

TỔNG QUAN VỀ CÔNG TRÌNH TUA-BIN ĐIỆN GIÓ NỔI NGOÀI KHƠI

OVERVIEW OF FLOATING OFFSHORE WIND TURBINES

TS. ĐINH VĂN NGUYỄN

Trung tâm Tính toán Công trình biển (MCS Kenny), Cộng hòa Ireland

Email: nguyendv@tcd.ie; nguyendv_ait@yahoo.com

TÓM TẮT

Bài báo phân tích sự cần thiết của năng lượng tái tạo và sạch và của năng lượng gió nói riêng, và nêu tổng quan về công trình điện gió nổi ngoài khơi bao gồm các điều kiện làm việc, đặc tính và khả năng áp dụng của các dạng chân đế nổi. Bài báo cũng giới thiệu các thiết kế sơ bộ, công cụ tính toán và mô phỏng (có chương trình ANTS của tác giả) bằng mô hình tổng thể, và tổng hợp các vấn đề quan trọng về dao động của hộp động cơ, các cánh quạt và trụ tháp, ảnh hưởng của gió và sóng biển và điện năng sản xuất. Vì vậy, các mô hình đơn giản hóa chỉ phù hợp với các nghiên cứu khả thi và kinh tế – kỹ thuật. Các thiết kế kỹ thuật và thi công thì cần đến các mô hình tổng thể của toàn bộ công trình (khí động – thủy động – cơ khí – kết cấu). Độc giả được giới thiệu về công trình điện gió nổi ngoài khơi mà Việt Nam cũng là nước có tiềm năng và nhu cầu lớn về điện gió.

1. Đặt vấn đề

Khai thác, sản xuất và tiêu thụ năng lượng có nguồn gốc hóa thạch (dầu mỏ, than đá) là các nguyên nhân chính làm tăng lượng khí nhà kính dẫn đến biến đổi khí hậu - một mối nguy của toàn cầu, nhưng nhu cầu về năng lượng lại ngày càng tăng nhanh. Trong khi đó, các nguồn năng lượng hóa thạch đang cạn dần và có tác động mạnh đến môi trường, các nguồn thủy điện thì rất nhạy cảm với hệ sinh thái và thiên tai như lũ lụt và động đất. Năng lượng hạt nhân thì có nhiều nguy cơ mất an toàn và thiếu biện pháp dài hạn cho các chất thải hạt nhân. Vì thế, công nghệ năng lượng ở các nước tiên tiến hiện nay đang chuyển dần sang các nguồn tái tạo và sạch như mặt trời, gió, khí sinh học, sóng và thủy triều. Trong đó, khai thác điện từ gió và mặt trời là các công nghệ năng lượng tái tạo phát triển nhanh nhất. Khai thác năng lượng từ gió đường như là khả thi và đáng tin cậy nhất ở nhiều nước với tỷ lệ phát triển hàng năm khoảng 25-30%. Công nghiệp điện gió với tốc độ đầu tư và phát triển công nghệ có thể cung cấp tới 12% nhu cầu về điện của toàn cầu vào năm 2050 [1]. Hơn nữa, điện gió cũng đóng góp lớn cho giảm thiểu khí nhà kính, dự báo sẽ làm giảm 0.5 tỷ tấn CO₂ (9.2%) vào năm 2020 và làm giảm 3 tỷ tấn CO₂ (7.8%) vào năm 2050 [2].

Tại một số quốc gia, khai thác điện từ các tua-bin gió trên bờ đã gần tới mức giới hạn về mật độ. Đồng thời, các tua-bin gió trên bờ có một số tác động xấu tới môi trường như cản trở tầm nhìn và gây tiếng ồn với tần số thấp, nên ngày càng khó khăn trong việc tìm kiếm các địa điểm xây dựng mới. Trong khi đó, việc đặt các tua-bin gió ngoài khơi ít ảnh hưởng tới tầm nhìn và tiếng ồn đồng thời có nguồn gió ít nhiễu động hơn, vì thế có thể tăng tốc độ vòng quay và chiều dài cánh quạt gió. Tuy nhiên, với công nghệ hiện nay thì giá thành của công trình và việc lắp dựng các tua-bin gió ngoài khơi còn khá cao, và phụ thuộc chủ yếu vào độ sâu nước biển và khoảng cách từ bờ. Phần kết cấu móng, lắp dựng và kết nối lưới điện chiếm phần lớn trong giá thành công trình tua-bin điện gió ngoài khơi. Mặc dù vậy, điện năng do tua-bin điện gió ngoài khơi sản xuất có thể cao hơn 50% so với cùng tua-bin ở vị trí trên bờ do vận tốc gió cao và ổn định hơn [1]. Theo thông kê [1], các tua bin-gió ngoài khơi chiếm khoảng 1.8% tổng công suất lắp đặt nhưng sản xuất ra 3.3% tổng sản lượng điện năng trong năm 2006. Vì vậy, phát triển các tua-bin ở ngoài khơi là định hướng chiến lược của công nghiệp sản xuất điện từ gió.

