

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN PHỤ TẢI BẰNG SÓNG ĐỂ ĐIỀU CHỈNH DUNG LƯỢNG BÙ PHÂN TÁN LƯỚI TRUNG ÁP 35KV NHẪM GIẢM TỔN THẤT ĐIỆN NĂNG

RESEARCH ON USING RIPPLE CONTROL SYSTEM TO ADJUST DISTRIBUTED COMPENSATION CAPACITY OF 35KV MEDIUM VOLTAGE GRID TO REDUCE ELECTRICITY LOSS

Nguyễn Thị Bích Hậu*, Đỗ Đức Thành

Khoa Cơ - Điện, Trường Đại học Mở - Địa chất

*Email: hauhumg123@gmail.com

TÓM TẮT

Quá trình bù công suất phản kháng trong mạng lưới điện với phương pháp bù phân tán mang lại hiệu quả tốt hơn thay vì bù tập trung tại một vị trí. Hiệu quả tối ưu phụ thuộc vào việc xác định dung lượng bù, vị trí đặt hợp lý theo thông số phụ tải thực tế của mạng lưới điện. Quá trình thu thập dữ liệu phụ tải và thực hiện quá trình điều khiển đóng-cắt dung lượng bù có thể được thực hiện bằng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control). Bài báo này sử dụng thuật toán điều khiển tính toán dung lượng bù theo suất giảm chi phí tổn thất công suất và thời gian thu hồi vốn đầu tư nhằm giảm tổn thất trong mạng lưới điện đến mức tối thiểu. Lưới trung áp 35kV vùng Ưông Bí, Quảng Ninh được khảo sát và kiểm nghiệm cho hiệu quả của quá trình đóng-cắt dung lượng bù.

Từ khóa: Bù công suất phản kháng; Điều khiển bằng sóng; Lưới trung áp; Tổn thất điện năng.

ABSTRACT

The process of compensating reactive power in the power grid with the distributed compensation method brings better efficiency than centralized compensation at one location. The optimal efficiency depends on determining the compensation capacity and the appropriate location according to the actual load parameters of the power grid. The process of collecting load data and implementing the process of controlling the opening-closing of compensation capacity is executed by the ripple control system (Ripple Control). This paper uses the control algorithm to calculate the optimal compensation capacity according to the power cost reduction rate and the investment recovery time to minimize losses in the power grid. The 35kV medium-voltage grid in Uong Bi, Quang Ninh, is surveyed and tested for the efficiency of the closing-opening of compensation capacity.

Keywords: Reactive power compensation; Ripple control; Medium voltage grid; Power loss.

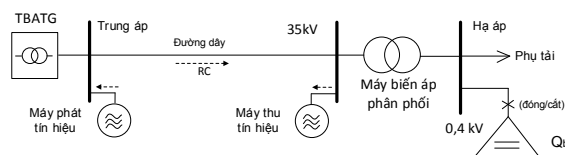
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề sử dụng hiệu quả và tiết kiệm năng lượng hiện nay đang được quan tâm khi mà các nguồn năng lượng sơ cấp ngày càng cạn kiệt. Theo chương trình quản lý nhu cầu điện (Demand Side Management - DSM) điều khiển phụ tải trực tiếp sao cho hiệu quả và kinh tế, phù hợp với khả năng cung cấp của nguồn điện luôn là một giải pháp được ưu tiên hàng đầu.

Ứng dụng của hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control - RC) [2] trong việc tiết kiệm năng lượng đối với các hệ thống như điều khiển linh hoạt hệ thống chiếu sáng công cộng, điều khiển giá điện cho công tơ nhiều giá, hệ thống thu thập dữ liệu và điều khiển giám sát từ xa (SCADA), sử dụng kênh truyền thông tin RC để điều khiển đóng - cắt các phụ tải điện từ trung tâm điều khiển... Quá trình nghiên cứu về lý thuyết và phân tích khả năng ứng dụng của công nghệ điều khiển phụ tải bằng sóng chưa được xem xét đầy đủ, đặc biệt là áp dụng điều chỉnh nhu cầu tiêu thụ điện của phụ tải DSM để đóng-cắt dung lượng bù nhằm giảm tổn thất năng lượng trong lưới trung áp.

