

XÁC ĐỊNH DUNG LƯỢNG BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN GIÓ NGOÀI KHƠI THEO TIÊU CHUẨN ĐẦU NỔI LƯỚI VIỆT NAM

DETERMINATION OF REACTIVE POWER COMPENSATION CAPACITY FOR AN OFFSHORE WIND POWER PLANT IN COMPLIANCE WITH VIETNAMESE GRID CODE

Ma Thị Thương Huyền*, Vũ Hoàng Giang

Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: huyenmtt@epu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 29/6/2023; Sửa bài / Revised: 17/11/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 06/12/2023)

Tóm tắt - Để được phép đấu nối lên lưới điện, nhà máy điện gió cần đáp ứng yêu cầu về khả năng điều chỉnh công suất phản kháng tại điểm kết nối chung (PCC). Yêu cầu này đối với nhà máy điện gió ngoài khơi phụ thuộc vào nhiều yếu tố như loại máy phát điện gió, máy biến áp và đặc biệt là đường dây cáp truyền tải xoay chiều điện áp cao. Bài báo trình bày kết quả tính toán xác định dung lượng bù công suất phản kháng cho nhà máy điện gió sử dụng máy phát loại cảm ứng nguồn kép (DFIG) được nối lưới thông qua các máy biến áp ngoài khơi và cáp ngầm cao áp để đáp ứng tiêu chuẩn đầu nối lưới của Việt Nam. Khả năng phát và tiêu thụ công suất phản kháng của các phần tử trong hệ thống điện gió được phân tích nhằm tính toán dung lượng bù. Mô phỏng trên máy tính được thực hiện để kiểm chứng đáp ứng công suất phản kháng yêu cầu tại điểm PCC. Kết quả mô phỏng cho thấy, dung lượng bù đã chọn đảm bảo tiêu chuẩn đầu nối lưới.

Từ khóa - Bù công suất phản kháng; điện gió ngoài khơi; DFIG

1. Đặt vấn đề

Điện gió ngoài khơi được xem là nguồn năng lượng tái tạo quan trọng góp phần giúp Việt Nam đạt được cam kết NetZero vào năm 2050. Theo Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050 đã được phê duyệt [1], cơ cấu nguồn điện của hệ thống điện Việt Nam sẽ có sự đóng góp 6 GW (4,0%) từ điện gió ngoài khơi vào năm 2030 và định hướng năm 2050 đạt 70 GW-91,5 GW. Do tính chất ngẫu nhiên và bất định của điện gió, khi tích hợp một lượng lớn công suất điện gió vào lưới điện sẽ ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng điện năng cũng như sự vận hành an toàn và ổn định của hệ thống điện [2]. Một trong các yêu cầu đối với các nhà máy điện gió là phải đảm bảo khả năng điều chỉnh công suất phản kháng theo tiêu chuẩn đầu nối lưới [3], [4].

Trong các hệ thống điện gió ngày nay, máy phát điện cảm ứng nguồn kép (DFIG) và máy phát điện đồng bộ sử dụng nam châm vĩnh cửu (PMSG) được sử dụng phổ biến nhất. Các máy phát này được kết nối với lưới thông qua các bộ biến đổi có khả năng điều chỉnh công suất phản kháng và điện áp [5]. Trong bài báo [6], các tác giả đã chỉ ra phương pháp xác định chính xác khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của các máy phát điện gió loại DFIG có xét đến các yếu tố giới hạn như giới hạn dòng điện stator, dòng điện rotor, điện áp rotor, hiện tượng từ hóa và khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của bộ biến đổi

Abstract - To be authorized to connect to the power grid, a wind power plant needs to meet requirements regarding the capability to regulate reactive power at the Point of Common Coupling (PCC). These requirements for offshore wind power plants depend on various factors, such as the type of wind generators, transformers, and especially the high-voltage AC transmission cables. This paper presents the calculated results determining the reactive power compensation capacity for an offshore wind power plant using a doubly fed induction generator (DFIG), which is connected to the main grid via an offshore transformer and high-voltage submarine cables, to comply with Vietnam's grid code. The reactive power capability of each component in the wind power system is analyzed to determine compensation amount. Computer simulations are performed to verify the compliance with the reactive power requirements at the PCC. Simulation results show that, the selected compensation capacity ensures adherence to the grid connection standards.

