiết bị bù công suất phản ứng nhanh: Sự phát triển ngày càng nhanh của các thiết bị điện tử công suất đã giúp các nhà sản xuất trên thế giới cho ra đời các thiết bị điện 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 FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) [12-13]. 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 giảm nhấp nháy điện áp, bù công suất phản kháng, ổn định lưới và nâng cao chất lượng điện năng. Hiện nay, thiết bị FACTS thường được áp dụng trong hệ thống điện đó là các thiết bị bù tĩnh SVC (Static Var Compensator) và thiết bị STATCOM (Static Synchronous Compensator). Ngoài ra, một thiết bị bù mới được cải tiến từ thiết bị SVC cũng đang được sử dụng gọi là thiết bị bù lai.

2.1.1. Thiết bị bù công suất phản kháng kiểu tĩnh SVC

Thiết bị bù tĩnh SVC sử dụng hệ thống thyristor để điều chỉnh nhanh công suất của kháng điện [11, 14, 15]. Bằng cách điều chỉnh thời gian mở cuộn kháng trong 1 một chu kỳ điện thông qua góc mở α của hệ thống thyristor, công suất của cuộn kháng sẽ được điều chỉnh tron. Công suất của SVC sẽ là công suất của tụ điện C và công suất của cuộn kháng L.

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

Từ (1) nhận thấy, công suất tổng của SVC cũng có thể điều chỉnh trơn thông qua việc điều chỉnh tron công suất cuộn kháng L. Tùy theo yêu cầu mà hiện nay 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. Thiết bị SVC có tốc độ phản ứng nhanh, bù tron công suất phản kháng và giá thành thấp nhưng 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 (cao nhất có sóng hài bậc ba có thể chiếm tới 30% so với sóng cơ bản); công suất của thiết bị tỉ lệ với bình phương điện áp tại điểm đặt thiết bị.

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

Thiết bị STATCOM [16] có cấu tạo gồm bộ biến đổi nguồn áp DC-AC với thiết bị lưu trữ năng lượng thường là tụ điện. Thiết bị này vận hành như một nguồn áp đồng bộ nối với đường dây thông qua máy biến áp. Điện áp điều khiển đầu ra giữ 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 phản ứng nhanh hơn nhiều do không có phần quay. Trong những trường hợp điện áp lưới rất thấp, STATCOM vẫn làm việc hiệu quả (trong khi SVC gần như không thể làm việc với điện áp dưới 0,6 Uđm).

Thiết bị STATCOM tương tự như máy bù đồng bộ nhưng thời gian phản ứng nhanh và hiệu quả, giải quyết được các bài toán sóng hài bậc cao trong hệ thống điện. Có khả năng điều chỉnh cả hình dáng và chất lượng điện áp cho hệ thống điện bằng cách điều chỉnh số bậc xung, giữ cho hệ thống điện không mất ổn định. Tuy nhiên, thiết bị này có giá thành cao và tương đối cồng kềnh nên hiện nay thường được sử dụng để bù công suất phản kháng, điều chỉnh điện áp, trên lưới điện trung và cao áp [17]. So với SVC và các thiết bị bù khác thì STATCOM có nhiều ưu điểm hơn; thời gian phản ứng nhanh, cỡ 10ms; có khả năng điều khiển công suất phản kháng ít phụ thuộc vào điện áp nên có độ tin cậy cao hơn. Bên cạnh đó, thiết bị này còn tồn tại một số nhược điểm như chi phí chế tạo thiết bị còn cao nên số lượng thiết bị áp dụng trong hệ thống không nhiều.

2.1.3. Thiết bị bù tron công suất phản kháng dựa trên nguyên lý lai

Thiết bị bù lai thực chất là sự hoàn thiện 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 cuộn kháng được điều chỉnh bằng cách thay đổi góc mở của thyristor. Thiết bị bù lai có thể giúp điều khiển tron công suất phản kháng theo từng pha. Do đó, có thể sử dụng để 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.

Bù tập trung: Phương pháp này thường được áp dụng cho các loại tải ổn định và liên tục; thiết bị bù thường được đấu vào thanh cái của tủ phân phối chính và được đóng trong thời gian tải hoạt động. Ưu điểm của phương pháp là lắp đặt 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 các nhánh phụ tải

khí cần thiết và tăng dung lượng bù khi phụ tải tăng [7, 8]. Bên cạnh đó, phương pháp bù tập trung cũng có nhược điểm điển hình là không kiểm soát và điều khiển được điện áp tại các nút dưới phụ tải, do vậy không tối ưu được chất lượng điện áp tại các nút của phụ tải và không tối ưu được tổn hao của toàn hệ thống.