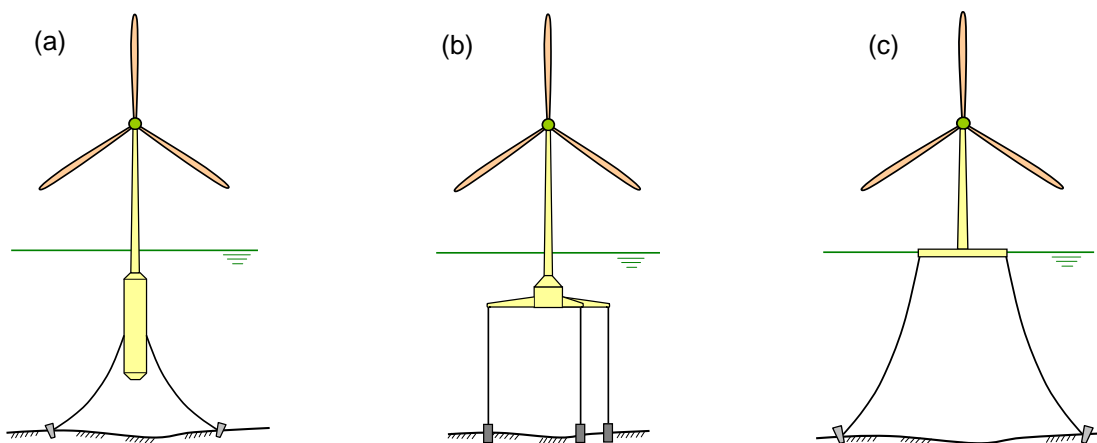
Dựa vào số liệu của 8000 vị trí với vận tốc gió ở độ cao 80 m, một bộ bản đồ gió toàn cầu đã được xây dựng [3], và đã xác định được các vùng có tiềm năng khai thác điện từ gió, trong đó có vùng biển ngoài khơi Việt Nam, Trung Quốc và Nhật Bản. Đồng thời, bộ bản đồ cũng xác định được nhiều vùng biển sâu gần bờ có tiềm năng lớn về điện gió như Mỹ, bờ tây của phía nam châu Phi, Tây Ban Nha, Na-Uy, Nhật Bản, Ấn Độ và vùng biển phía đông nước Úc. Việc xây dựng các nhà máy điện gió ngoài khơi cũng khả thi bởi vì các bộ phận của tua-bin gió có thể vận chuyển bằng xà-lan hoặc tàu biển tới địa điểm lắp dựng. Nhà máy điện gió trên bờ thường chỉ có tổng công suất dưới 50 MW nhưng tổng công suất của một nhà máy điện gió ngoài khơi có thể hơn 100 MW. Móng, kết nối lưới điện và bảo trì khi vận hành là các thách thức hiện nay của điện gió ngoài khơi. Giá thành của tua-bin điện gió ngoài khơi có chân đế ngầm ở đáy biển thường tăng theo độ sâu của nước, vì thế các loại chân đế này thường không kinh tế ở các vùng biển sâu hơn. Bởi vậy, với các vùng biển xa bờ và sâu thì các tua-bin có chân đế nổi có hiệu quả kinh tế và hợp lý nhất. Các chân đế nổi cho tua-bin điện gió có thể thừa hưởng nhiều công nghệ từ công nghiệp dầu khí ngoài khơi. Để giảm thiểu dao động dịch chuyển, các chân đế nổi thường có kích thước lớn và trọng lượng của nó cũng lớn hơn nhiều so với trọng lượng của

kết cấu tua-bin. Chính vì vậy, có thể lắp dựng các tua-bin có công suất lớn, từ 5 đến 10 MW, để giảm thiểu giá thành sản xuất điện [4]. Một báo cáo gần đây của Ủy ban Năng lượng quốc tế (International Energy Agency, IEA) đã chỉ ra rằng năng lượng gió ngoài khơi là một trong các công nghệ năng lượng tái tạo có nhiều hứa hẹn nhưng mới chỉ phát triển ở một mức độ nào đó [2].