Key words - Reactive power compensation; offshore wind power; DFIG

phía lưới điện. Khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của máy phát điện gió loại PMSG có xét đến mô hình, giới hạn về dòng điện và điện áp của bộ biến đổi phía lưới điện được trình bày trong [6]. Các nghiên cứu này cho thấy, lượng công suất phản kháng phát ra hoặc tiêu thụ của các máy phát điện gió chỉ đáp ứng một phần yêu cầu từ phía lưới điện.

Các nhà máy điện gió ngoài khơi thường được lắp đặt với công suất lớn, nằm xa đất liền nên việc xây dựng hệ thống truyền tải đầu nối nhà máy với lưới hệ thống là một trong những thách thức lớn. Hiện nay, hai công nghệ truyền tải xoay chiều điện áp cao (HVAC) và truyền tải một chiều điện áp cao (HVDC) đều được áp dụng cho các nhà máy điện gió ngoài khơi. Công nghệ HVDC có ưu điểm không sinh công suất phản kháng và giảm được tổn thất. Tuy nhiên, nhược điểm của công nghệ này là cần vốn đầu tư lớn cho các bộ chỉnh lưu, nghịch lưu và cáp một chiều. Bởi vậy công nghệ này thích hợp cho các trường hợp nhà máy có công suất truyền tải lớn, khoảng cách truyền tải xa [7]. Ngược lại, khi khoảng cách truyền tải dưới 100 km, hệ thống HVAC được ưa chuộng hơn các ưu điểm như cấu trúc điều khiển và các thiết bị phần cứng đơn giản, chi phí bảo dưỡng và lắp đặt thấp, và sự kế thừa bề dày kinh nghiệm trong lắp đặt và vận hành HVAC trên đất liền [7], [8]. Tuy nhiên, một nhược điểm lớn của hệ thống này là đòi hỏi trang bị thêm thiết bị bù công suất phản kháng và

¹ Electric Power University, Hanoi, Vietnam (Ma Thi Thuong Huyen, Vu Hoang Giang)

điều chỉnh điện áp để đáp ứng được các tiêu chuẩn nối lưới [9]. Bài báo này sẽ tập trung nghiên cứu đối với trường hợp sử dụng hệ thống HVAC phù hợp với bối cảnh giai đoạn đầu phát triển điện gió ngoài khơi ở Việt Nam.

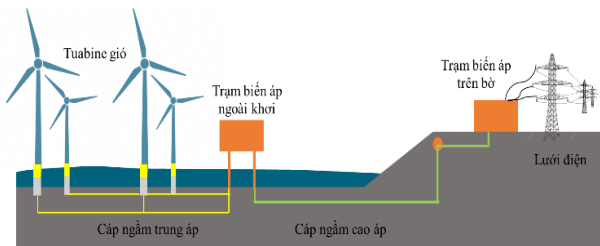
Bù công suất phản kháng ở nhà máy điện gió là giải pháp bắt buộc nhằm đảm bảo yêu cầu về chất lượng điện áp, giảm tổn thất công suất, nâng cao ổn định và an toàn vận hành hệ thống. Có nhiều phương pháp khác nhau để xác định dung lượng bù cho các nhà máy điện gió tùy theo loại máy phát điện gió, cấu trúc của các nhà máy điện gió và vị trí đặt thiết bị bù. Các nhà máy điện gió thường sử dụng các thiết bị bù công suất phản kháng như tụ bù tĩnh (Static var compensators - SVC) hoặc thiết bị bù động (STATCOM) [10], [11]. Trong trường hợp tiêu chuẩn nối lưới xác định rõ yêu cầu về hệ số công suất cho nhà máy điện gió thì dung lượng công suất phản kháng cần bù được tính theo hệ số công suất đó [12]. Một số trường hợp dung lượng bù được xác định đơn giản theo nguyên tắc không có chuyên gia công suất phản kháng tại điểm kết nối lưới [13]. Phương pháp xác định vị trí và dung lượng của thiết bị bù cho nhà máy điện gió ngoài khơi nối lưới qua hệ thống truyền tải HVAC dựa trên cơ sở tối thiểu hóa chi phí do tổn thất công suất và chi phí cho thiết bị bù được đề cập tới trong bài báo [8], [14]. Tuy nhiên, dung lượng bù này có đảm bảo tiêu chuẩn đầu nối lưới hay không chưa được các tác giả làm rõ. Bài báo [15] trình bày phương pháp điều khiển công suất bù của kháng bù ngang (VSR) đáp ứng tiêu chuẩn nối lưới của nhà máy điện gió ngoài khơi nhưng bài báo không đề cập tới cách xác định dung lượng định mức của thiết bị bù.

