

CÔNG NGHỆ ĐIỆN ÁP CAO TRONG HỆ THỐNG CHÂN VỊT ĐIỆN TÀU THỦY HIGH-VOLTAGE TECHNOLOGY IN MARINE ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

LƯU KIM THÀNH¹, VƯƠNG ĐỨC PHÚC^{2*}

¹Khoa Công nghệ điện, Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phucvd.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1102>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu công nghệ điện áp cao trong hệ thống đẩy điện tàu thủy, tập trung vào dải 6,6kV - 11kV, bộ biến đổi công suất, chất lượng điện năng và cụm đẩy pod/Azipod. Trên cơ sở tổng hợp tài liệu và tính toán minh họa, bài báo làm rõ quan hệ giữa lựa chọn cấp điện áp, cấu trúc chỉnh lưu - nghịch lưu, sóng hài, phối hợp cách điện và đặc tính tải chân vịt. Kết quả cho thấy lực đẩy điện cho phép bố trí linh hoạt, dự phòng cao, rung ổn thấp và điều động tốt, nhưng hiệu quả thực tế phụ thuộc mạnh vào điều khiển, bảo vệ và độ tin cậy của hệ cấp - đầu nối. Bài báo đồng thời đề xuất bộ tiêu chí đánh giá sơ bộ cho tàu chuyên dụng tại Việt Nam.

Từ khóa: Đẩy điện tàu thủy, điện áp cao, biến tần trung áp, chất lượng điện năng, Azipod.

Abstract

This paper reviews high-voltage technology in marine electric propulsion systems, focusing on 6.6kV to 11kV architectures, power converters, power quality, and podded propulsion. Based on literature synthesis and illustrative calculations, the paper clarifies the links among voltage level selection, converter topology, harmonics, insulation coordination, and propeller load characteristics. The electric propulsion offers flexible machinery arrangement, high redundancy, low vibration, low noise, and good maneuverability, while practical performance depends strongly on control, protection, and cable reliability. In this paper, the term high-voltage is used in the technological sense of propulsion systems employing substantially higher onboard voltage levels than traditional low-voltage ship systems, rather than as a direct restatement of

shore-power voltage-class nomenclature.

Keywords: Marine electric propulsion, high voltage, medium-voltage drives, Azipod.

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh giảm phát thải, nâng cao hiệu quả khai thác và tăng mức độ tự động hóa tàu thủy, hệ thống đẩy điện đang trở thành lựa chọn quan trọng đối với tàu LNG, tàu khách, tàu dịch vụ ngoài khơi và các phương tiện đòi hỏi khả năng điều động cao. Khác với truyền động cơ khí trực tiếp, đẩy điện cho phép tách rời nguồn phát công suất khỏi vị trí chân vịt, nhờ đó mở rộng tự do bố trí buồng máy, nâng mức dự phòng vận hành và cải thiện khả năng điều khiển lực đẩy [1], [5], [7]. Khi công suất tăng tới hàng chục MW, lưới điện trung áp 6,6kV - 11kV trở thành giải pháp phù hợp để hạn chế dòng điện, giảm tiết diện cáp và không chế tổn hao phân phối [2], [3].

Các công bố gần đây đều cho thấy cấu hình 6,6kV hoặc 11kV giữ vai trò trung tâm trong các hệ diesel - điện hiện đại. Trong bài báo này, thuật ngữ “công nghệ điện áp cao” được dùng theo nghĩa công nghệ để chỉ nhóm giải pháp đẩy điện sử dụng mức điện áp cao hơn rõ rệt so với hệ hạ áp truyền thống trên tàu, chủ yếu trong dải 6,6kV - 11kV; cách gọi này nhằm nhấn mạnh yêu cầu mới về cách điện, thiết bị đóng cắt, an toàn vận hành và tích hợp công suất, và không đồng nhất với thuật ngữ phân cấp “cao áp” trong hệ thống điện lực trên bờ [2], [3], [6]. Tuy nhiên, nhiều công bố vẫn thiên về tối ưu từng phần hệ riêng lẻ như bộ biến đổi, chất lượng điện năng hoặc hệ pod, hơn là phân tích đồng thời kiến trúc nguồn, điện tử công suất, phối hợp cách điện và hồ sơ tải khai thác.