2. Các loại tua-bin nổi cho điện gió ngoài khơi

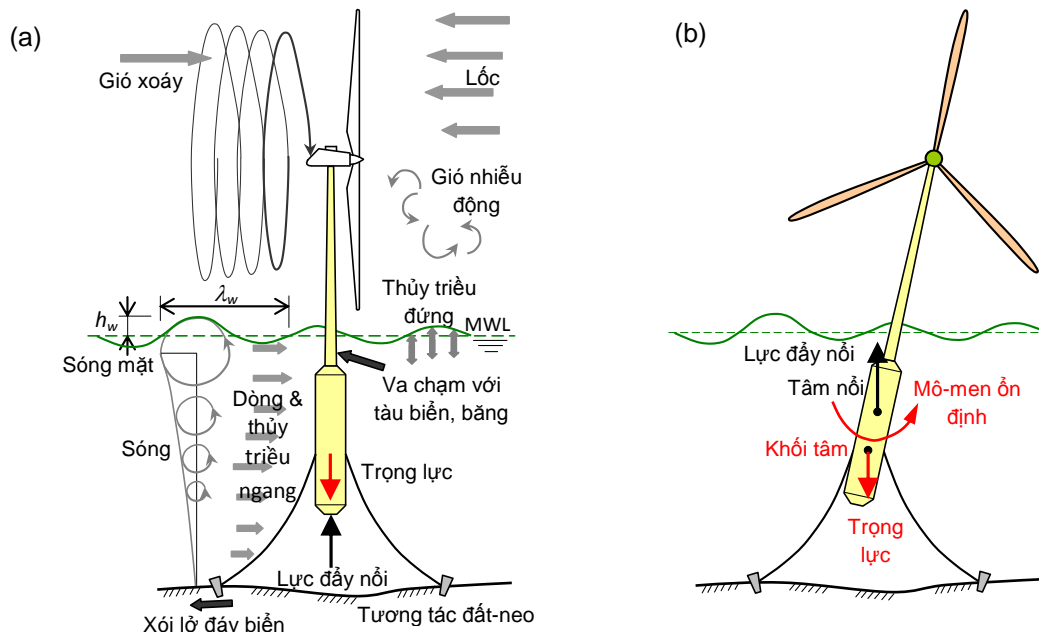
Có hai loại tổ hợp tua-bin điện gió nổi ngoài khơi, là tổ hợp đơn tua-bin và tổ hợp đa tua-bin [8]. Một số thiết kế trước đây đã đề xuất tổ hợp gồm nhiều tua-bin đặt trên một chân đế nổi có kích thước lớn để giảm tỷ lệ giữa chiều cao đón gió và chiều rộng của chân đế nổi, nhằm giảm dịch chuyển của chân đế và cũng để tăng hiệu quả kinh tế vì chỉ cần một hệ thống neo giữ. Tuy nhiên dạng tổ hợp này có tải trọng lớn do sóng biển và dòng chảy tác dụng lên chân đế, đồng thời các tua-bin phải chịu nhiều gió nhiễu động do hoạt động của các tua-bin khác trong cùng tổ hợp nên điện năng sản xuất và tuổi thọ tua-bin bị giảm. Vì vậy, tổ hợp đơn tua-bin trên chân đế nổi thích hợp hơn cho điện gió ngoài khơi.

Có ba dạng chân đế nổi là dạng trụ (spar, S), neo đứng (tension-leg, TLP) và sà lan (barge, B) [5] như Hình 1. Chân đế trụ gồm một hình trụ có mớn nước sâu, dùng neo vồng (catenary) hoặc neo căng (taut), và ổn định nhờ ballast bằng cách hạ khối tâm xuống dưới tâm nổi (ballast là vật liệu có trọng lượng riêng lớn đặt tại phần đáy trụ). Chân đế neo đứng ổn định nhờ cân bằng của các dây neo căng chịu kéo và lực đẩy nổi dư tác dụng lên chân đế. Chân đế sà lan thường được neo bằng dây neo dạng vồng và ổn định nhờ diện tích choán mặt nước.



