



NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG VẬT LIỆU NANO CACBON CHẾ TẠO THANH DẪN RÔTÔ TRONG ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP

Trần Thanh Tuyền¹, Trần Hữu Phúc^{2,*}, Nguyễn Thị Thương Duyên¹, Đoàn Thị Bích Thủy¹

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh, Mạo Khê, Quảng Ninh, Việt Nam

²Trường Đại học Công nghệ Đông Á, Phan Tây Nhạc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/4/2026

Ngày nhận bài sửa: 05/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 10/5/2026

^{2,*}Tác giả liên hệ:

Email: phuuth@eaut.edu.vn

TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor- LSPMSM) có khả năng tự khởi động trực tiếp từ lưới điện đồng thời duy trì hiệu suất và hệ số công suất cao. Trong thiết kế rôto LSPMSM, vật liệu thanh dẫn đóng vai trò quan trọng đối với hiệu suất khởi động, dao động mô men và trọng lượng tổng thể. Theo truyền thống, nhôm (Al) và đồng (Cu) được sử dụng phổ biến, nhưng vẫn tồn tại hạn chế về khối lượng, điện trở suất và khả năng chịu tải nhiệt. Bài báo này đánh giá tiềm năng của vật liệu nano carbon (carbon nanotube- CNT) trong chế tạo thanh dẫn rôto. CNT có độ dẫn điện cao, khối lượng nhẹ, khả năng chịu dòng điện lớn và hệ số nhiệt âm, giúp cải thiện hiệu suất dẫn điện, giảm trọng lượng và nâng cao độ ổn định tốc độ. Nhóm tác giả thực hiện mô phỏng động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực để so sánh hiệu suất của các vật liệu truyền thống (Cu, Al) với các vật liệu CNT, tập trung vào các chỉ tiêu như mô men xoắn, độ ổn định tốc độ và khả năng khởi động. Kết quả nghiên cứu cho thấy CNT là vật liệu tiềm năng để nâng cao hiệu suất và độ ổn định của động cơ LSPMSM thế hệ mới, đồng thời mở ra hướng phát triển các động cơ điện hiệu suất cao, nhẹ và thân thiện với môi trường.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp, vật liệu nano cacbon, thanh dẫn rôto, phần mềm Ansys Maxwell.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) kết hợp các ưu điểm của động cơ không đồng bộ và đồng bộ, cho phép khởi động trực tiếp từ lưới điện đồng thời duy trì hiệu quả năng lượng và hệ số công suất cao [1]. Mặc dù chi phí của nam châm vĩnh cửu (NCVC) còn cao, LSPMSM vẫn thu hút sự quan tâm nhờ khả năng vận hành hiệu quả và ổn định. Sự phát triển của vật liệu nam châm đất hiếm có mật độ năng lượng cao đã mở rộng ứng dụng của LSPMSM trong các thiết bị như máy nén, bơm và quạt gió. Nhờ các đặc tính này, động cơ LSPMSM được xem là giải pháp tiềm năng cho các hệ thống yêu

cầu hiệu suất năng lượng cao và mô men khởi động thấp.

Trong các thiết kế động cơ, vật liệu chế tạo thanh dẫn rôto đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định hiệu suất và đặc tính khởi động của động cơ [2]. Trong các động cơ truyền thống, nhôm (Al) được sử dụng phổ biến do dễ đúc, chi phí thấp và trọng lượng nhẹ [3]. Trong khi đó, đồng (Cu) với điện trở thấp hơn mang lại hiệu suất cao hơn và thường được lựa chọn trong các ứng dụng yêu cầu hiệu suất lớn hoặc độ tin cậy cao, mặc dù có chi phí và khối lượng lớn hơn [4]. Các hợp kim đặc biệt của Al và Cu cũng được phát triển để đáp ứng yêu



cầu làm việc trong điều kiện khắc nghiệt, đặc biệt ở các động cơ có độ trượt cao.

Tuy nhiên, nhu cầu ngày càng cao về giảm khối lượng, tăng mật độ mô men xoắn, hiệu suất truyền dẫn tốt hơn và khả năng hoạt động trong các điều kiện khắc nghiệt đã thúc đẩy xu hướng nghiên cứu các vật liệu mới thay thế cho kim loại truyền thống. Trong bối cảnh đó, vật liệu ống nano cacbon (CNT) nổi lên như một ứng viên tiềm năng nhờ vào các đặc tính ưu việt: dẫn điện và dẫn nhiệt cao, khối lượng nhẹ, độ bền cơ học vượt trội và khả năng chịu dòng điện lớn [5]. Ngoài ra, các vật liệu CNT cũng được chứng minh có thể duy trì hoặc cải thiện hiệu suất điện so với kim loại nguyên chất, đồng thời giảm khối lượng và tăng khả năng chịu nhiệt, chống ăn mòn.