Trên cơ sở đó, bài báo hướng tới bốn mục tiêu: hệ thống hóa nền tảng kỹ thuật của đẩy điện điện áp cao; phân tích vai trò của bộ biến đổi công suất và cấu trúc điều khiển; chỉ ra các ràng buộc về sóng hài, cáp và bảo vệ; đồng thời thảo luận khả năng ứng dụng đối với đội tàu chuyên dụng tại Việt Nam. Từ quá trình

Bảng 1. So sánh khái quát giữa truyền động cơ khí trực tiếp và đẩy điện điện áp cao

Tiêu chí	Hệ trục cơ khí trực tiếp	Hệ đẩy điện điện áp cao
Kiến trúc nguồn	Nguồn công suất gắn chặt với trục chính.	Nhiều tổ máy phát cấp chung cho thanh cái trung áp; linh hoạt phân phối tải.
Bố trí buồng máy	Phụ thuộc tuyến trục và hộp số.	Tách nguồn - động cơ đẩy, dễ tối ưu không gian và phân khu thiết bị.
Điều động tàu	Đảo chiều và thay đổi tốc độ chậm hơn.	Điều khiển mômen/tốc độ tốt ở dải thấp; thuận lợi cho định vị động (DP) và thao tác căng.
Rung ồn - phát thải	Rung truyền trực tiếp từ động cơ chính.	Giảm rung ồn, cho phép tối ưu điểm làm việc của tổ máy phát.
Yêu cầu kỹ thuật	Cấu trúc đơn giản hơn.	Đòi hỏi quản lý sóng hài, bảo vệ điện áp cao, cáp và điều khiển công suất.

tổng hợp có thể nhận thấy phần lớn công bố hiện nay tập trung riêng lẻ vào tối ưu điều khiển nguồn lai, thiết kế bộ biến tần hoặc đánh giá chất lượng điện năng.

Trong khi đó, các tài liệu thực hành lại nhấn mạnh yêu cầu an toàn, phối hợp cách điện và vận hành. Vì vậy, bài báo không đặt mục tiêu xây dựng một mô hình mới hoàn toàn, mà tổ chức lại tri thức kỹ thuật theo chuỗi logic từ bài toán truyền tải công suất lớn, cấu trúc điện tử công suất, ứng xử sóng hài/cách điện đến lựa chọn ứng dụng phù hợp. Cách tiếp cận này là cơ sở để đề xuất bộ tiêu chí đánh giá sơ bộ phục vụ lựa chọn công nghệ cho điều kiện khai thác tại Việt Nam.

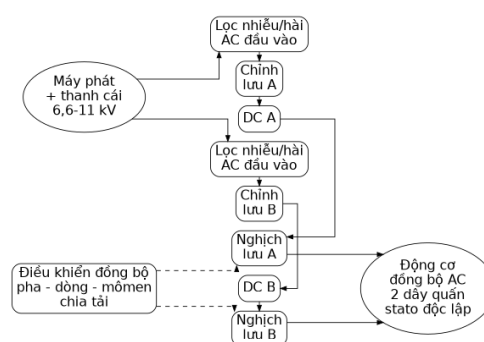
2. Cấu hình hệ thống đẩy điện điện áp cao

Một hệ thống đẩy điện điển hình gồm các tổ máy phát diesel hoặc nhiên liệu kép, thanh cái trung áp, máy biến áp, bộ biến đổi tần số và một hoặc nhiều động cơ đẩy. Ở các cấu hình công suất lớn, các hãng thường sử dụng động cơ đồng bộ xoay chiều công suất lớn; động cơ có thể được thiết kế với hai bộ dây quấn stato ba pha giống hệt nhau nhưng cách điện và cấp nguồn độc lập từ hai nhánh chỉnh lưu - nghịch lưu riêng. Cách bố trí này giúp tăng dự phòng, cho phép chia tải giữa hai nhánh và vẫn có thể vận hành ở chế độ suy giảm khi một nhánh bị sự cố. Trên phía lưới xoay chiều, bộ lọc nhiễu/bộ lọc hài đầu vào cần được đặt trước cụm chỉnh lưu - nghịch lưu để hạn chế dòng hài phản hồi về thanh cái và máy phát [1], [3], [6], [11].