Hình 1: Các dạng chân đế của tổ hợp đơn tua-bin, (a) Trụ, (b) Neo đứng (TLP) và (c) Sà lan

Việc lựa chọn loại tổ hợp tua-bin nổi cho điện gió ngoài khơi dựa vào vị trí lắp đặt và các điều kiện làm việc như độ sâu đáy biển, các yếu tố môi trường như vận tốc gió, sóng biển và thủy triều, khoảng cách tới bờ, và các đặc tính của đáy biển, như mô tả ở Hình 2a. Một tổ hợp tua-bin nổi thường gồm hệ neo (dây neo, vật nặng và neo), chân đế, tháp trụ, cánh quạt, động cơ, hộp số, bánh răng tốc độ cao, bánh răng tốc độ thấp, bộ phát điện, bộ điều khiển, cơ cấu điều chỉnh góc nghiêng và hướng đón gió, hệ thống thủy lực và làm nguội. Mỗi một dạng chân đế của tổ hợp đơn tua-bin đều có ưu điểm, nhược điểm và điều kiện làm việc riêng biệt, như thống kê ở Bảng 1. Bảng 1 cho thấy rằng tua-bin có chân đế dạng trụ phù hợp nhất ở các vùng biển sâu. Hơn nữa, khối tâm thấp rất hiệu quả trong việc triệt tiêu các dao động xoay quanh các trục ngang (Hình 2b). Ổn định bằng ballast cho phép giảm giá thành bằng cách sử dụng các vật liệu nặng và rẻ. Bên cạnh đó, diện tích choán mặt nước nhỏ và mớn nước sâu của chân đế trụ cũng làm giảm các lực kích thích dao động đứng, đặc tính này kết hợp với ứng xử do khối lượng chi phối, làm cho tổ hợp tua-bin chân đế trụ có độ ổn định nổi theo phương đứng rất tốt. Cơ chế ổn định bằng ballast và cấu hình dây neo cũng phù hợp việc kết nối vào lưới điện. Có thể làm giảm dao động xoay quanh trục đứng bằng cơ cấu dây neo tam giác quanh chân đế trụ đồng thời treo thêm các vật nặng dọc theo dây neo như thiết kế của dự án HYWDIND của Statoil [5]. Dựa vào thiết kế tua-bin của NREL 5-MW, một số thiết kế chân đế trụ đứng có mớn nước cạn và vừa cũng đã được thực hiện.



Hình 2: Tổ hợp tua-bin đơn, (a) Điều kiện làm việc, và (b) Ổn định của tua-bin chân đế dạng trụ.

Bảng 1. Các ưu điểm và nhược điểm của các dạng chân đế của tổ hợp đơn tua-bin

Trụ (S-FOWT)	Neo đứng (TLP- FOWT)	Sà lan (B-FOWT)
<ul style="list-style-type: none"> • Diện tích choán mặt nước nhỏ: khối tâm nằm sâu dưới tâm nổi. • Ổn định dựa vào cân bằng của lực đẩy nổi và trọng lực. • Thể tích của phần trụ gần với mặt thoáng nhỏ: lực sóng nhỏ. • Neo võng: giá thành thấp và dễ lắp đặt. • Chân đế có giá thành thấp. • Lắp đặt cần quy trình đặc biệt. • Ưu điểm ở chu kỳ dao động riêng, cấu tạo neo đơn giản, vận hành và bảo trì. • Thách thức: trọng lượng lớn và dây neo dài. • Không phù hợp với biển nông. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diện tích choán mặt nước nhỏ: khối tâm nằm sâu dưới tâm nổi. • Ổn định dựa vào lực kéo dư trong dây neo và lực đẩy nổi. • Thể tích của phần trụ gần với mặt thoáng nhỏ: lực sóng nhỏ. • Dây neo đứng: cần lực kéo dư trong dây neo, giá thành neo cao, nhạy cảm với trọng lượng của các bộ phận. • Độ phức tạp của chân đế tùy thuộc vào thiết kế. • Ưu điểm ở chu kỳ dao động riêng, dịch chuyển tổng thể, vận hành và bảo trì. • Thách thức: neo và lắp dựng. • Không phù hợp với biển nông. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diện tích choán mặt nước lớn: ổn định dựa vào lực đẩy nổi. • Thể tích phần chân đế gần với mặt thoáng lớn: lực sóng lớn. • Dây neo thường: dễ lắp dựng. • Dao động lớn: lực tác động lớn. • Cấu hình chân đế đơn giản, giá thành thấp. • Phần boong (sàn) thuận lợi cho vận hành. • Ưu điểm: trọng lượng, neo. • Thách thức: chu kỳ dao động riêng, vận hành và bảo dưỡng. • Dễ lắp dựng, phù hợp với vùng biển nông và yên tĩnh.