Cấu tạo rôto của động cơ LSPMSM có các rãnh rôto, do đó việc bố trí NCVC trong rôto gặp nhiều khó khăn. Đồng thời, việc giảm kích thước mạch từ rôto dễ dẫn đến hiện tượng bão hòa mạch từ. Ngoài ra, các thanh dẫn rôto chỉ có tác dụng trong giai đoạn khởi động, sau đó động cơ làm việc ở chế độ đồng bộ. Vì vậy, việc tối thiểu hóa thể tích các thanh rôto bằng cách sử dụng vật liệu có điện trở suất thấp như CNT có thể góp phần khắc phục các vấn đề nêu trên.

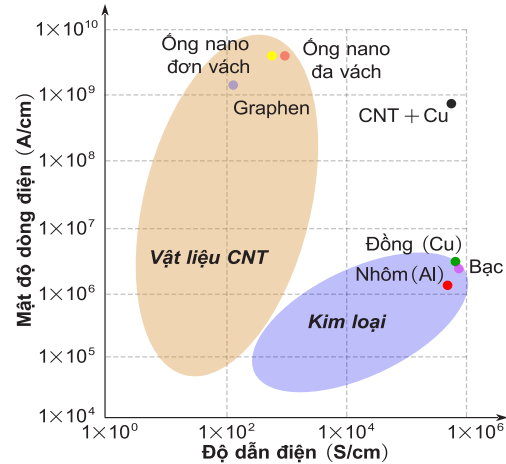
Việc ứng dụng vật liệu CNT chế tạo thanh dẫn rôto không chỉ mở ra khả năng cải thiện đáng kể hiệu suất khởi động và giảm dao động tốc độ cho động cơ LSPMSM, mà còn góp phần vào xu hướng phát triển động cơ điện hiệu suất cao, nhẹ và thân thiện với môi trường – phù hợp với yêu cầu ngày càng khắt khe trong các lĩnh vực thiết bị công nghiệp hiện đại. Vì vậy, việc nghiên cứu và phát triển vật liệu CNT và các composite CNT+kim loại là một hướng đi hứa hẹn trong thiết kế rôto cho LSPMSM thế hệ mới.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu Nano Cacbon (CNT)

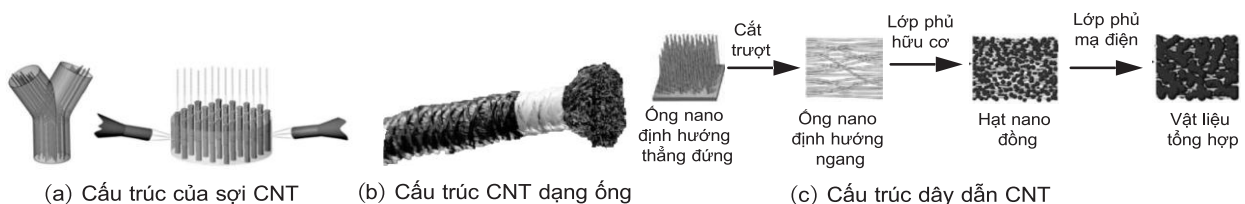
Thanh dẫn rôto trong động cơ điện thường được chế tạo từ nhôm hoặc đồng. Nhôm có ưu

điểm nhẹ, giá thành thấp và dễ đúc, trong khi đồng dẫn điện tốt hơn nhưng lại nặng và chi phí cao hơn. Tuy nhiên, cả hai vật liệu này đều suy giảm hiệu suất khi nhiệt độ tăng do điện trở suất tăng theo nhiệt độ. Trong tương lai, các vật liệu mới có độ dẫn điện cao, điện trở suất thấp và khối lượng riêng nhỏ được kỳ vọng sẽ thay thế cho thanh dẫn rôto nói riêng và dây quấn động cơ điện nói chung. Hình 1 trình bày các đặc tính của một số vật liệu đang được sử dụng trong dây quấn động cơ [6].



Hình 1. Đặc điểm của vật liệu dẫn điện chế tạo thanh dẫn

Hiện nay, các nghiên cứu đang hướng đến vật liệu dẫn điện có hiệu suất cao hơn đồng ở nhiệt độ môi trường. Vật liệu siêu dẫn tuy dẫn điện tốt nhưng không khả thi cho động cơ do yêu cầu nhiệt độ cực thấp. Một giải pháp tiềm năng là dây dẫn CNT với mật độ dòng điện cao gấp 1000 lần và khối lượng giảm 8 lần so với đồng [7]. CNT đã đạt đến 71% độ dẫn điện của đồng và có khả năng thay thế trong tương lai. Tại Việt Nam, CNT và vật liệu lai CNT đã được nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như điện tử, vật liệu hấp thụ và dẫn điện. Dự báo trong 15 năm tới, trọng lượng dây quấn có thể giảm 84% và điện trở tương đương đồng. Hình 2 trình bày các dạng cấu trúc khác nhau chế tạo dây dẫn sử dụng vật liệu CNT.