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 [18]. Bù phân tán với nhiều phương pháp tối ưu khác nhau như: tổn thất tổng nhỏ nhất, dung lượng bù nhỏ nhất, đạt được hệ số công suất như mong muốn, tối ưu vị trí bù [19]. 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 [20]; 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.

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 phần 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.

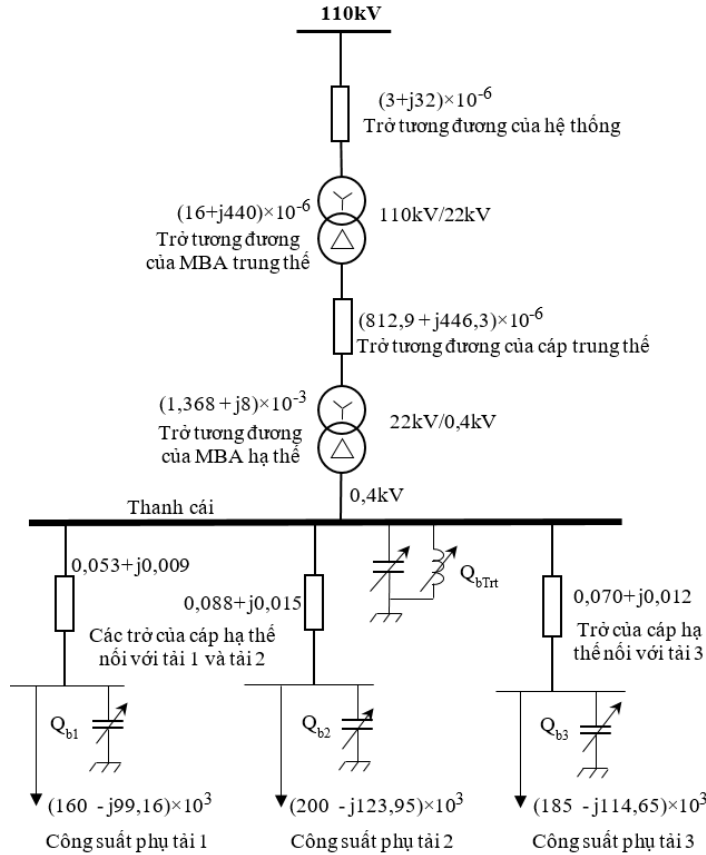
3. PHƯƠNG PHÁP TỐI THIỂU TỔN THẤT CÔNG SUẤT TÁC DỤNG

Các phần tử chính của hệ thống

Bài báo đề xuất xem xét một cấu hình cấp điện của một nhà máy, xí nghiệp điển hình được trình bày trong hình 1 bao gồm: nguồn cao thế 110 kV; cáp cao thế; trạm biến áp (MBA) trung thế; cáp trung thế; trạm biến áp hạ thế; ba phụ tải $i = 1 \div 3$ là 3 động cơ không đồng bộ; các cáp hạ thế; thiết bị bù tại trung tâm (QbTrt) và các thiết bị bù phân tán tại từng phụ tải (Qb1-3). 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 5 cho biết các thông số của hệ thống bao gồm:

- (1) Công suất ($P_i - jQ_i$) của ba phụ tải là các động cơ không đồng bộ công suất lớn có giá trị lần lượt là: $(160 - j9,16) \times 10^3$; $(200 - j123,95) \times 10^3$; $(185 - j114,65) \times 10^3$;
- (2) Các thiết bị bù tại từng phụ tải và thiết bị bù trung tâm có dung lượng bù lần lượt là: Qb1; Qb2; Qb3; QbTrt;
- (3) Trạm biến áp hạ thế 22 kV / 0,4 kV có điện trở tương đương là $(1,368 + j8) \times 10^{-3} \Omega$;
- (4) Trở kháng tương đương của cáp trung thế $(812,9 + j446,3) \times 10^{-6} \Omega$; với chiều dài cáp trung thế là 10 km.
- (5) Trạm biến áp trung thế 110 kV / 22 kV có điện trở tương đương là $(16 + j440) \times 10^{-6} \Omega$;
- (6) Trở kháng tương đương của hệ thống $(3 + j32) \times 10^{-6} \Omega$;

(7) Chiều dài của cáp từ thanh cái đến các tải động cơ 1, động cơ 2 và 3 lần lượt là: 0,15 km, 0,25 km và 0,2 km; từ đó tính ra điện trở tương đương tương ứng như sau: $0,053 + j0,009$; $0,088 + j0,015$ và $0,070 + j0,012$.



