

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP CẤP ĐIỆN BỜ CHO TÀU BIỂN THEO MÔ HÌNH CẢNG XANH TẠI VIỆT NAM

A STUDY ON SHORE POWER SUPPLY SOLUTIONS FOR SHIPS AT THE GREEN PORT IN VIETNAM

LUU KIM THÀNH¹, VƯƠNG ĐỨC PHÚC^{2*}, VŨ KHẮC ĐIỆP³

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

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

³Đoàn 871, Tổng cục chính trị Quân đội nhân dân Việt Nam

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

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.892>

Tóm tắt

Hiện nay, trong quá trình neo đậu tại cảng, các tàu biển vẫn chủ yếu sử dụng máy phát điện chạy bằng nhiên liệu dầu diesel để cung cấp điện cho các thiết bị và hệ thống trên tàu. Dầu diesel, vốn là một loại nhiên liệu hóa thạch có nguồn cung hữu hạn, không những gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng mà còn phát thải khí nhà kính, đặc biệt là khí CO₂. Trước thực trạng đó, việc nghiên cứu, tính toán và triển khai hệ thống cấp điện từ bờ (shore power) nhằm thay thế nguồn điện từ máy phát trên tàu trở nên cấp thiết. Hệ thống cấp điện từ bờ mang lại nhiều lợi ích thiết thực, bao gồm khả năng cung cấp điện năng ổn định, nâng cao hiệu suất vận hành, giảm chi phí nhiên liệu và bảo dưỡng, đồng thời góp phần giảm phát thải khí độc hại ra môi trường. Việc ứng dụng giải pháp này không chỉ phù hợp với xu hướng sử dụng năng lượng sạch, mà còn là một trong những bước đi chiến lược nhằm hiện thực hóa mục tiêu phát triển cảng biển xanh, bền vững và thân thiện với môi trường. Trong giới hạn nội dung bài báo sẽ đề cập thiết kế bộ biến đổi nguồn điện 380VAC/50Hz thành nguồn điện 440VAC/60Hz để cấp điện cho các tàu sử dụng nguồn điện có tần số 60Hz.

Từ khóa: Trạm cấp điện bờ cho tàu, cảng xanh, bộ biến đổi tần số 50Hz-60Hz, biến đổi tần số điện áp cao.

Abstract

Currently, during berthing operations at ports, ships primarily rely on diesel-powered generators to supply electricity for onboard machinery and equipment. Diesel fuel, a finite fossil energy source, not only contributes significantly to environmental pollution but also emits substantial

amounts of greenhouse gases, particularly CO₂. In light of these challenges, the research, analysis, and implementation of shore power systems to replace onboard generators are increasingly necessary.

The shore power system offers numerous practical benefits, including stable power supply, improved operational efficiency, reduced fuel and maintenance costs, and a significant reduction in harmful emissions. The application of this solution aligns with the global trend of utilizing clean energy and represents a strategic step toward achieving the goals of developing green, sustainable, and environmentally friendly seaports. Within the scope of this article, we will discuss the design of a 380VAC/50Hz power converter to 440VAC/60Hz power supply to supply power to ships using 60Hz power.

Keywords: Shore power station for ships, green port, frequency converter 50Hz-60Hz, high voltage frequency converter.

1. Đặt vấn đề

Ngành Hàng hải đóng vai trò then chốt trong tiến trình phát triển kinh tế - xã hội, đặc biệt trong hoạt động xuất nhập khẩu hàng hóa và kết nối giao thương giữa các vùng miền trong và ngoài nước. Tại Việt Nam, hoạt động của đội tàu và hệ thống cảng biển giữ vai trò thiết yếu trong chuỗi cung ứng toàn cầu. Tuy nhiên, sự gia tăng nhanh chóng về số lượng tàu biển cập cảng dưới tác động của quá trình tăng trưởng kinh tế đã kéo theo nguy cơ ô nhiễm môi trường biển và vùng nước cảng ngày càng gia tăng.

Các nguồn phát thải từ hoạt động hàng hải hiện đang trở thành một trong những mối đe dọa lớn đối với hệ sinh thái biển, gây suy thoái tài nguyên, ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe cộng đồng và góp phần

vào biến đổi khí hậu toàn cầu [1]. Theo ước tính, các hoạt động tại khu vực cảng có thể chiếm tới 20% tổng lượng chất thải đổ ra biển. Mức độ ô nhiễm thường tỷ lệ thuận với quy mô và tần suất hoạt động của cảng biển. Trong bối cảnh đó, việc phát triển mô hình cảng xanh, hướng đến tăng trưởng bền vững là xu thế tất yếu, nhằm cân bằng giữa yêu cầu phát triển kinh tế và mục tiêu bảo vệ môi trường. Mô hình cảng xanh đề cao việc ứng dụng năng lượng tái tạo, giảm thiểu phát thải và tối ưu hiệu quả vận hành.