Hình 2. Cấu trúc của vật liệu CNT [7]



2.1.1. Độ dẫn điện

Độ dẫn điện là thông số chính của vật liệu dẫn điện được sử dụng trong máy điện. Độ dẫn điện (σ) là hàm số của kích thước và hiệu suất dây dẫn, chủ yếu phụ thuộc vào điện trở suất của vật liệu. Độ dẫn điện cũng phụ thuộc vào chiều dài (l) và tiết diện dây dẫn (S); trong đó R là điện trở của vật liệu dẫn điện.

$$\sigma = \frac{l}{R \times S} \quad (1)$$

Dựa vào Bảng 1, các vật liệu dẫn điện truyền thống như đồng và nhôm có độ dẫn điện lần lượt

là 58 MS/m và 38 MS/m ở nhiệt độ phòng. Đồng được sử dụng phổ biến trong các động cơ điện, trong khi nhôm thường dùng cho động cơ không đồng bộ (KĐB) lồng sóc nhờ chi phí thấp hơn. Các nghiên cứu gần đây tập trung vào ứng dụng sợi CNT nhờ cấu trúc đặc biệt với chiều dài lớn và tiết diện nhỏ, giúp cải thiện đáng kể độ dẫn điện. CNT nguyên chất có thể đạt tới 100 MS/m, vượt trội so với các vật liệu dẫn điện truyền thống. Vật liệu hỗn hợp CNT+Cu đạt 23–48 MS/m, trong khi CNT+Al đạt 18,4 MS/m, cho thấy khả năng kết hợp CNT với kim loại cũng đem lại hiệu quả dẫn điện cao.

Bảng 1. Thông số của các vật liệu dẫn điện ở nhiệt độ phòng (20°C) [5]

Vật liệu	Độ dẫn điện (MS/m)	Hệ số nhiệt điện trở (K^{-1})	Độ dẫn điện riêng (Sm^2/kg)
Bạc	64,5	$3,8 \times 10^{-3}$	$6,15 \times 10^4$
Nhôm	38,0	$3,9 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^3$
Đồng	58,0	$3,886 \times 10^{-3}$	$6,73 \times 10^3$
CNT	100	$-0,2 \times 10^{-3}$	15×10^4
CNT+Cu	23-48	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^3$
CNT+Al	18,4	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^4$

Độ dẫn điện riêng là một đại lượng quan trọng phản ánh khả năng dẫn điện của vật liệu trong mối liên hệ với khối lượng, đặc biệt hữu ích khi so sánh các vật liệu nhẹ trong các ứng dụng cần tối ưu hóa khối lượng. Độ dẫn điện riêng có vai trò đảm bảo độ tin cậy trong đánh giá hiệu suất dẫn điện, nhất là khi tiết diện của dây dẫn không đồng đều. Công thức tính độ dẫn điện riêng được xác định như sau:

$$k = \frac{G \times l}{LD} \quad (2)$$

Trong đó, k là độ dẫn điện riêng, G là độ dẫn, l là chiều dài dây dẫn, và LD là mật độ tuyến tính (tex – đơn vị biểu thị khối lượng trên đơn vị chiều dài).

Dữ liệu trong Bảng 1 cho thấy CNT nguyên chất có độ dẫn điện riêng vượt trội so với các vật liệu truyền thống như đồng và nhôm. Vật liệu CNT pha kim loại cũng cho độ dẫn điện riêng cao, trong khi CNT chưa pha tạp lại có giá trị thấp hơn, làm giảm hiệu quả dẫn điện tổng thể.

Để nâng cao độ dẫn điện riêng và mở rộng khả năng ứng dụng của CNT trong các thiết bị dẫn điện, việc tối ưu hóa cấu trúc và quy trình sản xuất sợi CNT là cần thiết. Đây là hướng nghiên cứu tiềm

năng nhằm thay thế các vật liệu dẫn điện truyền thống trong các ứng dụng tương lai.

2.1.2. Hệ số nhiệt điện trở

Hệ số nhiệt độ ảnh hưởng trực tiếp đến điện trở suất – yếu tố quyết định khả năng dẫn điện của vật liệu. Ở các kim loại thông thường, điện trở suất tăng khi nhiệt độ tăng do va chạm giữa các electron, dẫn đến giảm hiệu quả dẫn điện. Ngược lại, từ Bảng 1 có thể thấy sợi CNT có hệ số nhiệt âm, tức là điện trở suất giảm khi nhiệt độ tăng, giúp cải thiện khả năng dẫn điện trong điều kiện nhiệt độ thay đổi. Các vật liệu composite như CNT+Cu và CNT+Al cũng có hệ số nhiệt thấp hơn các kim loại thuần, cho thấy tiềm năng ứng dụng cao trong các thiết bị phải chịu biến đổi nhiệt.