Hình 1. Sơ đồ điện trong nhà máy khi có thiết bị bù phân tán.

Với thiết bị bù được đặt ở cuối đường dây nên tính toán các thông số của hệ thống quy về phía hạ áp của MBA-T2. Tổng thất do phụ tải là động cơ không đồng bộ gây ra trên lưới điện khi có thiết bị bù được xác định như sau [21]:

$$\Delta P = R_{td} \frac{P_{tt}^2 + (Q_{tt} - Q_b)^2}{U_{ht}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_b \cdot Q_b + P_{tt} \cdot [1 - \eta_{max} - \Delta \eta \{Q_{tt} - Q_b\}] \quad (2)$$

Trong đó: R_{td} : Điện trở tương đương của lưới; P_{tt} : Công suất tác dụng tính toán; Q_{tt} : Công suất phản kháng tính toán của phụ tải; Δp_b : Tổng thất công suất tác dụng của thiết bị bù; η_{max} : Hiệu suất lớn nhất của phụ tải; $\Delta \eta \{Q_{tt} - Q_b\}$: Hàm hiệu suất theo biến Q_b của động cơ giảm khi có sự thay đổi điện áp đặt trên động cơ; Q_b : Công suất của thiết bị bù.

$$\Delta \eta \{Q_{tt} - Q_b\} = (K_1 \cdot \Delta U_{DC}^2 + K_2 \cdot \Delta U_{DC} + C) \times 10^{-2} \quad (3)$$

Trong đó: K_1 , K_2 và C - Những hằng số được xác định dựa trên đường cong thực nghiệm NEMA, đã được chúng tôi tính toán và lựa chọn theo công bố [22] là $K_1 = -0,017$; $K_2 = 0,035$ và $C = -0,018$; ΔU_{DC} - Tỷ số phần trăm giữa hiệu số điện áp đặt trên động cơ (U_{DC}) với giá trị điện áp định mức của động cơ (U_{dm_DC}) so với giá trị điện áp định mức này:

$$\Delta U_{DC} = \frac{U_{DC} - U_{dm_DC}}{U_{dm_DC}} \cdot 100 \quad (4)$$

Lúc này, điện áp đặt trên động cơ:

$$U_{DC} = \frac{U_{22}}{U_{11}} U_{ht} \cdot 10^3 - \Delta U \quad (5)$$

Theo [23] độ sụt áp tại các ĐC-KĐB khi có thiết bị bù được tính theo công thức sau:

$$\Delta U = \frac{P_u \cdot R_{td} + (Q_u - Q_b) X_{td}}{U_{ht}} \quad (6)$$

Trong đó: ΔU : Sụt áp trên đường dây và trạm biến áp; U_{22} : Điện áp thứ cấp của MBA-T2; U_{ht} : Điện áp hệ thống.

Có thể dễ dàng nhận thấy phương trình (2), phần tổn thất sẽ gồm 3 phần chính: (i) Phần thứ nhất là tổn thất trên các điện trở của các phần tử hệ thống điện như cáp điện, máy biến áp, hệ thống điện; (ii) Phần thứ hai là phần tổn thất trong các thiết bị bù; (iii) Phần thứ ba là tổn thất trong động cơ không đồng bộ. Khi xét đến tổn thất công suất tác dụng, bỏ qua tổn thất về cơ; tổn thất về điện từ trường,... Khi đó, công thức (2) chỉ xét đến yếu tố ảnh hưởng do chất lượng điện áp gây ra, ta có công thức thay thế sau:

$$\Delta P = R_{td} \frac{P_u^2 + (Q_u - Q_b)^2}{U_{ht}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_b \cdot Q_b + P_u \cdot [-\Delta \eta \{Q_u - Q_b\}] \quad (7)$$