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} \quad (1)$$

$$\Delta P_{cu} = 3I^2R \quad (2)$$

Trong đó, P là công suất tác dụng, U là điện áp dây hiệu dụng, I là dòng điện dây, $\cos\varphi$ là hệ số công suất và R là điện trở tương đương của tuyến dẫn. Từ quan hệ công suất ba pha ở (1) có thể suy ra dòng tải giảm khi điện áp dây định mức tăng, trong khi tổn hao đồng ở (2) tăng theo bình phương dòng điện. Vì vậy, cấu hình 6,6kV - 11kV cho phép giảm tiết diện cáp, giảm phát nhiệt trên thanh cái và duy trì truyền tải công suất hàng MW trong không gian lắp đặt hạn chế của tàu biển [2], [3], [5], [6]. Đổi lại, khi cấp điện áp tăng, yêu cầu đối với cách điện, thiết bị đóng cắt, khoảng cách điện và quy trình an toàn cũng tăng tương ứng; do đó, lựa chọn cấp điện áp phải được xem như một bài toán tối ưu hệ thống chứ không chỉ là quyết định giảm dòng điện.



Hình 1. Cấu hình hệ lực đẩy điện với động cơ đồng bộ hai bộ dây quấn và hai nhánh biến đổi

Hình 1 cho thấy bản chất “tách nguồn - tải đẩy” của kiến trúc điện tàu, đồng thời bổ sung cấu trúc thường gặp ở hệ công suất lớn: hai nhánh bộ lọc - chỉnh lưu - khâu một chiều - nghịch lưu cấp cho hai bộ dây quấn stato độc lập của cùng một động cơ đồng

bộ. Bộ điều khiển trung tâm phải đồng bộ tần số, góc pha, dòng điện và mômen giữa hai nghịch lưu để tránh dòng tuần hoàn và phân bố tải không đều. Cách tổ chức này đặc biệt hiệu quả đối với các tàu có tải biến thiên lớn như tàu khoan, tàu phục vụ ngoài khơi, tàu khách và tàu LNG; hệ thống còn cho phép giảm kích thước không gian máy chính, hạn chế rung xoắn truyền dọc hệ trục, giảm tiếng ồn và nâng cao chất lượng thao tác dừng - lùi - quay trở [1], [5], [7].

Mặt khác, công nghệ điện áp cao trên tàu làm phát sinh những yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt hơn so với hệ thống hạ áp. Cách điện của thanh cái, đầu cáp và thiết bị đóng cắt phải được phối hợp theo tiêu chuẩn hàng hải; nhân sự khai thác phải được đào tạo về an toàn điện; các bộ biến đổi công suất phải được bảo vệ trước quá áp, ngắn mạch, sự cố chạm đất, mất đồng bộ nhánh nghịch lưu và quá nhiệt [2]-[6]. Đối với truyền động khởi động bằng thay đổi tần số, không nên hiểu bảo vệ theo nghĩa chống dòng khởi động trực tiếp như động cơ đầu lưới; dòng và điện áp khởi động đã được giới hạn bằng tín hiệu đặt trong phần mềm điều khiển, vì vậy nguy cơ quá dòng chủ yếu gắn với sự cố phần cứng, tham số điều khiển hoặc trạng thái tải bất thường. Vì vậy, lựa chọn cấu trúc đẩy điện chỉ thật sự hiệu quả khi bài toán kỹ thuật, an toàn và vận hành được xem xét đồng bộ ngay từ giai đoạn thiết kế sơ bộ con tàu.

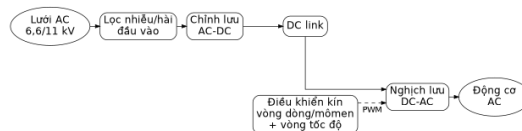
3. Bộ biến tần và điều khiển trong hệ đẩy