Cảng xanh có thể được định nghĩa là một phương pháp tiếp cận mang tính hệ thống và tổng thể trong toàn bộ vòng đời của một cảng biển, từ giai đoạn quy hoạch, thiết kế, xây dựng cho đến quá trình quản lý và vận hành khai thác. Mục tiêu cốt lõi của phương pháp tiếp cận này là tối thiểu hóa các tác động tiêu cực có thể phát sinh đối với môi trường tự nhiên và xã hội, tối ưu hóa việc sử dụng các nguồn tài nguyên thiên nhiên và năng lượng, đồng thời đảm bảo sự phát triển ổn định và bền vững về mặt kinh tế cũng như xã hội trong dài hạn.

Thực tế hiện nay cho thấy, phần lớn tàu biển khi neo đậu tại các cảng ở Việt Nam vẫn sử dụng máy phát điện diesel để cung cấp điện cho hệ thống thiết bị trên tàu. Việc này không chỉ làm phát sinh lượng lớn khí CO₂ và các khí nhà kính, mà còn gây ô nhiễm tiếng ồn, ảnh hưởng đến môi trường xung quanh và đời sống người dân khu vực cảng. Do đó, giải pháp cấp điện bờ cho tàu khi cập cảng được xem là một hướng đi hiệu quả, vừa tiết kiệm năng lượng, vừa giảm thiểu ô nhiễm, góp phần hiện thực hóa mục tiêu xây dựng hệ sinh thái cảng biển xanh.

Với đặc điểm hệ thống điện lưới quốc gia tại Việt Nam hiện nay (điện áp ba pha, tần số 50Hz), việc cấp điện trực tiếp cho các tàu có hệ thống điện cùng tần số là hoàn toàn khả thi. Tuy nhiên, một bộ phận không nhỏ tàu nước ngoài, đặc biệt từ các quốc gia như Nhật Bản, Hàn Quốc, Mỹ,... lại sử dụng thiết bị điện yêu cầu tần số 60Hz. Để bảo đảm sự tương thích và an toàn cho hệ thống điện trên tàu, cần thiết phải tích hợp thiết bị chuyển đổi tần số từ 50Hz sang 60Hz khi thực hiện cấp điện bờ. Trong nội dung bài báo này là sử dụng nguồn năng lượng điện lưới quốc gia Việt Nam 380VAC/50Hz để biến đổi thành nguồn điện 440VAC/60Hz.

Hiện nay, trên phạm vi quốc tế, các nghiên cứu chuyên sâu liên quan đến hệ thống chuyển đổi tần số để cấp điện bờ cho tàu biển vẫn còn tương đối hạn chế. Nguyên nhân chủ yếu là do phần lớn các quốc gia có ngành hàng hải phát triển đã thiết lập sự đồng bộ về tần số điện giữa lưới điện quốc gia và hệ thống điện

trên tàu, qua đó loại bỏ nhu cầu chuyển đổi tần số trong quá trình cấp điện.

Tại Việt Nam, một số doanh nghiệp trong nước như Công ty TNHH Kỹ nghệ Vintech, Công ty Dakiatech, Công ty TNHH Công nghệ Điều khiển LISA,... đã bước đầu nghiên cứu và chế tạo thành công thiết bị chuyển đổi tần số nhằm đáp ứng nhu cầu thực tiễn. Mặc dù vậy, các sản phẩm hiện tại vẫn còn tồn tại những hạn chế nhất định như chi phí cao, chưa có đầy đủ minh chứng về độ tin cậy và hiệu quả vận hành, đặc biệt là trong điều kiện môi trường đặc thù của ngành hàng hải.

Trước thực trạng đó, nhóm tác giả đã triển khai nghiên cứu với mục tiêu nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng hệ thống bộ biến đổi tần số điện áp xoay chiều ba pha 380VAC/50Hz thành 440VAC/60Hz nhằm đáp ứng nhu cầu cấp điện bờ cho các tàu biển quốc tế có hệ thống điện 60Hz. Cụ thể, nghiên cứu đặt ra các mục tiêu sau:

Phân tích nguyên lý và lựa chọn cấu trúc bộ biến đổi dựa trên công nghệ điện tử công suất, áp dụng kỹ thuật điều chế độ rộng xung vectơ không gian (SVPWM).

Xây dựng mô hình mô phỏng trên Matlab/Simulink với các thông số định lượng: điện áp đầu vào 380VAC/50Hz, điện áp đầu ra yêu cầu 440VAC/60Hz, công suất tải đến 100 kW, tần số điều chế sóng mang 10 kHz.

Đánh giá chất lượng điện áp và dòng điện đầu ra thông qua các chỉ tiêu kỹ thuật như độ méo hài tổng (THD < 5%), độ ổn định điện áp, đáp ứng tải RL và tải thuần trở.



Hình 1. Mô hình cấp điện bờ cho tàu

Đây là một trong số ít công trình trong nước gần kết thực tiếp giải pháp biến đổi tần số với định hướng phát triển cảng xanh, góp phần cung cấp luận cứ khoa học và thực tiễn cho việc triển khai ở Việt Nam. Khẳng định tính khả thi ứng dụng thực tiễn của bộ biến đổi trong hệ thống cấp điện bờ tại cảng biển Việt Nam, góp phần hiện thực hóa mô hình cảng xanh.