2.2. Ứng dụng vật liệu CNT trong chế tạo thanh dẫn rôto của động cơ LSPMSM

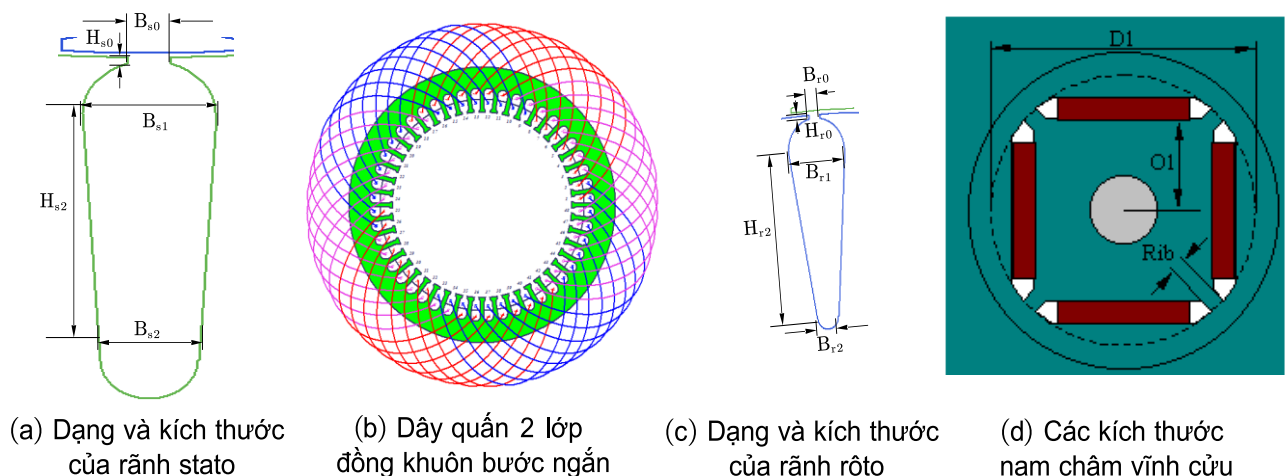
Để đánh giá vật liệu CNT mới so với vật liệu dẫn điện truyền thống trong chế tạo thanh dẫn rôto, nhóm tác giả nghiên cứu sử dụng thông số động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực được trình bày trong Bảng 2, với dữ liệu mô phỏng thu được từ phần mềm Ansys Maxwell.



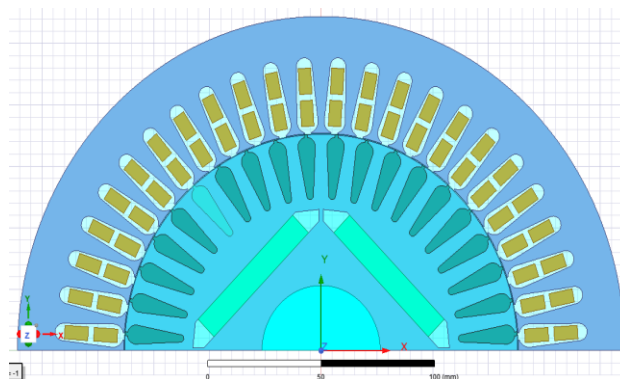
Bảng 2. Thông số thiết kế động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực

Thông số	Giá trị	Đơn vị	Thông số	Giá trị	Đơn vị
Kiểu dây quấn stato	Hai lớp		Công suất định mức	11	kW
Số rãnh stato Z_1	48		Số đôi cực	4	
Đường kính ngoài stato D_n	272	mm	Hệ số ép chặt	0,95	
Đường kính trong stato D	177	mm	Chiều dài stato - rôto	105	mm
Vật liệu làm lõi thép stato	Thép_1008		Số rãnh rôto	40	
Độ mở miệng rãnh stato B_{s0}	3,0	mm	Khe hở không khí	0,1	mm
Chiều rộng tối đa phần trên của rãnh stato B_{s1}	9,5	mm	Tốc độ định mức n_{dm}	1460	vòng/phút
Chiều rộng đáy thân rãnh stato B_{s2}	7,0	mm	Chiều cao vành ngăn mạch	22	mm
Chiều cao miệng rãnh stato H_{s0}	0,4	mm	Bước dây quấn (bước ngắn)	10	
Chiều cao thân rãnh stato H_{s2}	22,5	mm	Đường kính trục rôto	53	mm
Dây dẫn stato	Đồng		Bề rộng vành ngăn mạch	24	mm
Vật liệu làm lõi thép rôto	Thép_1008		Kích thước O1 của NCVC	38	mm
Kích thước D1 của NCVC	115	mm	Loại vật liệu làm NCVC	NdFe35	
Kích thước Rib của NCVC	2	mm	Độ dày của NCVC	10	mm
Chiều rộng của NCVC	60	mm	Chiều cao miệng rãnh rôto H_{r0}	0,5	mm
Đường kính dây bao gồm cách điện d_{cd}	1,828	mm	Chiều rộng tối đa phần trên của rãnh rôto B_{r1}	7,8	mm
Độ mở miệng rãnh rôto B_{r0}	1,5	mm	Chiều cao thân rãnh stato H_{r2}	20,0	mm
Chiều rộng đáy thân rãnh rôto B_{r2}	3,0	mm			

Cấu trúc của stato và rôto của động cơ LSPMSM với hình dạng rãnh và cách quấn dây như minh họa ở Hình 3 và cấu trúc của động cơ được mô tả như Hình 4.



Hình 3. Dạng rãnh và cách quấn dây của stato của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực

**Hình 4. Cấu trúc rôto của mô hình động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực**

Bảng 3 trình bày các thông số kỹ thuật để đánh giá và so sánh giữa vật liệu CNT mới và các vật liệu dẫn điện truyền thống.