Bài báo này trình bày phương pháp xác định dung lượng bù cho một nhà máy điện gió ngoài khơi nối lưới qua hệ thống cáp ngầm dưới biển HVAC theo tiêu chuẩn nối lưới của Việt Nam có xét đến khả năng phát và tiêu thụ công suất phản kháng của các máy phát điện gió.

2. Khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của nhà máy điện gió ngoài khơi

2.1. Cấu trúc của nhà máy điện gió ngoài khơi nối lưới qua cáp ngầm HVAC

Cấu trúc của nhà máy điện gió ngoài khơi theo công nghệ HVAC điển hình có dạng như Hình 1. Các tuabin gió được kết nối với nhau và nối tới trạm biến áp ngoài khơi thông qua hệ thống cáp ngầm điện áp từ 35 đến 66 kV. Trạm biến áp ngoài khơi được liên kết tới điểm đầu nối lưới trên bờ thông qua các cáp ngầm dưới biển với điện áp 110 kV trở lên.



Hình 1. Cấu trúc điển hình của nhà máy điện gió ngoài khơi nối lưới qua hệ thống HVAC [8]

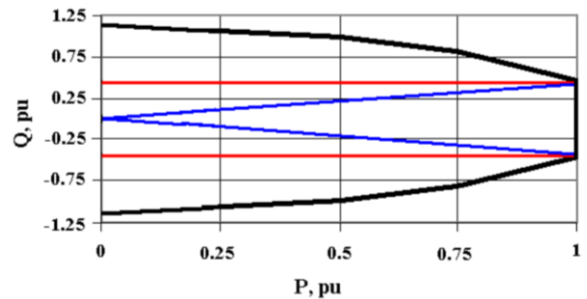
Thiết bị bù có thể đặt ở đầu cáp phía trạm biến áp ngoài khơi với mục đích giảm tổn thất công suất, hoặc đặt ở

đầu cáp phía trạm biến áp trên bờ để đáp ứng tiêu chuẩn nối lưới.

2.2. Khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của các phần tử trong nhà máy điện gió ngoài khơi

2.2.1. Máy phát điện gió

Như đã đề cập ở trên, máy phát điện cảm ứng nguồn kép và máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu được sử dụng phổ biến trong các hệ thống điện gió ngày nay. Máy phát điện được nối lưới qua bộ biến đổi phía lưới từ rotor đối với DFIG hoặc từ stator đối với PMSG. Thông qua điều khiển các bộ biến đổi phía lưới điện, nhà máy điện gió có khả năng điều chỉnh công suất phản kháng và điện áp [5]. Theo đó, hai loại máy phát điện gió này được thiết kế để vận hành trong dải điện áp từ 90% đến 110% giá trị điện áp định mức. Đặc tính điều chỉnh công suất phản kháng theo công suất phát của hai loại máy phát điện gió này được xác định bởi nhà sản xuất và thường có dạng hình tam giác, hình chữ nhật hoặc hình chữ D như Hình 2.



Hình 2. Các dạng đường đặc tính khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của máy phát điện gió ở điện áp định mức (Hình tam giác – màu xanh; hình chữ nhật – màu đỏ, hình chữ D – màu đen) [5]

2.2.2. Cáp điện lực

Công suất phản kháng do điện dung ký sinh của cáp sinh ra tỷ lệ với điện dung đơn vị, chiều dài cáp, tần số và điện áp của lưới điện. Giá trị công suất phản kháng đó được xác định theo công thức (1)

$$Q_{Cap} = V^2 \omega C, \text{ MVar} \quad (1)$$

Trong đó, V là điện áp của lưới điện (kV); ω là tần số góc và C (F) là điện dung của cáp. Khi khoảng cách từ nhà máy điện gió tới đất liền lớn, công suất phản kháng do cáp sinh ra sẽ rất lớn và cần thiết phải đặt các kháng bù để tiêu thụ một phần hoặc toàn bộ lượng công suất này.