Bài báo này không nhằm bao quát toàn bộ các khía

cạnh của giải pháp cấp điện bờ cho tàu biển, mà tập trung đi sâu vào một nội dung kỹ thuật then chốt: Thiết kế và mô phỏng bộ biến đổi tần số 380VAC/50Hz sang 440VAC/60Hz. Đây là yêu cầu bắt buộc để đảm bảo sự tương thích điện áp - tần số giữa lưới điện quốc gia và các tàu biển quốc tế, từ đó khẳng định tính khả thi của giải pháp cấp điện bờ theo mô hình cảng xanh tại Việt Nam. Nhóm tác giả áp dụng phương pháp tiếp cận mô phỏng - thực nghiệm dựa trên công nghệ điện tử công suất để thiết kế và đánh giá bộ biến đổi tần số.

2. Tổng quan về bộ biến đổi tần số

Bộ biến đổi tần số (frequency converter) là thiết bị dùng để chuyển đổi tần số của nguồn điện từ 50Hz (tần số chuẩn của lưới điện quốc gia Việt Nam) sang 60Hz nhằm đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của các tàu biển quốc tế. Sơ đồ khối của bộ biến đổi tần số được thể hiện ở Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối bộ biến đổi tần số AC-AC

Hiện nay, có hai loại bộ biến đổi tần số phổ biến: Loại sử dụng điện tử công suất (bán dẫn) và loại dạng quay (rotary). Trong đó, bộ biến đổi tần số sử dụng công nghệ bán dẫn có ưu điểm vượt trội như mật độ công suất cao, vận hành êm, tính linh hoạt lớn và hiệu suất chuyển đổi cao. Đặc biệt, đây là giải pháp phù hợp với định hướng sử dụng nguồn năng lượng xanh, thân thiện với môi trường.

Bài báo tập trung phân tích bộ chuyển đổi nguồn xoay chiều ba pha này, sử dụng hai giai đoạn chuyển đổi điện tử công suất. Giai đoạn thứ nhất là chỉnh lưu AC-DC, giúp chuyển đổi dòng xoay chiều thành dòng một chiều. Giai đoạn thứ hai là biến tần DC-AC, giúp chuyển đổi dòng một chiều thành dòng xoay chiều với tần số mong muốn. Cấu trúc này được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống cấp điện bờ hiện đại.

3. Xây dựng bộ biến đổi tần số

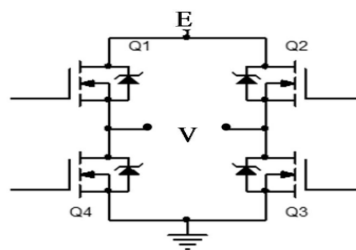
3.1. Nguyên lý điều chế độ rộng xung để tạo dạng sóng hình sin

Bộ biến đổi tần số trong nghiên cứu này có cấu trúc hai giai đoạn:

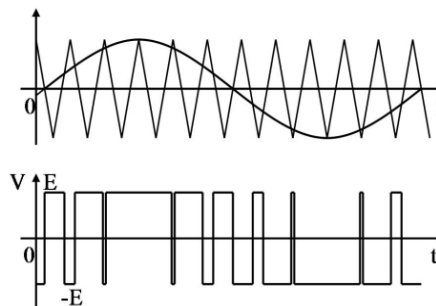
Khâu chỉnh lưu AC-DC: Sử dụng cầu chỉnh lưu ba pha toàn sóng với IGBT, nhằm biến đổi điện áp xoay chiều 380V/50Hz thành điện áp một chiều. Dòng điện sau chỉnh lưu được lọc bằng mạch LC để tạo nguồn DC ổn định, giảm nhấp nhô điện áp.

Khâu nghịch lưu DC-AC: Sử dụng nghịch lưu ba pha cầu H với IGBT (300A/1200V), làm nhiệm vụ biến đổi nguồn DC thành điện áp xoay chiều ba pha 440V/60Hz. Để đảm bảo chất lượng sóng, đầu ra nghịch lưu có bộ lọc LC

Hình 3 minh họa sơ đồ mạch động lực của bộ biến tần một pha. Trong mỗi thời điểm vận hành, chỉ có một cặp van bán dẫn dẫn dòng, cụ thể là Q1-Q3 hoặc Q2-Q4. Để tạo ra điện áp đầu ra có dạng hình sin, các cặp van này được điều khiển đóng/cắt luân phiên dựa trên nguyên lý so sánh giữa tín hiệu sóng sin cần điều biến và chuỗi xung sóng tam giác có tần số dao động từ 5 đến 50 kHz (tham khảo Hình 4). Khi biên độ sóng sin lớn hơn biên độ xung tam giác tại thời điểm tương ứng, cặp van Q1-Q3 được kích hoạt, trong khi Q2-Q4 bị ngắt, và ngược lại.