Bài toán bù công suất phản kháng là giải pháp phổ biến để giảm tổn thất điện năng và đảm bảo chất lượng điện áp trong mạng lưới điện [1], [4], [5], [6], [8], [9]. Hiệu quả bù phụ thuộc vào tham số của mạng, dung lượng bù và vị trí đặt của thiết bị bù [4], [5]. Thông số của tải thay đổi liên tục theo thời gian trong ngày, nên việc đặt bù với dung lượng bù cố định không mang lại hiệu quả cao [6]. Do đó, việc thu thập số liệu phụ tải thời gian thực và tính toán lại vị trí bù hợp lý là một yêu cầu cấp thiết. Quá trình này có thể được sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control - RC).

Sơ đồ nguyên lý ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng trên đường dây trung áp được đưa ra trên Hình 1. Trong đó, hệ thống thông tin tải ba (Power Line Carrier - PLC) sử dụng sóng cao tần mang thông tin điều khiển (RC) xếp chồng với dạng sóng điện áp trên đường dây tải điện [2]. Phía trạm biến áp phân phối (35kV/0,4kV) nhận tín hiệu điều khiển từ trạm biến áp trung gian (TBATG) thực hiện chức năng đóng-cắt dung lượng bù để đạt được tối thiểu hóa mức tổn thất công suất (tổn thất điện năng) trên mạng lưới điện.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng RC

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Bài toán bù công suất phản kháng

Quá trình bù công suất phản kháng được thực hiện phân tán tại các vị trí khác nhau trong mạng lưới điện. Nguyên tắc bù:

$$\frac{\partial \delta P}{\partial Q_b} = \frac{\partial (\Delta P_1 - \Delta P_2)}{\partial Q_b} = 0$$

Với ΔP_1 , ΔP_2 - Tổn thất công suất trong lưới điện trước và sau khi bù, từ đó tính ra dung lượng bù $Q_b(t)$. Khi thông số phụ tải của lưới thay đổi theo thời gian trong ngày, trị số dung lượng bù cần phải thay đổi tương ứng để đạt hiệu quả bù cao nhất [6].

Với sơ đồ tính toán cho mạng lưới điện hình tia như trên Hình 2, kết quả bù tối ưu với dung lượng bù tại nút j được xác định theo công thức như sau:

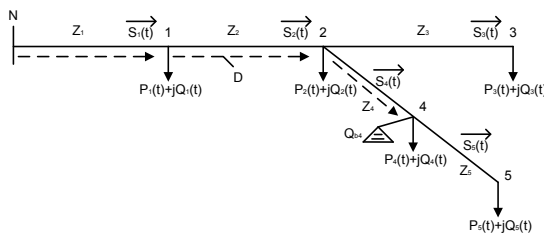


$$Q_{bj} = \frac{\sum_{i \in D} R_i Q_i}{\sum_{i \in D} R_i}$$

Trong đó: R_i là trị số điện trở của các dây dẫn trên đường đi (D) từ nguồn đến nút bù j [7].

2.2. Xác định vị trí, dung lượng bù tối ưu theo suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn đầu tư

Khi thực hiện bù công suất phản kháng, suất giảm chi phí tổn thất của thiết bị bù β là lợi nhuận thu được do giảm tổn thất khi bù 1 đơn vị công suất phản kháng: $\beta = \partial \Delta C / \partial \Delta Q_b$, đồng/kVar.năm [3]. Với hàm lợi nhuận: $\Delta C = g \cdot \tau \cdot \delta P$, với g - Giá bán điện, τ - Thời gian tổn thất công suất lớn nhất, δP - Độ giảm tổn thất công suất do đặt thiết bị bù [3]. Thời gian thu hồi vốn T_{th} cần thiết của thiết bị bù đặt tại nút j được xác định theo công thức sau:



Hình 2. Sơ đồ hình tia có bù công suất phản kháng Q_b

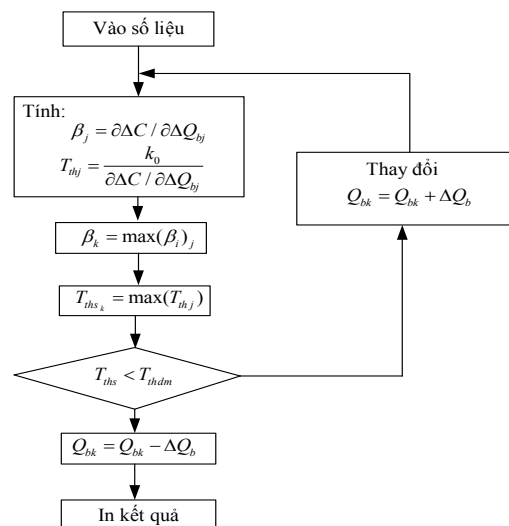
$$T_{th} = \frac{k_0}{\partial \Delta C / \partial \Delta Q_{bj}}$$

Với: k_0 - Suất vốn đầu tư cho một đơn vị công suất bù đặt thêm (đồng/kVar) [3].

Nhận thấy, hiệu quả của lượng công suất bù đặt thêm sẽ giảm dần đến 0 tại một giá trị $Q_{bù} = Q_{b\max}$, khi bù lớn hơn trị số này không những tổn thất không giảm mà còn bị tăng thêm ($\beta < 0$). Khi bù tại nhiều nút thì hiệu quả bù tại các nút khác bị giảm đi và hiệu quả bù tổng thể chỉ nhận

được trong một phạm vi nhất định [3]. Do đó, trước hết cần xác định hiệu quả bù cho tất cả các nút và tìm ra vị trí nút có hiệu quả bù cao nhất. Tính toán dung lượng bù theo nấc tại các vị trí có hiệu quả bù cao nhất cho đến khi thời gian thu hồi vốn bằng thời gian định mức.

Sơ đồ thuật toán tính toán dung lượng bù cho các nút đảm bảo thời gian thu hồi vốn đầu tư nhỏ hơn một thời hạn quy định được đưa ra trên Hình 3. Trong đó cần xác định nút k có hiệu quả bù cao nhất (lớn nhất) và nút s có thời gian thu hồi vốn T_{ths} lớn nhất (kém hiệu quả nhất) [3]. Tiến hành tăng thêm dung lượng bù cho nút k (nút hiệu quả bù cao nhất) một lượng ΔQ_b và quay lại thực hiện bước 1 cho đến khi $T_{ths} \geq T_{thdm}$.



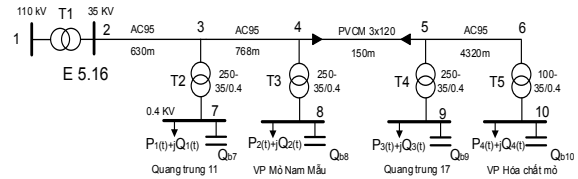
Hình 3. Sơ đồ thuật toán tính toán dung lượng bù tối ưu

3. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU VÀ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Sơ đồ nghiên cứu tính toán bù lưới trung áp 35kV vùng Uông Bí, Quảng Ninh cho trên Hình 4. Thông số về các máy biến áp và đường dây được cho trong Bảng 1 và Bảng 2 tương

ứng. Số liệu về phụ tải phía hạ áp $P_i(t)$, $Q_i(t)$ được thu thập theo thời gian thực sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (RC) trên đường dây tải điện trung áp 35kV [2]. Quá trình điều chỉnh dung lượng bù tại các nút tải hạ áp theo thuật toán ở trên nhằm giảm tổn thất công suất trong mạng lưới điện trung áp.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý lưới trung áp 35kV