Mặt khác, khi truyền tải công suất, một phần công suất phản kháng tiêu thụ trên điện kháng của cáp. Tổn thất này tỷ lệ với bình phương dòng điện và điện kháng của cáp, được xác định theo công thức (2).

$$\Delta Q_{Cap} = I^2 X_C = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} X_C, \text{ MVar} \quad (2)$$

Trong đó, I (A) là dòng điện chạy qua cáp; P (MW) và Q (MVar) tương ứng là công suất tác dụng và công suất phản kháng chạy qua cáp; X_C (Ω) là điện kháng của cáp.

2.2.3. Máy biến áp

Điện năng phát ra từ các máy phát điện trong trang trại điện gió thường được nâng lên cấp điện áp trung áp và truyền tải ở khoảng cách ngắn đến vài km. Sau đó, để truyền tải điện năng vào đất liền, máy biến áp tăng áp được

sử dụng để nâng lên cấp điện áp cao hơn phù hợp với truyền tải công suất lớn và khoảng cách xa đến hàng chục km. Tổng thất công suất trong máy biến áp chiếm tỷ phần lớn trong tổng tổn thất của hệ thống truyền tải và phân phối điện nội chung. Xét về công suất phản kháng, các thành phần chính tổn thất trong máy biến áp gồm tổn thất do từ hóa các cuộn dây của máy biến áp (3) và tổn thất trong lõi thép còn gọi là tổn thất không tải không phụ thuộc vào trị số của công suất tải qua máy biến áp (4).

$$\Delta Q_B = I^2 X_B = \frac{P^2 + Q^2}{V_{dm}^2} X_B, MVar \quad (3)$$

$$\Delta Q_{0B} = \frac{I_0 \cdot S_{dmB}}{100}, MVar \quad (4)$$

Với P (MW) và Q (MVar) là tương ứng là công suất tác dụng và công suất phản kháng chạy qua máy biến áp; X_B (Ω) là điện kháng của máy biến áp; I_0 (%) là dòng điện không tải; S_{dmB} (MVA) là công suất định mức của máy biến áp.

Như vậy, khả năng công suất phản kháng của nhà máy điện gió tính đến điểm đấu nối lưới khi chưa có bù công suất phản kháng được xác định theo công thức (5):

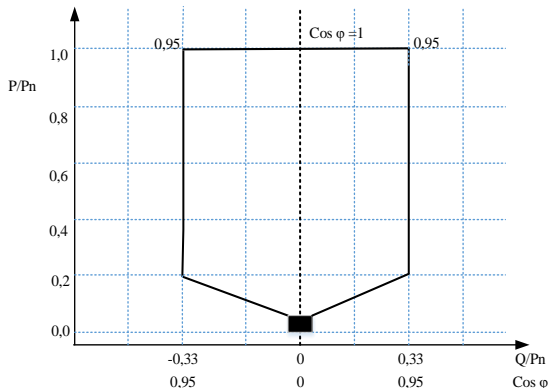
$$Q_{nm} = Q_W + Q_{cap} - \Delta Q_{cap} - \Delta Q_B - \Delta Q_{0B} \quad (5)$$

Khi đặt thiết bị bù ngay tại vị trí điểm kết nối, khả năng công suất phản kháng của nhà máy được xác định theo công thức (6):

$$Q_{nm} = Q_W + Q_{cap} + Q_{bù} - \Delta Q_{cap} - \Delta Q_B - \Delta Q_{0B} \quad (6)$$