Hình 3. Biến tần 1 pha



Hình 4. Giản đồ điều chế chế độ rộng xung Sin

Điện áp đầu ra thu được là một chuỗi xung vuông điều biến độ rộng theo biên độ sóng sin (PWM). Trong trường hợp tần số sóng mang đủ cao và có bổ sung mạch lọc LC, dòng điện tại đầu ra của mạch công suất sẽ có dạng gần với hình sin. Nguyên lý điều khiển này, khi được kết hợp với phân tích véc-tơ không gian của hệ thống điện áp ba pha, sẽ hình thành phương pháp điều biến vector không gian (SVPWM) được áp dụng cho các bộ biến tần ba pha [2-4].

3.2. Nguyên lý điều biến SVPWM áp dụng cho biến tần ba pha

Sơ đồ nguyên lý hoạt động của bộ biến tần ba pha

được minh họa trong Hình 5. Trong đó, các điện áp pha đầu ra được ký hiệu là V_a , V_b , V_c , còn các điện áp dây tương ứng là V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} . Mạch gồm sáu van bán dẫn công suất, đánh số từ Q1 đến Q6, được điều khiển bằng các tín hiệu logic a, a', b, b', c, c'. Khi một van phía trên dẫn (logic mức 1), thì van phía dưới tương ứng trong cùng một pha sẽ bị khóa (logic mức 0). Nhằm tạo ra dạng sóng điện áp hình sin tại đầu ra, các van công suất được kích hoạt đóng/mở theo một chu trình xác định. Mỗi quan hệ giữa vectơ logic điều khiển $[a \ b \ c]^T$ và điện áp đầu ra cho bởi phương trình (1) và (2).

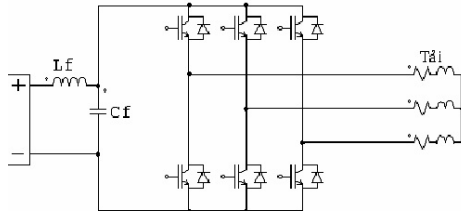
Điện áp pha:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} E \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Điện áp dây:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó, E là giá trị điện áp nguồn một chiều cấp cho biến tần. Dựa trên các trạng thái logic có thể có, ta xây dựng được tám vectơ điện áp chuẩn $V_0, V_1, \dots, V_7$ như trình bày trong Bảng 1. Các vectơ này có độ lớn $2E/3$, lệch nhau góc 60° và tạo nên sáu vùng điều chế trong không gian vectơ (S_1 đến S_6), như thể hiện trong Hình 5. Đây là cơ sở cho phương pháp SVPWM



Hình 5. Sơ đồ mạch động lực

Bảng 1. Vectơ điện áp chuẩn

Vol	Trạng thái logic của tín hiệu điều khiển			Hệ số điện áp pha		
	a	b	c	V_a	V_b	V_c
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$
V_2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$
V_3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$
V_4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$
V_5	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$
V_6	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$
V_7	1	1	1	0	0	0

[5], [6] được áp dụng rộng rãi trong các bộ biến tần hiện đại [7], [8].

Ba điện áp pha hình sin lệch pha nhau góc 120° sẽ tạo thành một vectơ điện áp tổng hợp V_{ref} quay với tốc độ góc $\omega = 2\pi f$, với f là tần số xoay chiều [6]. Để phân tích và điều khiển, hệ tọa độ ba pha được chuyển đổi sang hệ tọa độ hai chiều cố định dq bằng phương pháp biến đổi Clark và Park, được mô tả trong phương trình (3). Tọa độ dq được xây dựng sao cho trục d trùng với trục điện áp pha A, như minh họa ở Hình 6.

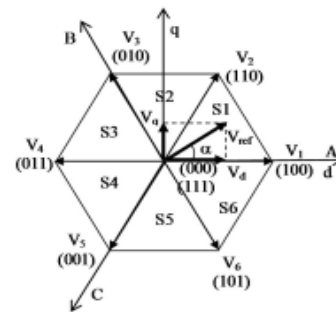
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

V_{ref} được tính như sau:

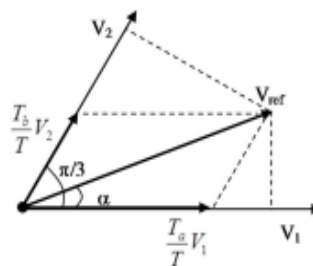
$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \omega t = 2\pi f t = \tan^{-1} \left(\frac{V_q}{V_d} \right) \quad (5)$$

Vectơ điện áp V_{ref} có thể tính toán theo các phương trình (4) và (5). Vectơ V_0 và V_7 tương ứng với trạng thái toàn bộ ba van phía trên (Q_1, Q_3, Q_5) hoặc ba van phía dưới (Q_2, Q_4, Q_6) đều được khóa, do đó chúng trùng tại gốc tọa độ ($V = 0$).