Tâm điểm của hệ thống đẩy điện hiện đại là bộ biến đổi tần số/bộ truyền động thay đổi tốc độ (VFD/VSD). Về nguyên lý, bộ biến tần gồm bốn khối cơ bản: chỉnh lưu AC - DC, khâu lọc điện áp (DC link), khối điều khiển và nghịch lưu DC - AC. Việc thay đổi tần số và điện áp đầu ra là cơ sở để điều khiển tốc độ động cơ AC; tuy nhiên trong hệ đẩy tàu hiện đại, bộ điều khiển không phải là ba vòng độc lập “đồng - mômen - tốc độ”. Cấu trúc chính xác hơn là điều khiển kín phân cấp: vòng dòng điện hoặc mômen điện từ ở bên trong, vòng tốc độ hoặc lực đẩy ở bên ngoài; với động cơ đồng bộ hai bộ dây quấn còn cần thêm chức năng đồng bộ pha, chia tải và giới hạn dòng giữa hai nghịch lưu. Quan hệ V/f vì vậy chỉ được hiểu như nguyên lý nền tảng của truyền động AC, trong khi thực tế vận hành thường sử dụng điều khiển vector hoặc điều khiển trực tiếp mômen để nâng chất lượng đáp ứng lực đẩy [1], [8]-[10].

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (3)$$

$$T_e (\text{N}\cdot\text{m}) = \frac{9550P_m (\text{kW})}{n(\text{rpm})} \quad (4)$$

Trong các biểu thức (3) và (4), n_s là tốc độ đồng bộ (rpm), f là tần số nguồn, p là số đôi cực của động cơ, T_e là mômen điện từ và P_m là công suất cơ. Đối với tải chân vịt, mômen tải thường tăng xấp xỉ theo bình phương tốc độ quay ($M \approx k.n^2$), còn công suất yêu cầu tăng xấp xỉ theo lập phương tốc độ. Vì vậy, mặc dù truyền động biến tần có những thách thức ở vùng tốc độ rất thấp như làm mát động cơ, ước lượng từ thông/vị trí và gọn mômen, tải chân vịt lại là tải thuận lợi vì mômen thủy động giảm mạnh khi tốc độ giảm; khi cần điều chỉnh chính xác hoặc định vị động (DP), điều khiển vector/điều khiển trực tiếp mômen và giới hạn dòng khởi động cho phép duy trì mômen đủ lớn mà không cần khởi động trực tiếp qua lưới.



Hình 2. Cấu trúc cơ bản của bộ biến đổi tần số có bộ lọc đầu vào và điều khiển kín

Ngoài cấu trúc AC - DC - AC dùng IGBT, có thể dùng biến tần trực tiếp (cycloconverter) cho các hệ đẩy công suất lớn, tốc độ thấp. Bộ này thực hiện biến đổi trực tiếp AC - AC bằng các van thyristor điều khiển pha, phù hợp với động cơ đồng bộ công suất lớn cần mômen cao ở dải tốc độ rất thấp. So với cycloconverter, bộ biến đổi gián tiếp hiện đại linh hoạt hơn trong điều khiển, giảm gọn mômen tốt hơn và thuận tiện hơn cho tích hợp tự động hóa tàu; đổi lại, cấu trúc này đòi hỏi khâu một chiều, chiến lược điều chế độ rộng xung (PWM) và phần tử bán dẫn tốc độ cao [1], [8]-[10].

Ở cấp công suất lớn, sơ đồ chỉnh lưu 12 xung thường được ưu tiên hơn chỉnh lưu 6 xung vì có thể triệt giảm đáng kể các thành phần sóng hài bậc thấp nhờ máy biến áp lệch pha 30° giữa hai cuộn thứ cấp. Sau khâu chỉnh lưu, các tụ ở khâu một chiều có nhiệm vụ giảm độ nhấp nhô điện áp một chiều; đi kèm là mạch nạp trước, khóa tiếp địa an toàn, mạch crowbar và mạch snubber nhằm khống chế quá điện áp, quá dòng và bảo đảm an toàn bảo trì [1], [3], [8], [10]. Với hệ sử dụng hai nhánh biến đổi cho cùng động cơ, thuật toán điều khiển còn phải quản lý trình tự khởi động, đồng bộ tần số/góc pha và cân bằng mômen để tránh

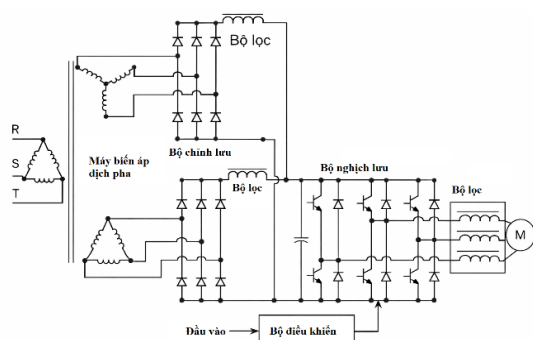
Bảng 2. So sánh hai hướng điều khiển tốc độ thường gặp trong hệ đẩy điện