2.3. Yêu cầu về khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của nhà máy điện gió

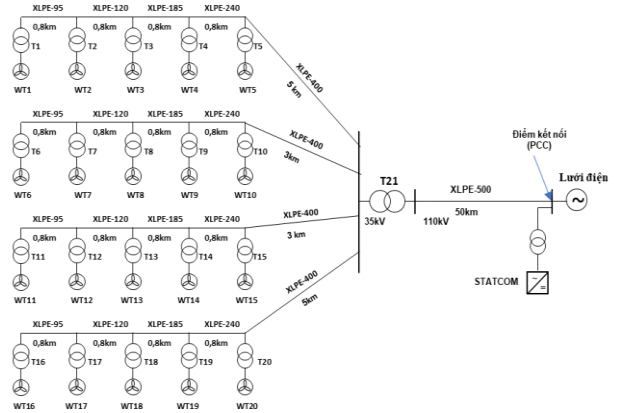
Theo thông tư của Bộ Công thương [4], các nhà máy điện gió nối lưới phải có khả năng điều chỉnh công suất phản kháng tại điểm đấu nối theo đặc tính như Hình 3. Theo đó, khi nhà máy điện phát công suất tác dụng lớn hơn hoặc bằng 20% công suất tác dụng định mức và điện áp tại điểm đấu nối trong dải $\pm 10\%$ điện áp danh định, nhà máy điện phải có khả năng điều chỉnh liên tục công suất phản kháng trong dải từ hệ số công suất 0,95 (ứng với chế độ phát công suất phản kháng) đến 0,95 (ứng với chế độ tiêu thụ công suất phản kháng) tại điểm đấu nối. Trường hợp nhà máy điện phát công suất tác dụng nhỏ hơn 20% công suất định mức, nhà máy điện gió có thể giảm khả năng tiêu thụ hoặc phát công suất phản kháng phù hợp với đặc tính của nhà máy.



Hình 3. Yêu cầu về khả năng điều chỉnh công suất phản kháng của nhà máy điện gió tại điểm kết nối lưới

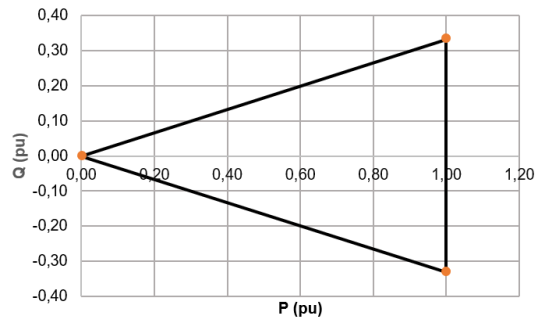
3. Xác định dung lượng bù công suất phản kháng cho nhà máy điện gió ngoài khơi theo tiêu chuẩn nối lưới

Mục này giới thiệu kết quả tính toán dung lượng bù công suất phản kháng cho một nhà máy điện gió ngoài khơi có công suất lắp đặt là 100 MW gồm 20 tuabin gió, công suất mỗi tuabin là 5 MW có sơ đồ đấu nối như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ nối nhà máy điện gió với hệ thống điện

Nhà máy sử dụng máy phát điện gió loại DFIG có khả năng phát hoặc tiêu thụ công suất phản kháng. Đặc tính công suất phản kháng của máy phát như Hình 5, giá trị công suất phản kháng phát ra của 20 máy phát điện gió (Q_{DFIG}) như trong Bảng 1.



Hình 5. Đặc tính công suất phản kháng theo công suất tác dụng của máy phát điện gió loại DFIG

Bảng 1. Khả năng công suất phản kháng của nhà máy điện gió

P (pu)	cosφ	Q _{DFIG} (MVar)	Q _{nm} (MVar)			Q _{yc}	Q _{bù} (max)
			0,95 pu	1,0 pu	1,1 pu		
1	1	0	19,82	25,26	36,21	0	-36,2
0,2	1	0	39,54	43,64	52,47	0	-52,5
0	1	0	40,35	44,40	53,14	0	-53,1
1	0,95	32,87	50,57	56,05	67,10	33	-34,1
0,2	0,95	6,57	45,84	49,96	58,80	33	-25,8
1	-0,95	-32,87	-15,44	-9,74	1,60	-33	-34,6
0,2	-0,95	-6,57	33,05	37,16	45,99	-33	-79,0

Các tuabin gió được nối qua 1 máy biến áp để tăng điện áp từ 690 V lên 35 kV. Các tuabin gió được nối với nhau qua hệ thống cáp ngầm 35 kV tới máy biến áp ngoài khơi công suất 125 MVA. Cáp xoay chiều 110 kV tiết diện 500 mm² được sử dụng để kết nối nhà máy điện gió với hệ thống điện trên bờ. Thông số của các máy biến áp và cáp cho trong Bảng PL.1 và Bảng PL.2.