Hình 6. Không gian vectơ



Hình 7. Vector V_{ref} trong vùng S_1

Quá trình tổng hợp điện áp xoay chiều ba pha được thực hiện thông qua việc điều khiển đóng - ngắt luân phiên sáu van công suất nhằm tạo ra vectơ điện áp V_{ref} từ các vectơ chuẩn V_1 đến V_6 . Trong trường hợp V_{ref} nằm trong vùng điều chế S_1 (nằm giữa hai vectơ V_1 và

V_2), như được minh họa trong Hình 7, thuật toán SVPWM sẽ xác định tỷ lệ thời gian đóng của từng vector để tạo ra tín hiệu điều khiển phù hợp.

Cụ thể, để thực hiện V_{ref} trong một chu kỳ T , vector V_1 sẽ được duy trì trong khoảng gian T_a và vector V_2 được duy trì trong khoảng thời gian T_b , [2-4].

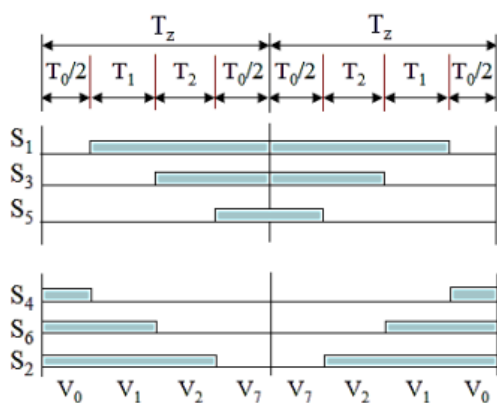
$$\int_0^T V_{ref} dt = \int_0^{T_a} V_1 dt + \int_{T_a}^{T_a+T_b} V_2 dt + \int_{T_a+T_b}^{T-T_a-T_b} V_0 dt$$

(hoặc $V_0 dt$)

$$TV_{ref} = T_a V_1 + T_b V_2 + T_0 V_0 \quad (6)$$

Với: $T = T_a + T_b + T_0$

T_0 được định nghĩa là khoảng thời gian ngưng dẫn của các van công suất, tương ứng với các vector điện áp $V_0(000)$ hoặc $V_7(111)$ như trình bày trong Bảng 1.



Hình 8. Giản đồ đóng cắt trong vùng S_1

Do cả V_0 và V_7 đều có biên độ bằng không, ta có:

$$V_{ref} = \frac{T_a}{T} V_1 + \frac{T_b}{T} V_2 \quad (7)$$

Từ phương trình (5) và phương trình (7) ta có:

$$V_{ref} \sin(\alpha) = \frac{T_b}{T} V_2 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (8)$$

$$V_{ref} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) = \frac{T_a}{T} V_1 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (9)$$

Thay $V_1 = V_2 = 2E/3$, ta được:

$$T_a = T \frac{\sqrt{3}}{E} V_{ref} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \quad (10)$$

$$T_b = T \frac{\sqrt{3}}{E} V_{ref} \sin(\alpha) \quad (11)$$

Công thức tổng quát tính T_a , T_b cho tất cả các miền S :

$$T_a = T \frac{\sqrt{3}}{E} V_{ref} \sin\left(\frac{n\pi}{3} - \alpha\right) \quad (12)$$

$$T_b = T \frac{\sqrt{3}}{E} V_{ref} \sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi\right) \quad (13)$$

Trong đó, $n = 1, 2, \dots, 6$ tương ứng với các vùng điều chế $S_1, S_2, \dots, S_6$. Thông thường, sóng mang sử dụng để điều chế V_{ref} được thiết kế đối xứng, trong đó một chu kỳ cập nhật dữ liệu T_a, T_b cho điều chế V_{ref} tương ứng với hai chu kỳ sóng mang T , như minh họa ở Hình 8. Dựa trên vị trí của các vùng điều chế, thứ tự sắp xếp các vector điều chế và giá trị điện áp trong từng vùng, Bảng 2 được xây dựng nhằm mô tả chi tiết thời gian đóng - ngắt của các van công suất trong mạch.

Các bước thực hiện điều chế vector PWM

Bước 1: Dựa trên giá trị mong muốn của điện áp pha V_a, V_b và V_c tính V_d, V_q, V_{ref} cùng góc quay α , theo phương trình (3), (4), (5).

Bước 2: Xác định vùng điều chế mà vector V_{ref} đang thuộc vùng điều chế nào. Từ đó, tính toán thời gian dẫn tương ứng T_a, T_b theo công thức (12) và (13).

Bước 3: Dựa vào vị trí không gian của vector V_{ref} xác định các van bán dẫn cần mở. Việc lựa chọn và phân bố thời gian dẫn của các van sẽ tuân theo chu trình đã được quy định trong Bảng 2, nhằm đảm bảo tạo ra dạng sóng điện áp đầu ra gần giống hình sin.