Nội dung	Biến tần trực tiếp	Biến tần gián tiếp
Cấu trúc	Biến đổi trực tiếp AC - AC bằng thyristor.	Biến đổi AC - DC - AC qua khâu một chiều (DC link) và nghịch lưu IGBT.
Đặc tính điều khiển	Phù hợp tốc độ thấp, mômen lớn; thường dùng cho động cơ đồng bộ công suất lớn.	Điều khiển linh hoạt dòng điện/mômen và tốc độ; thực tế thường có vòng dòng hoặc mômen bên trong và vòng tốc độ bên ngoài.
Chất lượng điện năng	Có thể phát sinh sóng hài và yêu cầu đồng bộ hóa nghiêm ngặt.	Kết hợp 12 xung, PWM và nghịch lưu đa mức để cải thiện dạng sóng.
Phạm vi ứng dụng	Hệ đẩy cỡ lớn, tốc độ rất thấp, yêu cầu mômen cao.	Tàu khách, tàu LNG, tàu công trình, hệ pod và thiết bị đẩy phụ hiện đại.

xung lực cơ và dòng tuần hoàn giữa các bộ dây quấn.

$$h = 12k \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

Trong biểu thức (5), h là bậc sóng hài đặc trưng và k là số nguyên dương. Với chỉnh lưu 6 xung, các thành phần đặc trưng xuất hiện ở bậc $6k \pm 1$ (đáng chú ý là bậc 5 và 7); còn với chỉnh lưu 12 xung, các thành phần chủ đạo dịch lên bậc $12k \pm 1$ (11, 13, 23, 25...). Nhờ đó, cấu hình 12 xung làm giảm đáng kể sóng hài bậc thấp và cải thiện chất lượng điện năng của hệ thống so với cấu hình 6 xung.



Hình 3. Các phần tử chính của bộ biến tần điện áp cao

Ở khâu nghịch lưu, IGBT được sử dụng rộng rãi do khả năng đóng cắt nhanh, tổn hao dẫn nhỏ và phù hợp với điều chế độ rộng xung PWM. Với điều khiển PWM, điện áp một chiều cố định được “bấm” theo chuỗi xung để tạo điện áp xoay chiều có tần số và biên độ thay đổi. Ở hệ 6,6kV - 11kV, cấu trúc nghịch lưu ba mức giúp giảm méo dòng, giảm gợn mômen và cho phép hạ tần số đóng cắt mà vẫn bảo đảm chất lượng điện áp cấp cho động cơ [1], [8]-[10]. Nghiên cứu [13] cũng cho thấy chiến lược điều khiển dự báo dòng điện ba vector trên nghịch lưu ba mức có thể làm giảm gợn

mômen và hài dòng của PMSM trong hệ đẩy điện tàu so với cấu trúc hai mức.

4. Phân tích định lượng, chất lượng điện năng và hệ chân vịt pod

Để tránh nhận xét thuần định tính, có thể xét một trường hợp minh họa với tải đẩy 12 MW và hệ số công suất 0,95. Từ (1), dòng điện dây xấp xỉ 1,10 kA ở cấp 6,6kV và khoảng 0,66 kA ở cấp 11kV; như vậy khi tăng điện áp từ 6,6kV lên 11kV, dòng điện giảm khoảng 40%. Nếu các điều kiện còn lại tương đương, tổn hao đồng tỷ lệ với I^2 chỉ còn khoảng 36% so với cấu hình 6,6kV. Ở khía cạnh bộ chỉnh lưu, cấu hình 6 xung tạo ra các thành phần sóng hài bậc thấp 5 và 7 đáng kể hơn, trong khi cấu hình 12 xung đẩy các thành phần chủ đạo lên 11 và 13, nhờ đó giảm gánh nặng lọc và giảm phát nhiệt phụ cho máy điện. Kết quả minh họa này cho thấy lựa chọn 11kV và chỉnh lưu 12 xung chỉ thật sự có ý nghĩa khi lợi ích giảm dòng điện và giảm sóng hài đủ bù đắp cho yêu cầu cao hơn về cách điện, thiết bị đóng cắt và chi phí đầu tư.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1} \times 100\% \quad (6)$$