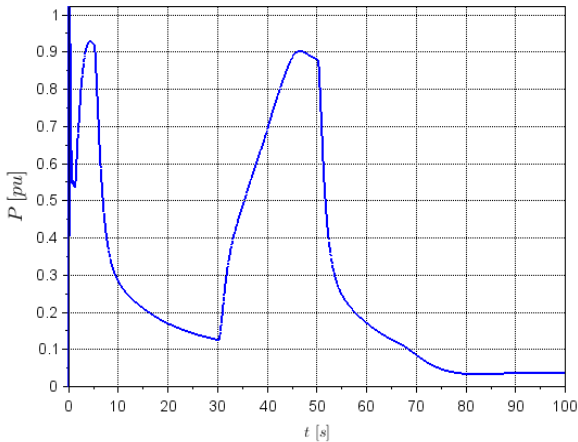
Để xác định dung lượng công suất phản kháng cần thiết đặt bù cho nhà máy cần xác định được khả năng công suất phản kháng của nhà máy tính đến điểm đấu nối lưới. Thực hiện tính toán phân bố công suất toàn nhà máy với các mức công suất tác dụng của nhà máy khác nhau, hệ số công suất khác nhau ở 3 chế độ điện áp tại điểm kết nối: 0,95 pu (đơn vị tương đối); 1,0 pu; 1,1 pu ứng với các giới hạn và điểm làm việc trong tiêu chuẩn nối lưới. Công suất phản kháng cần bù được xác định theo công thức:

$$Q_{bù} = Q_{yc} - Q_{nm} \quad (7)$$

Kết quả tính toán trong Bảng 1 cho thấy, lượng công suất phản kháng do cấp sinh ra rất lớn, nên ở hầu hết các chế độ làm việc nhà máy đều phát công suất phản kháng (khi tính đến điểm kết nối lưới). Nhà máy (tính đến điểm kết nối) tiêu thụ công suất phản kháng khi máy phát điện giới làm việc ở chế độ tiêu thụ công suất phản kháng và phát 100% công suất tác dụng với mức điện áp tại điểm kết nối nhỏ hơn 110% điện áp danh định. Mức công suất cần bù lớn nhất ở chế độ máy phát DFIG tiêu thụ công suất phản kháng và phát 20% công suất tác dụng với dung lượng cần bù là -79 MVAR.

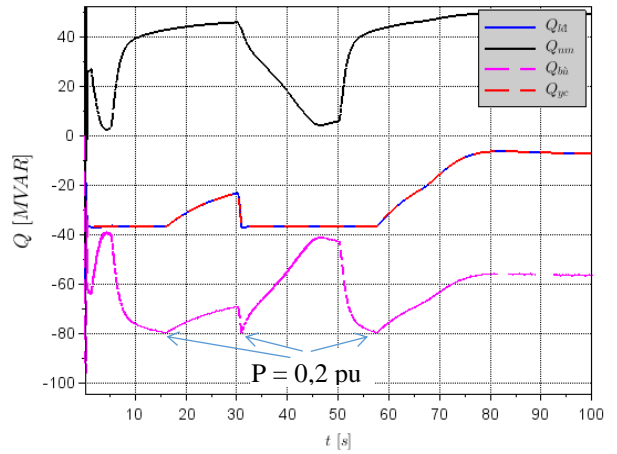
4. Mô phỏng sự làm việc của nhà máy khi có thiết bị bù

Phần này giới thiệu kết quả mô phỏng hoạt động của nhà máy điện gió ngoài khơi kết nối với lưới điện theo sơ đồ như trên Hình 4. Thiết bị bù loại STATCOM với dung lượng ± 79 MVAR được đặt tại điểm PCC. Mô hình của các phần tử trong hệ thống điện gió sử dụng loại máy phát điện DFIG đã được giới thiệu trong các nghiên cứu [16], [17]. Thay đổi công suất phát của nhà máy theo tốc độ gió đầu vào, ta có công suất phát từ nhà máy điện gió cung cấp tới điểm kết nối như Hình 6.