Bảng 2. Thời gian đóng cắt van trên các vùng

Vùng	Cụm van trên (Q_1, Q_3, Q_5)	Cụm van dưới (Q_2, Q_4, Q_6)
S1	$Q_1 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_4 = T_0/2$
	$Q_3 = T_b + T_0/2$	$Q_6 = T_a + T_0/2$
	$Q_5 = T_0/2$	$Q_2 = T_a + T_b + T_0/2$
S2	$Q_1 = T_a + T_0/2$	$Q_4 = T_0/2$
	$Q_3 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_6 = T_0/2$
	$Q_5 = T_0/2$	$Q_2 = T_a + T_b + T_0/2$
S3	$Q_1 = T_0/2$	$Q_4 = T_a + T_b + T_0/2$
	$Q_3 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_6 = T_0/2$
	$Q_5 = T_b + T_0/2$	$Q_2 = T_a + T_b + T_0/2$
S4	$Q_1 = T_0/2$	$Q_4 = T_a + T_b + T_0/2$
	$Q_3 = T_a + T_0/2$	$Q_6 = T_b + T_0/2$
	$Q_5 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_2 = T_0/2$
S5	$Q_1 = T_b + T_0/2$	$Q_4 = T_a + T_0/2$
	$Q_3 = T_0/2$	$Q_6 = T_a + T_b + T_0/2$
	$Q_5 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_2 = T_0/2$
S6	$Q_1 = T_a + T_b + T_0/2$	$Q_4 = T_0/2$
	$Q_3 = T_0/2$	$Q_6 = T_a + T_b + T_0/2$
	$Q_5 = T_a + T_0/2$	$Q_2 = T_b + T_0/2$

3.3. Mô phỏng hệ thống bộ biến đổi tần số bằng Matlab/Simulink

3.3.1. Nguyên lý bộ biến đổi tần số

Hình 9 minh họa cấu trúc tổng thể của một hệ thống bộ biến đổi tần số, bao gồm các khối chức năng

chính như sau:

* **Khối nguồn (Power Supply):** Bộ phận này đảm nhiệm chức năng tiếp nhận nguồn điện xoay chiều (AC) từ lưới điện và thực hiện chuyển đổi sang dòng điện một chiều (DC) thông qua các linh kiện chỉnh

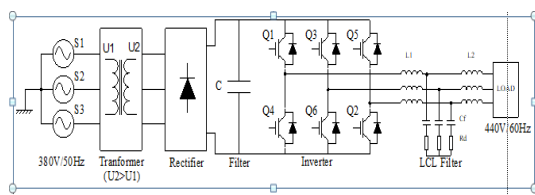
lưu như diode hoặc thyristor.

* **Khối liên kết DC (DC Link):** Dòng điện một chiều sau khi chỉnh lưu thường chứa các thành phần nhiễu và dao động không mong muốn. Khối liên kết DC sử dụng bộ lọc LC (tụ điện và cuộn cảm) để triệt tiêu các nhiễu, tạo ra nguồn DC ổn định cung cấp cho giai đoạn chuyển đổi tiếp theo.

* **Khối nghịch lưu (Inverter):** Giai đoạn này sử dụng các linh kiện bán dẫn công suất như IGBT, MOSFET hoặc GTO để chuyển đổi dòng điện DC thành dòng điện AC có tần số và điện áp đầu ra theo yêu cầu. Quá trình điều chế độ rộng xung (PWM) thường được áp dụng để kiểm soát chất lượng điện áp đầu ra.

* **Bộ lọc đầu ra (Output Filter):** Mặc dù đã được chuyển đổi, điện áp xoay chiều đầu ra từ khối nghịch lưu vẫn có thể tồn tại các thành phần sóng hài và nhiễu cao tần. Bộ lọc đầu ra, bao gồm bộ lọc LC và biến áp, được sử dụng nhằm làm mượt dạng sóng, giảm méo hài và đảm bảo cung cấp điện áp hình sin ổn định cho tải.

* **Hệ thống điều khiển (Control Unit):** Đảm nhiệm chức năng giám sát và điều khiển toàn bộ hoạt động của bộ biến đổi tần số, hệ thống điều khiển thực hiện việc điều chỉnh các tín hiệu điều khiển tới các van công suất nhằm đảm bảo thông số điện áp, tần số đầu ra đạt yêu cầu, đồng thời duy trì tính ổn định và an toàn của hệ thống [9].

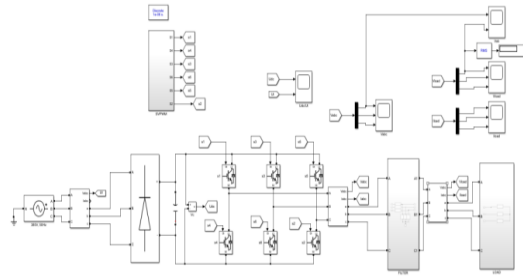


Hình 9. Sơ đồ cấu trúc bộ biến đổi tần số

3.3.2. Xây dựng mô phỏng trên Matlab/Simulink

Sơ đồ mô phỏng bộ biến đổi tần số được thiết lập trên môi trường Matlab/Simulink như thể hiện ở Hình 10. Trong mô hình này, các thông số vận hành được cấu hình như sau:

- Điện áp đầu vào: 380VAC tại tần số 50Hz.
- Hệ số điều chế biên độ (M): 0,75.
- Tần số điều chế sóng mang: 10kHz.
- Điện áp đầu ra mong muốn: 440V/60Hz.