Bảng 1. Thông số về máy biến áp

TT	MBA	U_{dm} , kV	S_{dm} , kVA	U_C , kV	U_H , kV	$U_{n.C-H}$, %	P_{Cu} , kW	P_{Fe} , kW	I_0 , %
1	Trạm 110kV	110	10000	115	35	10,5	60	14	0,9
2	Quang Trung 11	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
3	VP Mô Nam Mẫu	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
4	Quang Trung 17	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
5	VP Hóa chất mỏ	35	100	35	0,4	6,5	2,4	0,9	8,0

Bảng 2. Thông số về đường dây

STT	Nút đầu	Nút cuối	Loại dây	L (km)	R_0 , Ω /km	X_0 , Ω /km
1	2	3	AC95	0,63	0,31	0,384
2	2	4	AC95	0,768	0,31	0,384
3	4	5	PVCM 3x120	0,15	0,153	0,12
4	5	6	AC95	0,432	0,31	0,384

3.2. Xác định vị trí và dung lượng bù hợp lý

Ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng thu thập số liệu công suất tải phía hạ áp $P_i(t)$, $Q_i(t)$. Thông số phụ tải thay đổi theo thời gian giả định như trong Bảng 3. Dựa trên thông số sơ đồ nghiên cứu, thực hiện mô phỏng và tính toán tối ưu dung lượng bù theo thuật toán nêu ở trên sử dụng phần mềm mô phỏng CONUS [3] theo suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn khi đặt thiết bị bù.

Bảng 3. Bảng thông số phụ tải giả định theo thời gian

TT	% S_{max}	MBA T1		MBA T2		MBA T3		MBA T4	
		$P_1(t)$	$Q_1(t)$	$P_2(t)$	$Q_2(t)$	$P_3(t)$	$Q_3(t)$	$P_4(t)$	$Q_4(t)$
0h - 8h	30	36	42	45	54	30	36	18	24
8h - 16h	70	84	98	105	126	70	84	42	56
16h - 20h	100	120	140	150	180	100	120	60	80
20h - 24h	70	84	98	105	126	70	84	42	56



Các thông số kinh tế bù tối ưu: Giá bán điện bình quân là 2100 đ/kWh; thời gian tổn thất công suất lớn nhất là 4000h; giá thiết bị bù cấp 0,4kV là 500 nghìn đồng/kVAR; dung lượng đặt bù là 50kVAR; định mức thời gian thu hồi là 5 năm. Các phụ tải tiêu thụ được xem xét tại thời điểm có giá trị cực đại (tải 100% công suất lớn nhất). Kết quả phân tích hiệu quả bù bằng phần mềm CONUS [3] như sau:

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ BÙ

Nút	Suất giảm CP tổn thất (ng.dong/kVar.nam)	Thời gian thu hồi vốn (năm)
7	0.0	-
8	168.0	0.00
9	1176.0	0.00
10	1176.0	0.00

Từ kết quả phân tích hiệu quả bù nhận thấy là nút 9 và nút 10 có hiệu quả bù cao nhất (suất giảm chi phí tổn thất lớn nhất, 1176 nghìn đồng/kVAR.năm) nên tiến hành tính toán dung lượng bù tối ưu tại hai vị trí này. Kết quả tính toán dung lượng bù như sau:

KẾT QUẢ TÍNH DUNG LƯỢNG BÙ

Nút	Điện áp nút (kV)	Q _{bù} (MVar)	Suất vốn đầu tư (ng.d/ kVar)	Vốn đầu tư tổng (tr.d)
-				
9	0.40	0.500	500.0	25.0
10	0.40	0.000	500.0	0.0