Sự hiện diện của bộ biến đổi công suất khiến sóng hài trở thành vấn đề trung tâm của lưới điện tàu. Chỉ số THD trong (6) được dùng để lượng hóa mức méo của điện áp hoặc dòng điện so với thành phần cơ bản, trong đó X_1 là thành phần cơ bản và X_n là thành phần sóng hài bậc n . Cần lưu ý rằng máy biến áp cách ly không triệt tiêu hoàn toàn ảnh hưởng của sóng hài: Tải chỉnh lưu phi tuyến vẫn hút dòng không hình sin từ phía nguồn và thành phần này phản ánh về phía máy phát qua quan hệ biến áp, chỉ được suy giảm một phần

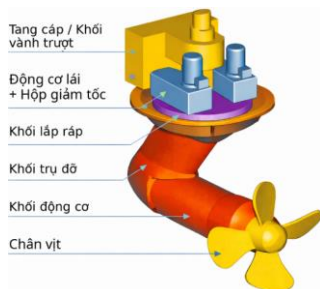
nhờ điện kháng rò, cấu trúc lệch pha và bộ lọc. Vì vậy, cùng với sơ đồ 12 xung và nghịch lưu đa mức, hệ thống còn phải kết hợp bộ lọc nhiễu/bộ lọc hài đặt trên phía xoay chiều trước chỉnh lưu, lọc thụ động hoặc lọc chủ động ở các vị trí phù hợp, đồng thời kiểm soát phân bố tải trên thanh cái theo quy định của đăng kiểm [1], [4]-[6], [11].

Đối với cáp trung áp dùng trên tàu, lớp bán dẫn và lớp chắn kim loại quyết định phân bố điện trường trong vật liệu cách điện. Khi thiết kế và thi công đầu cáp, việc xử lý đầu chắn, làm kín chống ẩm phải được thực hiện chặt chẽ; nếu không, phóng điện cục bộ có thể xuất hiện tại các vùng có ứng suất điện trường tập trung, làm suy giảm nhanh tuổi thọ cách điện [1]-[3].

$$E_{\max} = \frac{U}{a \ln(b/a)} \quad (7)$$

Trong biểu thức (7), a là bán kính ruột dẫn và b là bán kính phía trong của lớp chắn ngoài. Biểu thức này cho thấy cường độ điện trường cực đại tăng khi bán kính ruột dẫn a nhỏ hoặc khi tỷ số b/a được lựa chọn không hợp lý. Vì vậy, thiết kế cáp và đầu cáp trung áp không chỉ là bài toán bền điện danh nghĩa mà còn là bài toán phân bố điện trường, kiểm soát phóng điện, và độ bền của cách điện.

Một thành phần quan trọng trong hệ thống đẩy điện điện áp cao là chân vịt pod kiểu Azipod. Trong cấu hình này, động cơ đẩy được đặt trong pod kín phía ngoài thân tàu; toàn bộ cụm có thể quay 360° để tạo lực đẩy theo mọi hướng. Nhờ đó, tàu có khả năng cơ động rất tốt, giảm nhu cầu sử dụng chân vịt mũi, hạ mức rung ồn và tiết kiệm không gian buồng máy. Tuy nhiên, Azipod có chi phí đầu tư ban đầu lớn, yêu cầu hệ thống điều khiển và làm mát phức tạp, đồng thời phải kiểm soát chặt độ tin cậy của cáp cấp điện, bộ truyền động lái và cụm vành trượt [1], [12].



Hình 4. Cụm chân vịt pod/Azipod

Nhìn ở góc độ tích hợp hệ thống, Azipod cho thấy rõ bản chất liên động của đẩy điện: Hiệu quả điều động không chỉ do hình học cụm pod quyết định mà còn phụ thuộc vào chất lượng điện áp cấp, chiến lược điều khiển

mômen, độ tin cậy của hệ làm mát, phương án bảo vệ và tuổi thọ của cáp trung áp đi qua vùng quay. Trong trường hợp chân vịt bị dòng nước kéo sang chế độ phát/turbine, cấu trúc AC - DC - AC dùng chỉnh lưu diode như Hình 3 không thích hợp để hoàn trả công suất về lưới tàu; muốn khai thác chế độ bốn phần tư cần sử dụng bộ chỉnh lưu chủ động phía nguồn hoặc giải pháp hãm phù hợp. Điểm này cho thấy lựa chọn công nghệ phải được đánh giá trên toàn hệ thống, thay vì chỉ trên từng thiết bị riêng lẻ.