Tổng tổn thất của hệ thống bù phân tán điều khiển tập trung với ba động cơ:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} = & \sum_{i=1 \div 3} \left[R_{l_i} \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_{bi})^2}{U_{TC}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_b \cdot Q_{bi} + P_i \cdot (-\Delta \eta_i \{Q_i - Q_{bi}\}) \right] \\ & + R_{ht_tc} \frac{P_{\Sigma}^2 + (Q_{\Sigma} - Q_{b\Sigma} - Q_{bTrt})^2}{U_{ht1}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_{bTrt} \cdot Q_{bTrt} \end{aligned} \quad (8)$$

Theo quy định các thiết bị và dây dẫn cho trạm theo quyết định số 4218/QĐ-EVN của tập đoàn điện lực ngày 3 tháng 07 năm 2001 [24], tổng công suất tủ bù hạ thế yêu cầu bằng 40% công suất máy biến áp, vậy ta có:

$$Q_{b\Sigma} + Q_{bTrt} = 40\% S_{MBA2} \Rightarrow Q_{b\Sigma} + Q_{bTrt} - 40\% S_{MBA2} = 0 \quad (9)$$

Áp dụng phương pháp Lagrange ta có:

$$\begin{aligned} L(Q_{bi}, Q_{bTrt}, \lambda) = & \sum_{i=1 \div 3} \left[R_{l_i} \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_{bi})^2}{U_{TC}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_b \cdot Q_{bi} + P_i \cdot (-\Delta \eta_i \{Q_i - Q_{bi}\}) \right] \\ & + R_{ht_tc} \frac{P_{\Sigma}^2 + (Q_{\Sigma} - Q_{b\Sigma} - Q_{bTrt})^2}{U_{ht1}^2} \cdot 10^{-3} + \Delta p_{bTrt} \cdot Q_{bTrt} + \lambda \cdot (Q_{b\Sigma} + Q_{bTrt} - 0,4 S_{MBA2}) \end{aligned} \quad (10)$$

Đạo hàm bậc nhất hàm $L(Q_{b1}, Q_{b2}, Q_{b3}, Q_{bTrt}, \lambda)$ theo Q_b và λ ta có:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTrt}, \lambda)}{\partial Q_{bi}} = -\frac{2 \cdot 10^{-3} R_{l_i}}{U_{TC}^2} (Q_i - Q_{bi}) + \Delta p_b - P_i \cdot \frac{\partial \Delta \eta_i \{Q_i - Q_{bi}\}}{\partial Q_{bi}} - \frac{2 \cdot 10^{-3} R_{td}}{U_{ht1}^2} (Q_{\Sigma} - Q_{b\Sigma} - Q_{bTrt}) + \lambda \\ \frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTrt}, \lambda)}{\partial Q_{bTrt}} = -\frac{2 \cdot 10^{-3} R_{td}}{U_{ht1}^2} (Q_{\Sigma} - Q_{b\Sigma} - Q_{bTrt}) + \Delta p_{bTrt} + \lambda \\ \frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTrt}, \lambda)}{\partial \lambda} = Q_{b\Sigma} + Q_{bTrt} - 0,4 S_{MBA2} \end{cases} \quad (11)$$

Để xác định cực trị của (7) từ (11) ta có:

$$\frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTr}, \lambda)}{\partial Q_{bi}} = 0; \frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTr}, \lambda)}{\partial Q_{bTr}} = 0; \frac{\partial L(Q_{bi}, Q_{bTr}, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \quad (12)$$

$$Q_{bi} = Q_i - \frac{A_{i2} \cdot (\Delta p_{bi} - \Delta p_{bTr}) - A_{i3}}{A_{i1}}; Q_{\Sigma} - Q_{b\Sigma} - Q_{bTr} = (Q_{\Sigma} - 0,4S_{MBA2}) \quad (13)$$