* Tổng dung lượng bù toàn lưới: 0.050 MVar
 * Tổn thất công suất trước bù: 0.027 MWh
 * Tổn thất công suất sau bù: 0.025 MWh
 * Thời gian tổn thất CS: 4000 h
 * Tổn thất diện năng giảm: 8.000 MWh/năm
 * Giá bán điện bình quân: 2100 đ/kWh
 * Tổng vốn đầu tư: 25.000 tr.dong
 * Thời gian thu hồi vốn: 1.49 năm

Nhận thấy dung lượng bù tổng 50kVAR có hiệu quả bù tốt nhất là toàn bộ đặt tại vị trí nút 9 với 50kVAR và dung lượng bù cho nút 10 là 0kVAR. Khi đó các chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật như sau: tổn thất công suất trong lưới giảm 2MWh, tổn thất điện năng giảm 8000MWh/năm, tổng vốn đầu tư cho việc bù tại nút 9 là 25 triệu đồng, thời gian thu hồi vốn đầu tư cần thiết theo tính toán là cần 1,49 năm.

Trong quá trình vận hành, công suất tải tại vị trí các nút thay đổi theo thời gian (0h - 24h) với mức tải giả định là 30%, 70%, 100% công suất cực đại (Bảng 3). Mặc dù đã xác định được vị trí nút có hiệu quả bù cao nhất theo suất giảm chi phí tổn thất của thiết bị bù là nút 9, cần phải tính toán được dung lượng bù hợp lý khi tải biến động. Đối với sơ đồ nghiên cứu, tiến hành bù tại nút 9 với dung lượng bù theo từng nấc bù là 0, 10, 20, 30, 40, 50kVAR; kết quả tổn thất công suất trong lưới được tổng hợp trong bảng sau:

Bảng 4. Tổn thất công suất phụ thuộc tải

Q _{b9} , kVAR	Tổn thất công suất, kW		
	Tải 30%	Tải 70%	Tải 100%
0	17	22	27
10	18	23	33
20	18	15	27
30	12	22	27
40	18	21	27
50	18	21	20

Qua bảng kết quả tính tổn thất công suất nhận thấy: khi phụ tải làm việc với tỷ lệ 30%, 70%, 100% tải cực đại thì tổn thất công suất cực tiểu ở mức bù Q_{b9} = 30kVAR, 15kVAR, 20kVAR tương ứng. Từ biểu thức tính tổn thất điện năng, ta xác định tổn thất điện năng trước khi bù: $\Delta A_1 = 17 \cdot 8 + 22 \cdot 8 + 27 \cdot 4 + 22 \cdot 4 = 508$ (kWh/ngày) và tổn thất điện năng sau khi bù: $\Delta A = 12 \cdot 8 + 15 \cdot 8 + 20 \cdot 4 + 15 \cdot 4 = 356$ (kWh/ngày).

Chênh lệch tổn thất điện năng sau khi đặt thiết bị bù: $\delta A = \Delta A_1 - \Delta A_2 = 508 - 356 = 152$ (kWh/ngày).

Như vậy, sau khi bù công suất tác dụng theo dạng bậc thang thì ta giảm được đáng kể tổn thất công suất và tổn thất điện năng, ví dụ với sơ đồ nghiên cứu giảm tổn thất điện năng được 152 kWh/ngày, giảm gần 30% so với khi không tiến hành đặt bù. Đối với sơ đồ lưới điện trung áp nghiên cứu, khi chỉ đặt bù tại vị trí phường Quang Trung 17 (nút số 9 trên Hình 4) thì công suất đặt của thiết bị bù để đạt được tổn thất công suất trong lưới nhỏ nhất như sau:

- + Từ 0h đến 8h, thiết bị bù vận hành ở mức $Q_b = 30\text{kVAr}$.
- + Từ 8h đến 16h, tải tăng lên, chuyển thiết bị bù vận hành ở mức $Q_b = 20\text{kVAr}$.
- + Từ 16h đến 20h, tải tăng lên chuyển vận hành thiết bị bù ở mức $Q_b = 50\text{kVAr}$.
- + Từ 20h đến 24h, tải giảm đi, cần chuyển mức bù với $Q_b = 20\text{kVAr}$.