Đối với Việt Nam, đẩy điện điện áp cao chưa phải là giải pháp áp dụng đại trà cho mọi nhóm tàu, nhưng có ý nghĩa thực tiễn rõ rệt đối với tàu dịch vụ ngoài khơi, tàu công vụ, tàu khách cỡ vừa, tàu phục vụ điện gió ngoài khơi và các nền tảng căn cơ động cao. Với các đối tượng này, lợi ích về điều động, rung ồn, phân bố tải và phát thải thường đủ lớn để bù đắp cho chi phí đầu tư ban đầu. Xu hướng phát triển hiện nay cũng cho thấy đẩy điện đang chuyển dần từ cấu hình diesel - điện truyền thống sang tàu điện toàn phần, tàu lai điện kết hợp pin và các giải pháp quản lý năng lượng thông minh; trong đó các tổng quan gần đây cho thấy tàu lai điện đang là nhánh thương mại hóa nhanh nhất, tàu điện dùng pin phù hợp hơn với tuyến ngắn và tàu điện pin nhiên liệu là hướng dài hạn cho khử carbon sâu [1], [5]-[7], [14].

Riêng đối với nhóm tiêu chí (ii), độ tin cậy cần được đánh giá theo khả năng chịu lỗi của toàn chuỗi năng lượng. Các chỉ báo chính gồm cấu hình phân đoạn thanh cái, dự phòng N-1 cho nguồn phát và làm mát, khả năng vận hành suy giảm khi mất một tổ máy hoặc một nhánh nghịch lưu, giám sát cách điện/phóng điện cục bộ, dự phòng cảm biến tốc độ/vị trí và khả năng cách ly nhanh phần tử lỗi mà không làm mất hoàn toàn lực đẩy. Với động cơ đồng bộ hai bộ dây quấn độc lập, độ tin cậy không chỉ phụ thuộc vào bản thân động cơ mà còn phụ thuộc vào thuật toán chia tải, đồng bộ mômen giữa hai nghịch lưu và quy trình chuyển chế độ khi một nhánh bị sự cố.

Trên cơ sở các phân tích trên, bài báo đề xuất một bộ tiêu chí đánh giá sơ bộ gồm năm nhóm: (i) hiệu quả năng lượng và tổn hao phân phối; (ii) độ tin cậy và khả năng dự phòng của chuỗi nguồn - thanh cái - bộ biến đổi - động cơ - cáp/pod; (iii) chất lượng điện năng và mức độ không chế sóng hài; (iv) an toàn điện, phối hợp cách điện, khả năng bảo trì và yêu cầu khai thác; (v) mức độ phù hợp với điều kiện đóng mới, năng lực chế tạo thiết bị trong nước và nội địa hóa tại Việt Nam. Lộ trình phát triển phù hợp nên bắt đầu từ năng lực thiết kế - tích hợp: làm chủ phối hợp cách điện cho hệ 6,6kV, tính toán sóng hài trên lưới tàu, thử nghiệm đầu cáp và đầu nối trong điều kiện

muối âm, đồng thời chuẩn hóa quy trình an toàn vận hành cho sĩ quan máy và kỹ sư bảo trì. Ở bước tiếp theo, có thể từng bước nội địa hóa các cấu phần như tủ phân phối trung áp, hệ giám sát chất lượng điện năng, cáp hàng hải và thuật toán điều khiển giám sát cho bộ biến đổi tần số trung áp; đồng thời khai thác các hướng mới như bản sao số và quản lý năng lượng thông minh để nâng cao hiệu quả khai thác [14].