Bảng 3. Thông số vật liệu dẫn điện thanh dẫn rôto động cơ LSPMSM trong mô phỏng

Vật liệu	Độ dẫn điện (MS/m)	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Độ dẫn nhiệt (W/m·C)	Nhiệt dung riêng (J/kg·C)
Đồng (Cu)	58,0	8933	400,0	385
Nhôm (Al)	38,0	2689	237,5	951
Nano cacbon đồng (CNT+Cu)	40,0	5200	328,0	385
Nano cacbon nhôm (CNT+Al)	18,4	2700	172,0	951
Nano cacbon vách đơn (SWCNT)	10,0	1300	4000,0	600
Nano cacbon hai vách (DWCNT)	1,0	1000	2000,0	700

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng tính đặc tính làm việc của động cơ LSPMSM công suất 11 kW, 4 cực được tổng hợp trong Bảng 4, khảo sát với các loại vật liệu lồng sóc rôto sau:

Bảng 4. Kết quả thông số của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực với vật liệu thanh dẫn rôto khác nhau

Thông số	Vật liệu chế tạo thanh dẫn rôto					
	Cu	Al	CNT+Cu	CNT+Al	SWCNT	DWCNT
Hiệu suất động cơ (%)	97,378	97,378	97,378	97,378	97,378	97,378
Hệ số công suất	0,9668	0,9668	0,9668	0,9668	0,9668	0,9668
Mô men định mức (Nm)	70,0576	70,0576	70,0576	70,0576	70,0576	70,0576
Dòng điện định mức (A)	16,2616	16,2616	16,2616	16,2616	16,2616	16,2616
Mô men cực đại (Nm)	198,7411	198,7411	197,4468	197,1921	196,7259	121,1751
Mô men khởi động (Nm)	24,9765	37,6436	35,8303	74,0925	122,9420	121,1751
Khối lượng stato và rôto (kg)	51,8937	45,019	47,7839	45,0315	43,4902	43,1599

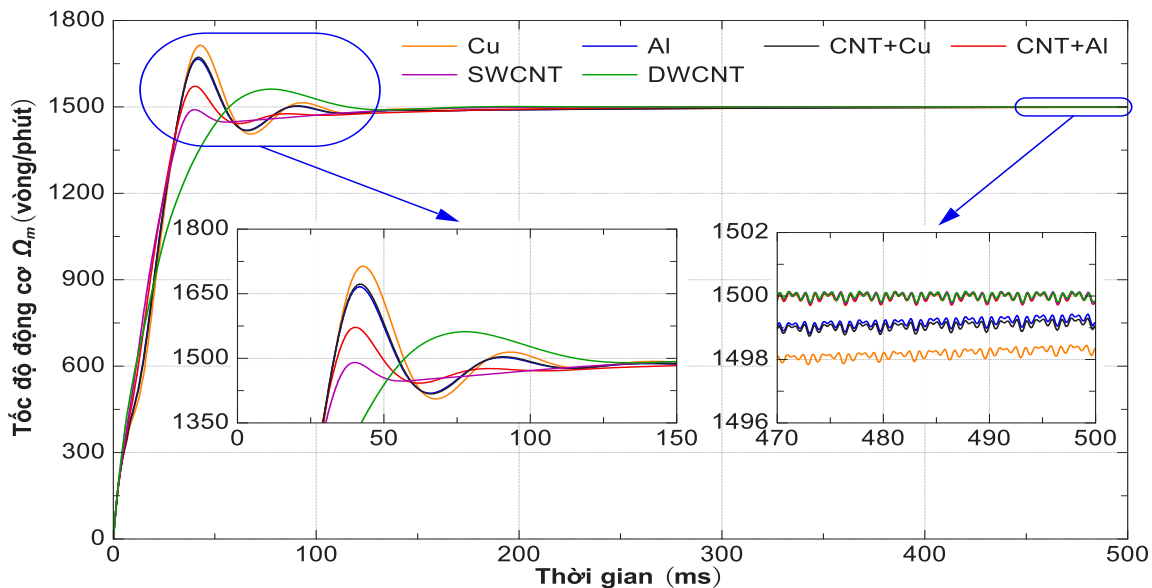
Dựa trên Bảng 4 so sánh các vật liệu thanh dẫn rôto của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực, có thể rút ra một số kết luận quan trọng. Hiệu suất và hệ số công suất của động cơ không bị ảnh hưởng bởi vật liệu sử dụng, luôn đạt 97,378% và 0,9668%. Các vật liệu CNT và kim loại truyền thống như Cu, Al