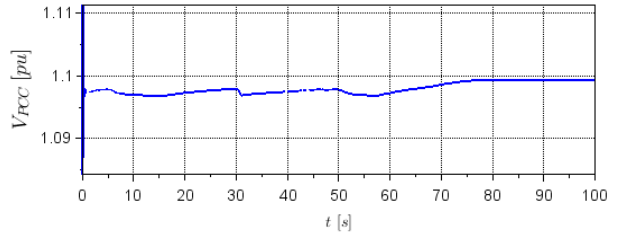
Hình 6. Công suất tác dụng của nhà máy cung cấp tới điểm PCC

Hình 7 thể hiện kết quả mô phỏng các dòng công suất phản kháng tại điểm kết nối lưới điện. Nhận thấy với mọi mức công suất tác dụng phát ra, công suất phản kháng do nhà máy điện gió cung cấp tới điểm kết nối khi chưa bù (Q_{nm}) luôn lớn hơn công suất phản kháng yêu cầu theo tiêu chuẩn nối lưới (Q_{yc}). Khi thực hiện bù, thiết bị bù đã thay đổi công suất bù ($Q_{bù}$) tương ứng, đảm bảo công suất phản kháng của nhà máy tại điểm kết nối trùng khớp với công suất yêu cầu.

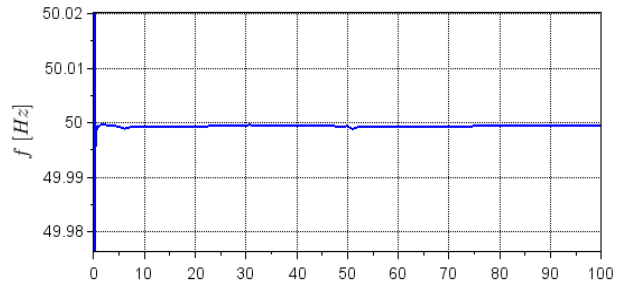


Hình 7. Các dòng công suất phản kháng tại điểm PCC: Công suất phát về lưới điện (Q_{ld}); công suất yêu cầu (Q_{yc}); công suất nhà máy cung cấp tới điểm PCC (Q_{nm}) và công suất của thiết bị bù ($Q_{bù}$)

Hơn nữa, điện áp tại điểm PCC được duy trì nhỏ hơn giá trị giới hạn trên 1,1 pu, Hình 8, và tần số được duy trì ổn định trong giới hạn cho phép như được thể hiện trên Hình 9.



Hình 8. Điện áp tại điểm kết nối chung (PCC)



Hình 9. Tần số của hệ thống điện

Kết quả mô phỏng cho thấy, với dung lượng đã tính toán, thiết bị bù làm việc tốt và đáp ứng được yêu cầu về điều chỉnh công suất phản kháng theo tiêu chuẩn đấu nối lưới đồng thời đảm bảo điện áp và tần số tại điểm kết nối nằm trong giới hạn cho phép khi nhà máy làm việc ở các chế độ vận hành khác nhau.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định dung lượng bù công suất phản kháng cho nhà máy điện gió ngoài khơi có xét đến khả năng tiêu thụ và phát công suất phản kháng của máy phát điện gió, máy biến áp và cáp. Kết quả mô phỏng cho thấy, với dung lượng bù đã tính toán nhà máy đảm bảo khả năng điều chỉnh công suất phản kháng theo tiêu chuẩn đấu nối lưới của Việt Nam. Ngoài ra, đối với điện gió ngoài khơi bên cạnh máy phát điện gió, đường dây cáp ngầm cũng là phần tử có ảnh hưởng lớn tới khả năng

cung cấp công suất phản kháng của nhà máy và cần tính toán chi tiết, cần thận khi xác định dung lượng định mức của thiết bị bù.

Trên cơ sở nghiên cứu hiện tại, phân tích lựa chọn loại thiết bị bù và phân chia thành nhiều vị trí đặt là hướng nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển trên phạm vi hệ thống điện gió ngoài khơi tính đến điểm kết nối chung với lưới điện trên bờ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Điện lực (EPU) qua đề tài cấp trường năm 2023.