3. Thiết kế sơ bộ

Một số thiết kế sơ bộ của tổ hợp tua-bin điện gió nổi đã được thực hiện cho một số vị trí ngoài khơi nhằm tính toán các chỉ tiêu kinh tế-kỹ thuật của việc sản xuất điện năng từ gió. Các thiết kế đó đã khảo sát các vấn đề về pháp lý, tác động đến môi trường, chế tạo, lắp dựng và vận hành. Một số thiết kế sơ bộ điển hình khác như sau:

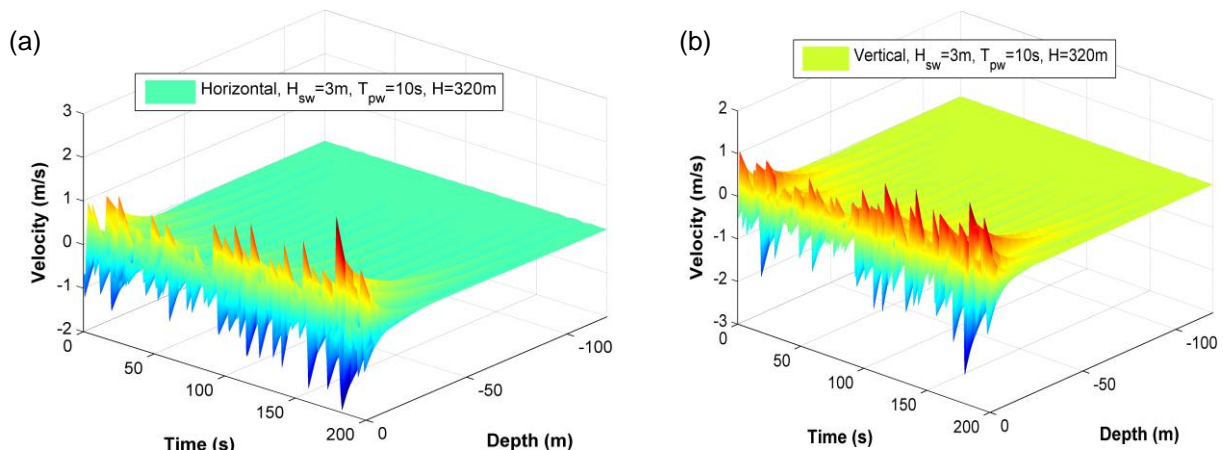
- Sử dụng các phân tích định tính bằng mô hình đơn giản hóa của một tua-bin điện gió thông thường đặt trên tàu nổi để nghiên cứu ảnh hưởng của các dịch chuyển (của tàu nổi, do sóng biển kích thích) lên các tải trọng của tua-bin gió.
- Dùng công thức Newton–Euler kết hợp với các điều kiện biên của các nút liên kết giữa các miếng cứng để phân tích mô hình tổ hợp tua-bin điện gió nổi có chân đế dạng trụ, công suất 2 MW, hướng thuận gió, điều kiện gió ổn định, biển không có sóng. Tính toán này đã cho thấy các mô-men ba trục (gồm cả mô-men do rô-to của tua-bin) ảnh hưởng đáng kể đến dao động của chân đế.