đều đảm bảo hiệu suất tối ưu. Mô men định mức và dòng điện không thay đổi giữa các vật liệu, cho thấy sự ổn định của động cơ trong chế độ làm việc bình thường. Tuy nhiên, khả năng quá tải và mô men khởi động có sự khác biệt rõ rệt: vật liệu CNT, đặc biệt là SWCNT, mang lại mô men khởi động



vượt trội, thích hợp cho các ứng dụng cần khởi động nhanh như máy bơm, máy nén. Về trọng lượng, CNT nhẹ hơn so với Cu và Al, giúp tối ưu hóa trọng lượng mà không ảnh hưởng đến hiệu suất. Về ưu nhược điểm, Cu thích hợp cho các ứng dụng tải nặng, Al tiết kiệm chi phí nhưng mô men khởi động thấp, trong khi SWCNT và DWCNT thích

hợp cho các ứng dụng đòi hỏi trọng lượng nhẹ và mô men khởi động cao, như drone và xe điện. Tiếp theo, thông qua mô phỏng Ansys Maxwell 2D, sẽ tiến hành đánh giá chi tiết hơn về tốc độ, mô men và đặc tính cơ của động cơ LSPMSM khi sử dụng các vật liệu thanh dẫn rôto khác nhau.



Hình 5. Đồ thị tốc độ động cơ LSPMSM với các vật liệu khác nhau

Để xác thực định lượng hiệu suất của phương pháp được đề xuất, một số chỉ số được sử dụng, bao gồm căn bậc hai của giá trị trung bình bình phương (RMS) [8], độ sai lệch quá mức và sự giảm tốc độ, trong đó N_s là số lượng mẫu:

$$RMS(e) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_s} e^2(i)}{N_s}} \quad (3)$$

Bảng 5. Các thông số kết quả tốc độ của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực với vật liệu khác nhau

Vật liệu	Tốc độ vọt ló (vòng/phút)	Sai số tốc độ ổn định – RMSE (%)	Thời gian khởi động (ms) (đạt 95% tốc độ định mức)	Sai lệch tốc độ ổn định (vòng/phút)
Cu	1714,52	0,1299	73,8	0,8832
Al	1666,62	0,0618	69,4	0,7755
CNT+Cu	1672,65	0,0693	70,1	0,7917
CNT+Al	1571,89	0,0079	31,3	0,4320
SWCNT	1490,25	0,0070	33,3	0,3958
DWCNT	1561,97	0,0063	48,8	0,3672

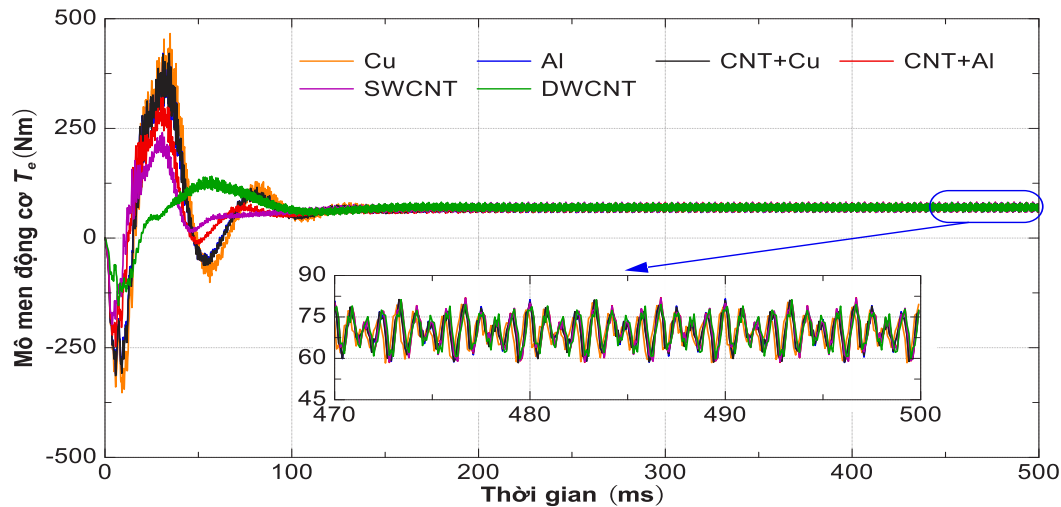
Dựa trên dữ liệu từ Bảng 5 và Hình 5, đặc tính tốc độ của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực có sự khác biệt rõ rệt giữa các vật liệu thanh dẫn rôto. Vật liệu CNT, đặc biệt là SWCNT và DWCNT, giúp giảm hiện tượng vượt ló tốc độ đáng kể so với Cu và Al, mang lại khả năng kiểm soát tốt hơn và vận hành ổn định hơn. Sai số tốc độ ổn định (RMSE)

của các vật liệu CNT cũng thấp hơn nhiều, với DWCNT đạt mức tốt nhất (0,0063%), phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như máy CNC. Ngoài ra, thời gian khởi động được rút ngắn đáng kể khi dùng CNT, với CNT+Al chỉ mất 31,3 ms – nhanh hơn gần 55% so với Cu. Độ lệch tốc độ ổn định cũng thấp hơn ở các mẫu CNT, cho



thấy khả năng duy trì tốc độ gần giá trị định mức một cách hiệu quả. Nhìn chung, CNT cải thiện toàn diện đặc tính tốc độ của động cơ, đặc biệt trong

các ứng dụng cần độ chính xác và khả năng phản hồi nhanh.