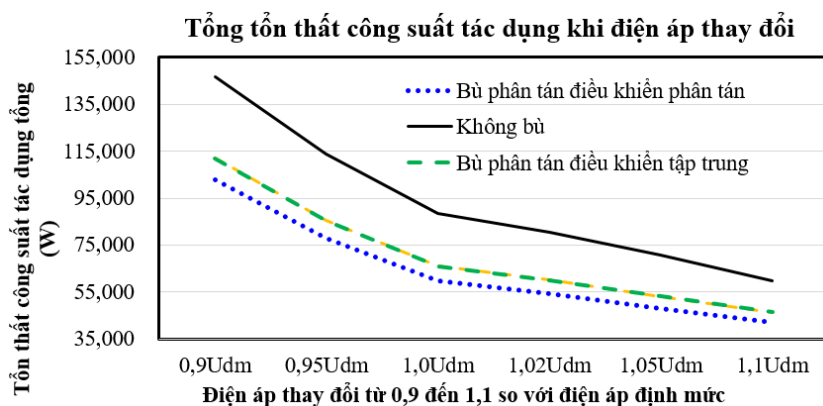
$$\begin{cases} A_{i1} = 2R_i \cdot 10^{-3} \cdot U_{dm}^2 - 2 \cdot 10^2 \cdot K_1 \cdot P_i \cdot X_{li}^2; \\ A_{i2} = (U_{dm} \cdot U_{TC})^2 \\ A_{i3} = P_i \cdot X_{li} \cdot \left\{ 2 \cdot 10^2 \cdot K_1 \cdot \left[(U_{TC} \cdot 10^3 - U_{dm}) U_{TC} - P_i \cdot R_{li} \right] + K_2 \cdot U_{dm} \cdot U_{TC} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

Với giả định điện áp cấp thay đổi dao động trong dải từ 0,9 đến 1,1 lần U_{dm} , sau khi tính toán dựa trên phần mềm Matlab để tối ưu tổng tổn thất của lưới. Dung lượng bù tại các vị trí, điện áp sau bù tại các phụ tải động cơ, tổn thất công suất tác dụng tại từng phụ tải và trên tủ bù cũng như tổng tổn thất của lưới được trình bày chi tiết trong bảng 1.

Bảng 1. Kết quả các thông số của hệ thống sau khi bù phân tán - điều khiển tập trung.

Điện áp thay đổi	Tham số thu được sau bù					
	0,9 U_{dm}	0,95 U_{dm}	1,0 U_{dm}	1,02 U_{dm}	1,05 U_{dm}	1,1 U_{dm}
Q_{b1} (kVAr)	111,4	109,9	108,3	107,6	106,5	104,5
Q_{b2} (kVAr)	139,3	137,2	134,8	133,8	132,1	129,2
Q_{b3} (kVAr)	128,3	126,5	124,3	123,4	122,0	119,4
Q_{Tr} (kVAr)	21,0	26,4	32,5	35,1	39,3	46,9
$\Delta P_{\Sigma PT-TT}$ (kW)	102,89	77,93	59,72	54,24	47,90	42,20

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 so sánh giữa các phương pháp bù, nhận 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, điều này cũng được thể hiện trực quan hơn trên hình 2.



Hình 2. Tổng tổn thất công suất tác dụng của các hệ thống khảo sát khi điện áp nguồn cấp thay đổi từ 0,9 U_{dm} đến 1,1 U_{dm} .

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 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%

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. Từ bảng 3 nhận thấy, đề xuất của bài báo giảm đáng kể về tổn thất tổng (32,58%) đây là đóng góp hiệu quả của giải pháp mang lại.

Bảng 3. Các nghiên cứu có liên quan trên thế giới.

STT	Vị trí bù	Phương pháp điều khiển	Tổn thất giảm (%)	Ghi chú
[25], 2012	Phân tán	Tập trung	31,00%	
[26], 2013	Phân tán	Tập trung	18,41%	Hệ thống nhỏ
[27], 2019	Phân tán	Tập trung	18,66%	Xét cân bằng pha
[19], 2021	Phân tán	Tập trung	66,17%	Sử dụng nguồn phân tán DG
			23,46%	Sử dụng tụ
			31,98%	Sử dụng DSTATCOM
[22], 2023	Phân tán	Tập trung	31,89%	Sử dụng tụ
Đề xuất	Phân tán	Tập trung	32,58%	Sử dụng tụ