- Dùng phương trình Morison để tính lực sóng tác dụng lên tổ hợp tua-bin điện gió nổi có chân đế dạng trụ trong đó khối lượng nước kèm được tính bằng lý thuyết nhiễu tuyến tính, vận tốc và gia tốc của các phần tử chất lỏng được tính toán từ vị trí tức thời dọc theo trục đối xứng của chân đế trụ, và lý thuyết sóng tuyến tính nội suy được dùng để tính lực sóng tác dụng lên chân đế. Các dây neo được mô hình bằng các lò xo tuyến tính. Tổ hợp gồm có sáu bậc tự do và được tính toán trong miền thời gian [5].
- Khảo sát tác dụng giảm dao động xoay quanh trục ngang của vây ổn định (vây xoắn ốc gắn vào phần dưới của chân đế). Do có thêm khối lượng nước kèm của hệ vây này, dao động xoay của tua-bin quanh trục đứng cũng giảm, đồng thời cũng làm cho chu kỳ dao động riêng của các dạng dao động xoay quanh trục ngang và trục đứng khác hẳn với vùng chu kỳ của tải trọng sóng biển.
- Nghiên cứu các kích bản khác nhau khi các tổ hợp tua-bin chân đế cùng trong một nhà máy điện gió đồng thời trôi dạt tăng dần để giảm thiểu giá thành lắp dựng. Các nghiên cứu này cũng đánh giá các rủi ro của mỗi kích bản, tác động tốt và xấu của mỗi tua-bin và sự bố trí các tua-bin lên toàn nhà máy điện gió, cũng như các hệ số an toàn cho thiết kế hệ neo giữ.

4. Công cụ tính toán và mô phỏng tổ hợp tua-bin điện gió nổi

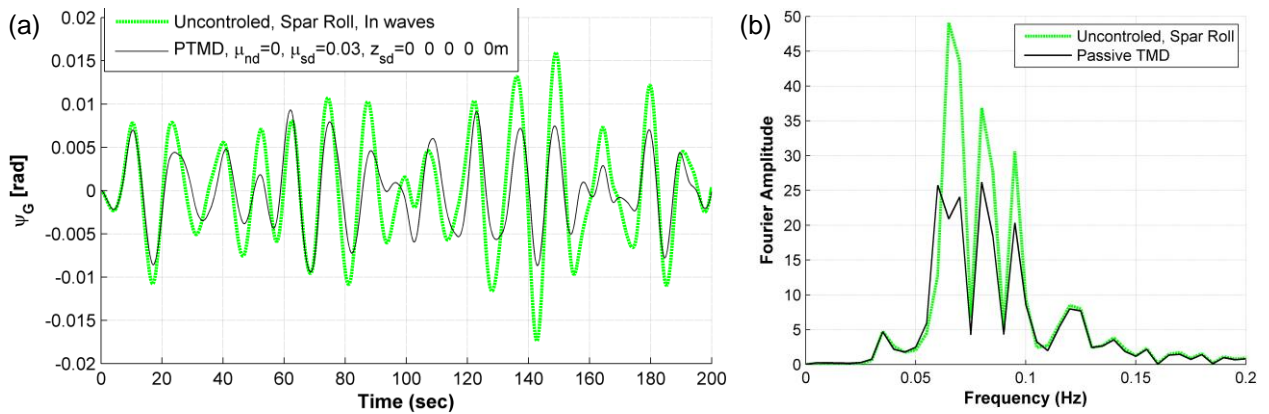
Phần mềm thương mại WAMIT® [6] có thể phân tích tính toán tương tác của sóng mặt với hệ chân đế hình dạng tùy ý thành các bài toán phân tán và nhiễu thủy động lực được tuyến tính hóa và giải bằng phương pháp số panel ba chiều trong miền tần số. Thuật giải của bài toán phân tán có kể đến các nhiễu dạng dao động của chân đế và tính ra các đại lượng thủy động như các ma trận (phụ thuộc tần số) của khối lượng nước kèm và cản động. Thuật giải của bài toán nhiễu kể đến các tải trọng thủy động lên chân đế và tương tác của chúng với các kích thích từ sóng tới, và tính ra các vec-tơ (phụ thuộc tần số và hướng của sóng biển) lực sóng.