Hình 10. Sơ đồ mô phỏng

Thông số khâu lọc DC link:

- + Điện áp danh định: 900V;
- + Điện áp nhấp nhô cho phép (ΔV_{dc}): $< 5\%$.
- + $C=15000\mu F$.

Thông số IGBT:

- + Điện áp định mức $> 750V$ do vậy chọn loại 1200V để có biên độ an toàn so với 750V DC.
- + Chọn module IGBT 300A/1200V.
- + Tổn hao trên nghịch lưu có thể khoảng $\approx 5.3kW$. Yêu cầu bộ tản nhiệt hiệu suất cao, làm mát bằng chất lỏng.

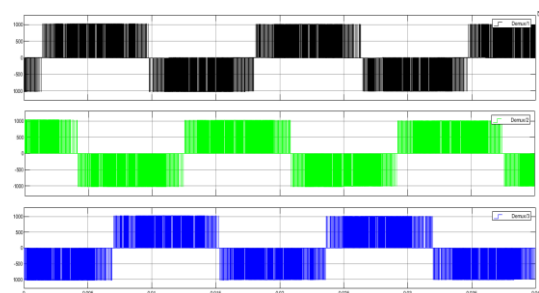
Thông số khâu lọc đầu ra:

- $L_f=642\mu H$;
- $C_f=70\mu F$ cho mỗi pha đầu Y.

Mô hình cho phép đánh giá đặc tính làm việc của bộ biến đổi tần số khi vận hành với các tham số trên, từ đó phân tích chất lượng điện áp đầu ra, khả năng đáp ứng tần số và mức độ ổn định trong điều kiện hoạt động tiêu chuẩn [10].

3.4. Kết quả mô phỏng

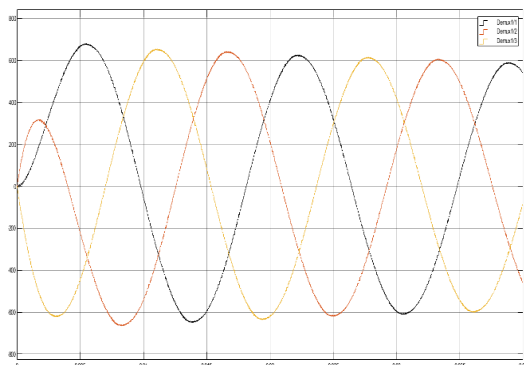
Dạng điện áp 3 pha nhận được từ mô phỏng trước bộ lọc (Hình 11) và sau bộ lọc (Hình 12).



Hình 11. Điện áp 3 pha trước lọc

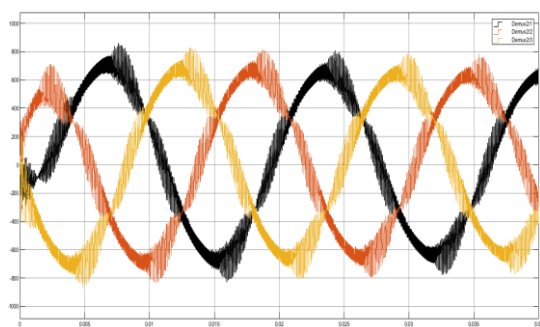
Kết quả mô phỏng thu được từ quá trình thử nghiệm bộ biến đổi tần số 50Hz/60Hz dưới các điều kiện tải khác nhau được trình bày trong Bảng 3. Các thông số kiểm tra cho thấy hệ thống đáp ứng đầy đủ các tiêu chí kỹ thuật đặt ra ban đầu. Cụ thể, khi tiến

hành thử nghiệm với tải hỗn hợp điện trở - cảm (RL) và tải thuần trở, ở mức công suất lên đến 100 kW, bộ biến đổi duy trì khả năng cung cấp điện áp và dòng điện ổn định cho các loại tải khác nhau. Kết quả cho thấy điện áp và dòng điện không xuất hiện hiện tượng lệch pha hay suy giảm biên độ đáng kể, đồng thời hoạt động của thiết bị luôn nằm trong giới hạn cho phép theo yêu cầu thiết kế.