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích các phương pháp nâng cao chất lượng điện áp, trong đó, giải pháp bù công suất phản kháng là một trong những giải pháp hiệu quả. 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 áp dụng thuật toán tối thiểu tổn thất công suất tác dụng dựa trên hàm Lagrange, 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 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," Natl. Conf. Sci. Eng. Technol., 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]. A. H. Bonnett, "The impact that voltage and frequency variations have on AC induction motor performance and life in accordance with NEMA MG-1 standards," in Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338), Seattle, WA, USA: IEEE, pp. 16–26, (1999). doi: 10.1109/PAPCON.1999.779341.
- [4]. R. E. Arajo, Ed., Induction Motors - Modelling and Control. InTech, (2012). doi: 10.5772/2498.
- [5]. A. H. Bonnett, "An overview of how AC induction motor performance has been affected by the October 24, 1997 implementation of the Energy Policy Act of 1992," in Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 45th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (Cat. No.98CH36234), Indianapolis, IN, USA: IEEE, pp. 149–164, (1998). doi: 10.1109/PCICON.1998.727942.
- [6]. Trần Đình Long, "Sổ tay tra cứu về chất lượng điện năng," in Sổ tay tra cứu về chất lượng điện năng, Hội điện lực Việt Nam, (2014).
- [7]. B.V. Карагодин and Д.В. Рыбаков, "ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ," Вопросы Электромеханики, p. T144, (2015).
- [8]. S. S. Kanojia and Suketu Rajyaguru, "Reactive Power Compensation for LV Distribution Network," Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng., vol. 8, no. 6, (2019).
- [9]. "NEMA Standards Publication MG 1-2006 Revision 1-2007 Motors and Generators." National Electrical Manufacturers Association, (2006).
- [10]. Austin H. Bonnett and Rob Boteler, "The Impact That Voltage Variations Have on AC Induction Motor Performance," Pulp Pap. IEEE, (1999).
- [11]. 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, (2005), doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
- [12]. S. Mirsaedi 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, pp. 1–8, (2021). doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510336.
- [13]. 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, pp. 1063–1070, (2020). doi: 10.1007/978-3-030-35386-5_23.
- [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, (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]. 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 Eng. J., vol. 14, no. 8, p. 102060, (2023), doi: 10.1016/j.asej.2022.102060.
- [17]. 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).
- [18]. F. Rezaei and S. Esmaili, "Decentralized reactive power control of distributed PV and wind power generation units using an optimized fuzzy-based method," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 87, pp. 27–42, (2017), doi: 10.1016/j.ijepes.2016.10.015.
- [19]. 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 Rep., vol. 7, pp. 8312–8321, (2021), doi: 10.1016/j.egy.2021.08.184.
- [20]. 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, pp. 75–80, (2021). doi: 10.1109/EPEC52095.2021.9621415.
- [21]. Nguyen Tien Dung, Dinh Ngoc Quang, and Bui Anh Tuan, "Voltage quality improvement for induction motor in power system," EPU J. Sci. Technol. Energy, vol. 22, no. 22, pp. 48–57, (2020).

- [22]. 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," *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 8, pp. 156–169, (2023), doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V10I8P115.
- [23]. Trần Bách, "Giáo trình lưới điện". Nhà xuất bản giáo dục, (2007).
- [24]. "Quy định các thiết bị và dây dẫn cho trạm theo quyết định số 4218/QĐ-EVN ngày 03/07/2001." EVN, (2001).
- [25]. 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, (2012), doi: 10.1109/TSG.2012.2197833.
- [26]. S. Bolognani and S. Zampieri, "A Distributed Control Strategy for Reactive Power Compensation in Smart Microgrids," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 58, no. 11, pp. 2818–2833, (2013), doi: 10.1109/TAC.2013.2270317.
- [27]. 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, (2019), doi: 10.3390/en12132479.

ABSTRACT

Distributed compensation solution with central control to minimize power losses of an electric power grid containing loads of 3-phase asynchronous motor loads

This paper presents an optimization method to minimize the active power loss of the power grid based on the Lagrange method. Our proposed method is applied to power grids containing many high-capacity three-phase motor loads. Through analyzing the advantages and disadvantages of reactive power compensation solutions, the paper proposes to use a centralized control distributed compensation solution that takes into account the factor of improving the performance of the motor in the system. The proposed compensation system consists of distributed compensators at each load along with a central compensator controlled by a single controller. This paper proposes a step-by-step strategy to control reactive power compensation for each load to optimize the active power loss of the entire plant, which means, improving voltage quality at loads, reducing active power losses as well as prolonging the lifespan of the devices. Simulation results are provided to demonstrate the effectiveness and applicability of the proposed method.

Keywords: 3-phase induction motors; Voltage variation; Reactive power; Reactive power compensator; Motor efficiency.