Flexcom [7] là phần mềm thương mại nổi tiếng trong tính toán phân tích công trình biển và khai thác-vận chuyển dầu khí bởi tính chính xác, có nhiều chức năng tính toán nổi trội và thường xuyên được phát triển và cập nhật song song với nền khoa học công nghệ của thế giới. Mô hình kết cấu trong Flexcom dựa trên nền tảng phần tử hữu hạn với phần tử dầm hybrid kể đến cả biến dạng dọc trục, uốn và xoắn và với giải thuật động lực học ba chiều có độ chính xác cao. Flexcom cho phép tính toán cả trong miền thời gian và miền tần số, tính toán dự báo môi, dao động tự do và tích hợp với các phần mềm có chức năng đặc biệt khác như Shear7 (dao động do xoáy nước) và Microsoft Excel. Có nhiều mô hình trạng thái biển (mô hình sóng) trong Flexcom như sóng điều hòa (Airy, Stokes V và Dean's Stream), sóng ngẫu nhiên (Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Ochi-Hubble, Torsethaugen và User-defined). Flexcom còn có các chức năng mô hình cao cấp như vật liệu phi tuyến và trễ, ống trong ống, ống trên ống, nhiễu sóng biển, va chạm (điểm, đường và mặt), tính toán phân tích tổng thể tương tác lẫn nhau của sóng biển - thủy động - kết cấu, đất - kết cấu.



Hình 3: Mô phỏng vận tốc nước biển do chương trình ANTS [8]; (a) Phương ngang, (b) Phương đứng.

Một chương trình tính toán có tên là ANTS [8] gồm nhiều mô-đun tính cho các công trình tua-bin điện gió (dạng chân đế nổi hoặc chân đế ngầm cứng cho phép kể đến tải trọng động đất [9]), tua-bin điện sóng (nổi và cố định) cũng được tác giả bài báo này xây dựng và phát triển. Trong chương trình ANTS, các công trình được mô hình hóa tổng thể (khí động - cơ khí - kết cấu - thủy động tương tác lẫn nhau) [5]. Đặc biệt, chương trình còn có mô-đun điều khiển dao động các công trình trên bằng các phương pháp điều khiển thụ động [10], bán chủ động và chủ động [11] và cho phép giảm thiểu dao động của các công trình điện gió và tăng cường dao động của các công trình điện sóng. Mô hình vận tốc phần tử nước biển và kết quả điều khiển giảm dao động xoay cho chân đế nổi dạng trụ của tua-bin điện gió do chương trình ANTS ở Hình 3 và 4.



Hình 4: Kết quả điều khiển giảm dao động xoay cho chân đế nổi dạng trụ của tua-bin điện gió, do chương trình ANTS [8]; (a) Trong miền thời gian, và (b) Trong miền tần số

5. Một số vấn đề quan trọng về mô hình và tính toán tổ hợp tua-bin điện gió

Dao động của vỏ động cơ và các cánh quạt: Hiệu quả của điều khiển góc nghiêng đón gió của cánh quạt lên dao động của tổ hợp tua-bin chân đế nổi trong miền vận tốc gió nằm trên vận tốc hiệu quả là quan trọng [5]. Tải trọng gió chi phối chủ yếu dao động ngang ngoài mặt phẳng của vỏ động cơ, và các kết quả thống kê của các dao động này trong điều kiện gió ổn định và điều kiện gió nhiễu là giống nhau.

Dao động của tháp trụ: Giá trị trung bình của dao động chủ yếu do ảnh hưởng của tải trọng gió còn các biến thiên lại chủ yếu do tải trọng sóng biển. Các giá trị cực đại của dao động trong điều kiện làm việc chủ yếu do tải trọng gió, còn trong điều kiện tới hạn chủ yếu do tải trọng sóng biển. Các cực trị của ứng xử động thường xảy ra trong điều kiện tới hạn.

Tải trọng sóng biển và tải trọng gió [5]: Tua-bin lớn thường chịu các tải trọng phát sinh lớn hơn từ dao động (ví dụ như tải trọng gió động), nhưng sự khác nhau này không nhiều. Bởi vậy, dù chịu thêm các dao động do sóng biển gây ra, thiết kế kết cấu của tua-bin nổi không cần phải thay đổi nhiều từ thiết kế của tua-bin có chân đế ngầm cứng. Tuy nhiên, tải trọng phát sinh do dao động tác dụng lên tháp trụ là đáng kể, nên dao động của chân đế cần phải giảm đi hoặc tháp trụ phải lớn hơn. Các yếu tố phi tuyến từ thủy động lực gây ra các tải trọng có tần số thấp hơn miền tần số của tải trọng sóng biển. Các yếu tố phi tuyến này có ảnh hưởng lớn hơn ở vùng tần số dao động riêng và ảnh hưởng ít hơn vùng tần số sóng biển.