5. Kết luận

Công nghệ điện áp cao là nền tảng của nhiều hệ thống đẩy điện tàu thủy hiện đại nhờ khả năng truyền tải công suất lớn với tổn hao thấp, linh hoạt bố trí và thuận lợi cho điều khiển tốc độ. Trong phạm vi bài báo, cách gọi “điện áp cao” được hiểu theo nghĩa công nghệ của hệ đẩy dùng mức điện áp cao hơn rõ rệt so với hạ áp truyền thống trên tàu, điển hình ở dải 6,6kV - 11kV, chứ không dùng như một sự đồng nhất cơ học với thuật ngữ phân cấp “cao áp” trong hệ thống điện lực trên bờ. Sự kết hợp giữa chỉnh lưu 12 xung, bộ lọc nhiễu/hải đầu vào, khâu một chiều, nghịch lưu IGBT/PWM và động cơ đồng bộ công suất lớn, trong đó có cấu hình hai bộ dây quấn stato độc lập, cho phép các hệ 6,6kV - 11kV đáp ứng tốt yêu cầu vận hành của tàu LNG, tàu khách, tàu công trình ngoài khơi và các phương tiện cần khả năng điều động cao.

Bài báo tổ chức lại tri thức hiện có theo một khung phân tích tích hợp gồm kiến trúc hệ thống, điện tử công suất, chất lượng điện năng - cách điện, độ tin cậy/dự phòng và ứng dụng khai thác, đồng thời bổ sung các tính toán minh họa để làm rõ hơn cơ sở lựa chọn cấp điện áp và cấu trúc chỉnh lưu. Kết quả cho thấy hiệu quả của đẩy điện điện áp cao phụ thuộc đồng thời vào bộ biến đổi công suất, chất lượng điện năng, cấu trúc cáp - cách điện, giải pháp bảo vệ, khả năng vận hành suy giảm khi sự cố và mức độ hoàn thiện của hệ điều khiển. Hạn chế của bài báo là chưa thực hiện mô phỏng hoặc so sánh định lượng kinh tế - kỹ thuật giữa các cấu hình đẩy điện cụ thể; đây là hướng nghiên cứu tiếp theo cần được bổ sung bằng mô hình tính toán và dữ liệu khai thác thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., & Hopman, J. J. (2017), *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments*, Journal of Applied Energy, Vol.194, pp.30-54.
Doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
- [2] IEC (2018), *Electrical installations in ships - Part 101: Definitions and general requirements*.
- [3] IEC (2014), *Electrical installations in ships - Part 503: Special features - AC supply systems with voltages in the range above 1kV up to and including 15kV*.
- [4] Rodrigues, T. A., Neves, G. S., Gouveia, L. C. S., Abi-Ramia Jr., M. A., Fortes, M. Z., & Gomes Jr., S. (2018), *Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels*, Electric Power Systems Research, Vol.155, pp.350-362.
Doi: 10.1016/j.epsr.2017.11.006.
- [5] IEEE (2017), *Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard - Design*.
- [6] DNV (2024), *Rules for Classification: Ships - Electrical Installations*.
- [7] Hansen, J. F., & Wendt, F. (2015), *History and state of the art in commercial electric ship propulsion*, integrated power systems, and future trends, Proceedings of the IEEE, Vol.103(12), pp.2229-2242.
- [8] Bose, B. K. (2002), *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall.
- [9] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003), *Power Electronics: Converters, Applications, and Design (3rd ed.)*, John Wiley & Sons.
- [10] Rashid, M. H. (2017), *Power Electronics Handbook (4th ed.)*, Butterworth-Heinemann.
- [11] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003), *Power System Harmonics (2nd ed.)*, John Wiley & Sons.
- [12] ABB Marine (2019), *Azipod Propulsion System, Technical Brochure*.
- [13] Yue, J., Zhu, J., Zhao, T., Wang, Z., & He, W. (2024), *Three-vector model predictive current control strategy of PMSM for marine electric propulsion based on three-level inverter*, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.19(4), pp.2311-2321.
Doi: 10.1007/s42835-023-01702-w.
- [14] Wang, Z., Liao, P., Long, F., Wang, Z., Ji, Y., & Han, F. (2025), *Maritime electrification pathways for sustainable shipping: Technological advances, environmental drivers, challenges, and prospects*, eTransportation, Vol.26, p.100462.
Doi: 10.1016/j.etrans.2025.100462.

Ngày nhận bài:	03/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	20/04/2026
Ngày duyệt đăng:	30/04/2026