Hình 6. Đồ thị mô men động cơ LSPMSM với vật liệu khác nhau

Dựa trên Bảng 6 và Hình 6, mô men động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực khi sử dụng các vật liệu rôto cho thấy sự khác biệt rõ rệt. Đồng (Cu) đạt mô men cực đại cao nhất (466,44 Nm), phù hợp với các ứng dụng yêu cầu mô men tải lớn, trong khi vật liệu CNT – đặc biệt DWCNT (141,22 Nm) – chỉ thích hợp cho tải nhẹ. Sai lệch mô men ổn định (torque ripple) của các vật liệu là tương đương (~21–23 Nm), với DWCNT thấp nhất (21,53 Nm), nhưng không tạo khác biệt đáng kể về độ ổn định trong vận hành liên tục. Về tỷ số mô men cực đại so với

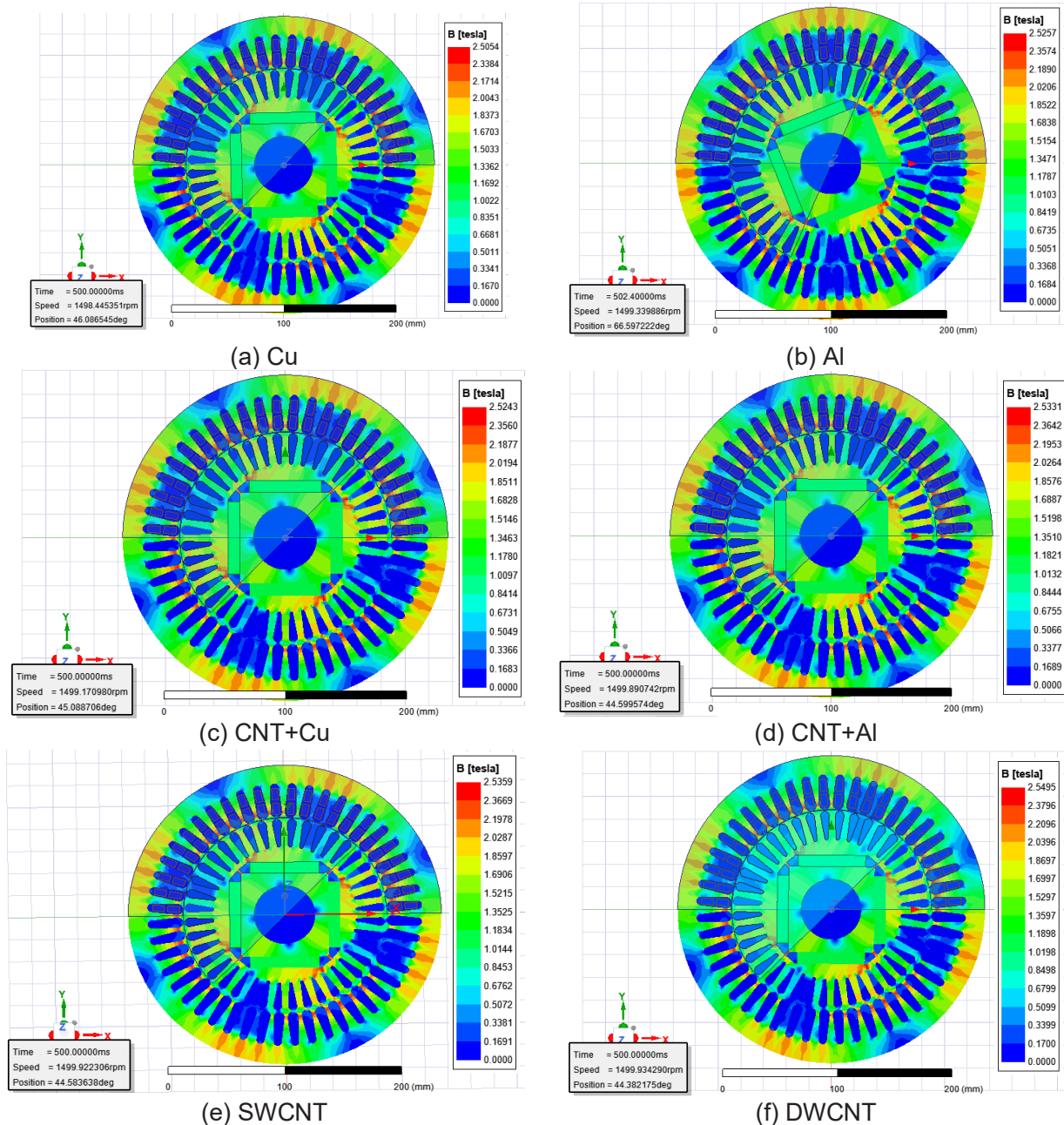
mô men định mức, Cu, Al và CNT+Cu duy trì tỷ số cao (~6.0–6.66), thích hợp cho các ứng dụng cần chịu quá tải ngắn hạn. Ngược lại, CNT+Al, SWCNT và DWCNT có tỷ số thấp hơn (4.58 đến 2.02), cho thấy khả năng chịu tải đột ngột kém. Đáng chú ý, SWCNT và DWCNT dù có mô men khởi động cao ($\geq 122,94$ Nm), lại cho mô men cực đại thấp, phản ánh đặc tính phù hợp cho gia tốc ban đầu nhưng hạn chế ở tải nặng kéo dài – do đặc điểm dẫn điện cao nhưng khả năng tản nhiệt kém.