Dao động và tần số của toàn hệ: Các dạng dao động có tần số thấp nhất của tổ hợp tua-bin nổi liên quan cơ bản đến dao động của các miếng cứng nên các tần số này thấp hơn nhiều so với các tua-bin có chân đế ngầm cứng. Dạng dao động có tần số thấp thứ hai (xoay ngoài mặt phẳng, quanh trục ngang) không có cản động từ dây neo võng và rất ít cản động từ tải trọng thủy động. Dao động của tháp trụ, với ảnh hưởng của khí động và điều khiển góc nghiêng đón gió, cũng có ít cản động, thậm chí là cản động có giá trị âm và gây ra dao động ban đầu rất lớn. Gió nhiễu loạn kích thích cả dao động ngang và xoay ngoài mặt phẳng của tua-bin nổi do các tần số dao động riêng gần bằng nhau. Dao động ngang ngoài mặt phẳng của hộp động cơ, và mô men uốn và lực cắt ở giao diện giữa tháp trụ và chân đế bị chi phối chủ yếu bởi dao động của các miếng cứng hơn là dao động do biến dạng đàn hồi.

Sản xuất điện năng: Gió nhiễu tác động xấu đến điện năng sản xuất. Với vận tốc gió ở trên mức vận tốc hiệu quả, giá trị trung bình và biến thiên của điện năng sản xuất ra trong hai điều kiện gió ổn định và gió nhiễu là như nhau. Tuy nhiên, với vận tốc gió thấp hơn mức vận tốc hiệu quả, sự khác nhau của điện năng sản xuất ra ở hai điều kiện này là đáng kể. Dao động và kích thước của chân đế cũng ảnh hưởng đến điện năng sản xuất. Với chân đế dạng trụ ngắn (ở vùng biển có độ sâu trung bình) có tổng khối lượng ít hơn chân đế trụ dài khoảng 35% nhưng điện năng sản xuất của hai tổ hợp tua-bin là gần bằng nhau.

Tóm lại, các mô hình đơn giản hóa sẽ giảm thiểu thời gian tính toán, nếu độ chính xác đạt mức cho phép, sẽ phù hợp cho nghiên cứu khả thi và dự báo kinh tế-kỹ thuật của các tổ hợp tua-bin điện gió nổi. Các thiết kế kỹ thuật và thi công thì cần đến các mô hình tổng thể và tính toán của toàn bộ tổ hợp (khí động - thủy động - cơ khí - kết cấu).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IEA, *Renewable Energy Essentials: Wind*, 2008. Available from: www.iea.org
- [2] IEA, *Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System*, 2012.
- [3] C.Z. Archer, M.L. Jacobson, *Evaluation of global wind power*, J. Geophysic Res. 110 (2005).
- [4] ISSC (2009) Specialist Committee V.4, *Ocean wind and wave energy utilization*, 17th International Ship and Offshore Structures Congress, Seoul, Korea.
- [5] V.N. Dinh, B. Basu, S.R.K. Nielsen. *Impact of spar-nacelle-blade coupling on the edgewise response of floating offshore wind turbines*. Coupled Systems Mechanics (2013).
- [6] C.H. Lee, J.N. Newman, *WAMIT® User Manual, Versions 6.3*, WAMIT, Inc., MA, 2006.
- [7] Flexcom website: www.mcskenny.com/software-solutions/flexcom/flexcom-technical-features.html
- [8] V.N. Dinh et al. *ANTS (Advanced Nature Technology Solutions)*. Irish patent, filing (2015).
- [9] B. Basu, A. Staino, V.N. Dinh. *Vibration of wind turbines under seismic excitations*, Proceedings of The Fifth Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, Singapore, 23-25 May 2012, pp. 439-444.
- [10] V.N. Dinh, B. Basu. *Passive control of floating offshore wind turbine nacelle and spar vibrations by multiple tuned mass dampers*, Structural Control and Health Monitoring (2014).
- [11] V.N. Dinh, B. Basu, S. Nagarajaiah. *Semi-active algorithm for edgewise vibration control in floating offshore wind turbines*. Smart Structures and Systems (2015).