Các tác giả xin trân trọng gửi lời cảm ơn đến TS. Lê Xuân Thành, Trường Đại học Mở Địa chất đã giúp đỡ trong việc thực hiện các tính toán và thảo luận về các mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] The Government of Vietnam, *Decision No. 500/QĐ-TTg dated May 15, 2023 on approving the National Electricity Development Planning of 2021 - 2030 and vision for 2050, Vietnam*, 2023.
- [2] D. Flynn *et al.*, “Technical impacts of high penetration levels of wind power on power system stability”, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 6, No. 2, 2017. doi: 10.1002/wene.216
- [3] K. V. Bhadane, T. H. Jaware, D. P. Patil, and A. Nayyar, “Wind Energy System Grid Integration and Grid Code Requirements of Wind Energy System”, in *Control and Operation of Grid-Connected Wind Energy Systems*, 2021, pp. 247–273. doi: 10.1007/978-3-030-64336-2_10.
- [4] The Ministry of Industry and Trade, *Circular No. 30/2019/TT-BCT dated November 18, 2019 of the Ministry of Industry and Trade on amending and supplementing a number of articles of the Circular No. 25/2016/TT-BCT and the Circular No. 39/2015/TT-BCT, Vietnam*, 2019.
- [5] A. Ellis *et al.*, “Reactive power performance requirements for wind and solar plants”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345568.
- [6] M. N. Sakib, K. Shabbir, X. Liang, W. Li, and N. Khan, “Analytical Approach-Based Reactive Power Capability Curve for DFIG Wind Power Plants”, *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2020*. 2020. doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334911.
- [7] S. Rahman, I. Khan, H. I. Alkhamash, and M. F. Nadeem, “A Comparison Review on Transmission Mode for Onshore Integration of Offshore Wind Farms: HVDC or HVAC”, *Electronics*, vol. 10, no. 12. 2021. doi: 10.3390/electronics10121489.
- [8] J. Dakic, M. Cheah-Mane, O. Gomis-Bellmunt, and E. Prieto-Araujo, “HVAC Transmission System for Offshore Wind Power Plants Including Mid-Cable Reactive Power Compensation: Optimal Design and Comparison to VSC-HVDC Transmission”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 5, pp. 2814–2824, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3027356.
- [9] Z. Chen, D. Xiaowei, and Z. Guiping, “Optimisation of reactive power compensation of HVAC cable in off-shore wind power plant”, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, Jun. 2015, doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0375.

- [10] J. Qi, W. Zhao, and X. Bian, “Comparative Study of SVC and STATCOM Reactive Power Compensation for Prosumer Microgrids with DFIG-Based Wind Farm Integration”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 209878–209885, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033058.
- [11] S. Ushkewar, M. Bodke, M. Justin, A. Barghare, and B. Dudhawade, “Compensation of reactive power in DFIG based wind farm using STATCOM”, *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Advances in Electrical and Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics, AEEICB 2018*. 2018. doi: 10.1109/AEEICB.2018.8480955.
- [12] E. H. Camm *et al.*, “Reactive power compensation for wind power plants”, *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*. 2009. doi: 10.1109/PES.2009.5275328.
- [13] Y. Liu, X. Zhang, D. Zhao, and M. Ma, “Research on the wind farm reactive power compensation capacity and control target”, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2011. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748514.
- [14] Y. WANG *et al.*, “Reactive Power Optimization of Wind Farm Considering Reactive Power Regulation Capacity of Wind Generators”, in *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2019, pp. 4031–4035. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881439.
- [15] S.-H. Song and S.-B. Kim, “Coordinated Reactive Power Control with a Variable Shunt Reactor and an Inverter-Based Wind Power Plant”, *Energies*, vol. 15, no. 13, 4739, 2022, doi: 10.3390/en15134739.
- [16] Y.-M. Saint-Drenan *et al.*, “A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions”, *Renew. Energy*. Vol. 157, pp. 754–768, 2020.
- [17] V. H. Giang, “Study on Synchronization Method Using Virtual Resistance for Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Power System”. *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 29–33, 2022.

PHỤ LỤC

Bảng PL.1. Bảng thông số của máy biến áp

S _{dm} (MVA)	U _{dm} (kV)	U _N (%)	I ₀ (%)	ΔP ₀ (kW)	ΔP _N (kW)
6,3	35/0,69	7	0,9	9,4	46,5
125	110/35	10,5	0,5	100	400

Bảng PL.2. Bảng thông số của cáp

Cấp điện áp (kV)	Tiết diện (mm ²)	R ₀ (Ω/km)	L ₀ (mH/km)	C ₀ (μF/km)
35	95	0,206	0,44	0,18
35	120	0,153	0,42	0,19
35	185	0,099	0,39	0,22
35	240	0,077	0,38	0,24
35	400	0,046	0,31	0,59
110	500	0,046	0,37	0,22