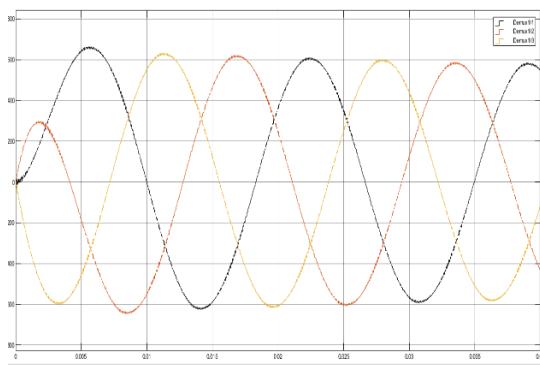


Hình 12. Điện áp 3 pha sau khi lọc với 440VAC/60Hz

** Mô phỏng với tải RL, $P=100kW$, $Q=10kVar$;*



Hình 13. Điện áp trên tải

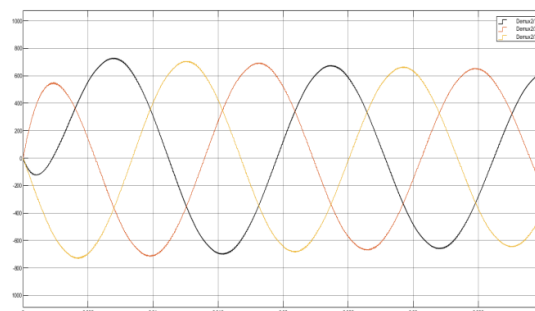


Hình 14. Dòng điện tải

** Mô phỏng với tải thuần trở $P=100kW$;*

Theo QCVN 126:2025/BGTVT (Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về hệ thống đẩy bằng động cơ điện lắp đặt trên phương tiện thủy nội địa), ban hành kèm theo

Thông tư 05/2025/TT BGTVT của Bộ Giao thông Vận tải quy định độ méo phi tuyến là dưới 5%.



Hình 15. Dòng điện trên tải

Bảng 3. Số liệu mô phỏng

Thông số	Đơn vị	Kết quả
Bộ nguồn biến đổi tần số 3 pha	Bộ	01
Điện áp đầu vào 3 pha	V	380
	Hz	50
Điện áp đầu ra 3 pha	V	440
	Hz	60
Sai lệch tần số 60Hz	%	<0.5
Điện áp ra bộ nguồn ổn định. Sai lệch tĩnh	%	1
Điện áp ra có dạng hình sin - Độ méo phi tuyến	%	<5

4. Kết luận

Bài báo đã tập trung nghiên cứu và phát triển giải pháp kỹ thuật cụ thể trong hệ thống cấp điện bờ, đó là bộ biến đổi tần số 380VAC/50Hz sang 440VAC/60Hz. Thông qua quá trình thiết kế và mô phỏng, kết quả cho thấy bộ biến đổi bảo đảm điện áp và tần số đầu ra ổn định, đạt chất lượng sóng hình Sin, đáp ứng yêu cầu khắt khe về méo hài tổng và độ tin cậy vận hành đối với thiết bị điện trên tàu biển.

Điểm nổi bật của nghiên cứu là đã xây dựng được mô hình mô phỏng chi tiết trên Matlab/Simulink với công suất tải lên đến 100kW, đồng thời áp dụng kỹ thuật điều chế SVPWM để tối ưu chất lượng điện áp. So với các công trình trong và ngoài nước, nghiên cứu này cung cấp một hướng tiếp cận mang tính ứng dụng cao, gắn trực tiếp với nhu cầu thực tiễn tại các cảng biển Việt Nam - nơi tồn tại sự khác biệt tần số giữa lưới điện quốc gia và hệ thống điện tàu biển quốc tế.

Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tính khả thi về mặt kỹ thuật của bộ biến đổi tần số mà còn cho thấy vai trò của nó như một mắt xích quan trọng trong giải pháp cấp điện bờ, góp phần giảm phát thải, tiết

kiệm năng lượng và thúc đẩy mục tiêu phát triển cảng xanh bền vững. Đây là cơ sở để tiếp tục xây dựng mô hình thực nghiệm và triển khai ứng dụng trong điều kiện thực tế tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cục Hàng hải Việt Nam (2020), *Đề án phát triển cảng xanh tại Việt Nam*, Toàn văn Quyết định 2027/QĐ-BGTVT năm 2020.
- [2] Trần Trọng Minh (2009), *Điện tử công suất*, Nhà xuất bản Giáo dục.
- [3] Nguyễn Bính (2008), *Điện tử công suất*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [4] Nguyễn Văn Nhò (2002), *Giáo trình Điện tử công suất*, Nhà xuất bản ĐHQG TP. Hồ Chí Minh.
- [5] W.-F. Zhang and Y.-H. Yu (2007), *Comparison of Three SVPWM Strategies*, Journal of Electronic Science and Technology, Vol.5, No.4, pp.356-360.
- [6] Quách Đức Cường, Nguyễn Văn Đoàn (2019), *Điều chế vectơ không gian cho biến tần ba pha hai mức trên hệ thống nhúng ARM Cortex*, Hội nghị khoa học HaUI lần thứ III..
- [7] Sas Reusser, A., Fang, S. (2022), *A Review of Power Converters for Ships Electrification*, UiT - The Arctic University of Norway.
- [8] F. D'Agostino, S. Grillo, R. Infantino, E. Pons (2021), *High Voltage Shore Connection Systems: Grounding Resistance Selection and Short Circuit Currents Evaluation*, arXiv preprint.
- [9] El-Shatshat et al. (2023), *Output Voltage Harmonics Mitigation in Static Frequency Converter for Shore to Ship Connection*, Journal of Electrical Engineering.
- [10] Xiaoqiang Zhu, Ke Wang, Jianlong Yang (2022), *Research on the control strategy of grid connection between shore power and ship system*, ScienceDirect.

Ngày nhận bài:	11/08/2025
Ngày nhận bản sửa:	21/10/2025
Ngày duyệt đăng:	06/11/2025