3.3. Cài đặt điều khiển tối ưu bằng hệ thống Ripple Control

Các bước thực hiện điều khiển đóng-cắt dung lượng bù tại các nút tải hạ áp sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng nhằm giảm tổn thất điện năng trong lưới trung áp như sau:

- B1: Thu thập thông tin về công suất tải hạ áp theo thời gian thực tế [2].
- B2: Xác định vị trí có hiệu quả bù cao nhất và dung lượng bù tối ưu bằng thuật toán ở trên sử dụng phần mềm CONUS [3].
- B3: Điều chỉnh dung lượng bù theo thời gian sử dụng hệ thống RC.
- B4: Lặp lại quy trình trên cho các khoảng thời gian trong ngày (0h-24h).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tập trung nghiên cứu bài toán tìm vị trí và dung lượng bù tốt nhất của thiết bị bù trong lưới trung áp. Chỉ tiêu suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn đầu tư được xác định để đánh giá hiệu quả bù công suất phản kháng. Khi thu thập được số liệu cấu trúc các phần tử của mạng lưới điện, phụ tải biến thiên theo thời gian thực sẽ xác định được dung lượng bù hợp lý nhất. Qua những kết quả tích cực mang lại được trích xuất từ mô hình nghiên cứu, kiến nghị ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng RC để đóng cắt dung lượng bù nhằm giảm tổn thất điện năng trong lưới trung áp. ❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 21/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Bùi Anh Tuấn (2022), “Nâng cao chất lượng điện áp tại các phụ tải ngành công nghiệp bằng hệ thống phân tán điều khiển tập trung đối với thiết bị bù công suất phản kháng”. Tạp chí Khoa học Khoa học và Công nghệ, tập 58, số 4, trang 22-28.
- [2]. Đào Xuân Tiên, Nguyễn Thị Huyền Thanh, Nguyễn Xuân Trường (2024), “Nghiên cứu, thiết kế hệ thống điều khiển giám sát phụ tải điện từ xa phục vụ quản lý nhu cầu điện”. Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam, tập 22, số 6, trang 778-788.
- [3]. Lê Văn Út (2010), “Hướng dẫn sử dụng chương trình tính toán phân tích chế độ xác lập của hệ thống điện CONUS”. Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, trang 1-62.
- [4]. Nguyễn Anh Minh, Trần Anh Tùng (2019), “Giảm tổn thất công suất cho xuất tuyến trung thế bằng biện pháp bù công suất phản kháng theo đồ thị phụ tải ngày sử dụng thuật toán di truyền”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng – Trường Đại học Điện Lực, số 20, trang 66-72.
- [5]. Nguyễn Thanh Hiền (2023), “Phân tích các thông số tải và tụ bù trên mô hình tụ bù Mikro PFR96 trong giảng dạy”. Tạp chí Công Thương, số 23 tháng 10 năm 2023.
- [6]. Nguyễn Văn Minh, Bạch Quốc Khánh (2017), “Tối ưu vị trí và dung lượng tụ bù trong lưới phân phối mẫu 16 nút sử dụng thuật toán di truyền để giảm tổn thất điện năng”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 42, trang 20-24.
- [7]. Phan Văn Khải (2003), “Bù công suất phản kháng lưới cung cấp và phân phối điện”. NXB. Khoa học và kỹ thuật.
- [8]. Triệu Quốc Huy (2023), “Nghiên cứu giải pháp bù công suất phản kháng tại các trạm biến áp 110/22kV tỉnh Trà Vinh”. Tạp chí Công Thương, số 18 tháng 8 năm 2023.
- [9]. Mahela O.P., Goyal D.M. L. (2012), “Optimal capacitor placement techniques in transmission and distribution networks to reduce line losses and voltage stability enhancement: A review”. O. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Vol. 3, Iss. 4, Pp. 01-08, Nov. – Dec.