Bảng 6. Các thông số kết quả mô men của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực với vật liệu khác nhau

Vật liệu	Mô men cực đại (Nm)	Sai lệch mô men ổn định (Nm)	Tỷ số mô men cực đại
Cu	466,44	22,06	6,66
Al	421,31	23,27	6,01
CNT+Cu	421,41	23,06	6,02
CNT+Al	320,55	23,56	4,58
SWCNT	240,79	23,18	3,44
DWCNT	141,22	21,53	2,02

Dựa trên dữ liệu từ thông (B_{total}) trong Hình 7 và tốc độ động cơ trong Hình 5 và mô men trong Hình 6, có thể thấy CNT pha kim loại (CNT+Cu/Al) tạo từ thông đỉnh cao (~2.35–2.36 T), góp phần tạo mô men lớn (421–466 Nm), phù hợp cho tải nặng nhưng đi kèm với dao động tốc độ và tổn hao cao hơn. Ngược lại, vật liệu CNT tinh khiết (SWCNT/DWCNT) có từ thông thấp hơn (~2.1–2.2 T) nhưng ổn định hơn, giúp giảm tổn hao, duy trì

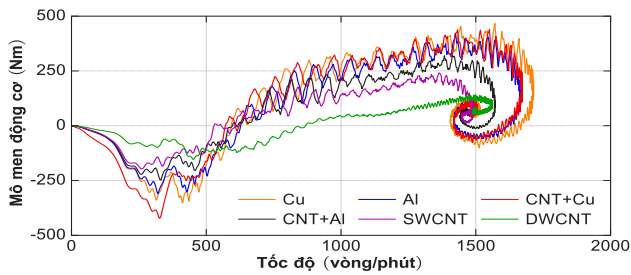
tốc độ ổn định (RMSE ~0.006–0.007%) và kéo dài tuổi thọ động cơ. Do đó, CNT+Cu/Al thích hợp cho máy móc công nghiệp cần mô men cao, còn SWCNT/DWCNT phù hợp cho ứng dụng đòi hỏi độ chính xác và ổn định như robot hoặc xe điện. Hướng nghiên cứu tiếp theo nên tập trung tối ưu hóa cấu trúc CNT để cân bằng giữa từ thông đỉnh và độ ổn định, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến đặc tính từ.



Hình 7. Phân bố mật độ từ thông theo mặt cắt ngang của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực

Dựa trên đồ thị đặc tính cơ trong Hình 8, động cơ LSPMSM sử dụng vật liệu CNT (SWCNT/DWCNT) cho thấy ưu thế rõ rệt trong vùng khởi động (0–300 vòng/phút) với mô men khởi động cao, dao động từ 122 đến 240 Nm. Điều này cho phép động cơ đạt gia tốc nhanh, phù hợp với các ứng dụng cần phản hồi tức thời. Ngược lại, vật liệu truyền thống như Cu và Al chỉ đạt mô men khởi động lần lượt là 24,98 Nm và 37,64 Nm, cho thấy hạn chế trong khả năng tăng tốc ban đầu. Trong vùng làm việc ổn định (~1500 vòng/phút), tất

cả vật liệu đều đạt mô men định mức xấp xỉ 70 Nm. Tuy nhiên, vật liệu CNT, đặc biệt là DWCNT, thể hiện độ dao động mô men thấp hơn đáng kể so với Cu và Al (± 150 Nm so với ± 250 Nm), góp phần nâng cao độ ổn định của hệ thống truyền động. Tại vùng quá tải (>1500 vòng/phút), Cu duy trì được mô men cực đại cao nhất (466,44 Nm), vượt trội so với các vật liệu CNT, trong đó DWCNT chỉ đạt 141,22 Nm. Điều này cho thấy CNT không phù hợp cho các điều kiện làm việc yêu cầu mô men lớn kéo dài hoặc tải nặng.



Hình 8. Đặc tính cơ của động cơ mô phỏng 2D với vật liệu rôto khác nhau

Qua các kết quả trên, có thể nhận thấy Cu là vật liệu phù hợp cho các ứng dụng tải nặng và yêu cầu mô men cực đại cao. Tuy nhiên, khối lượng lớn và khả năng khởi động yếu là những điểm hạn chế. Al là lựa chọn trung gian, nhẹ hơn và có chi phí thấp hơn nhưng khả năng quá tải và độ ổn định kém hơn so với Cu. Các vật liệu CNT+Cu và CNT+Al cung cấp sự cân bằng giữa khả năng khởi động, độ ổn định mô men và hiệu suất tổng thể. Trong đó, CNT+Al có lợi thế về trọng lượng nhẹ và mô men khởi động cao (74,0925 Nm), tuy nhiên mô men cực đại giảm xuống còn 320,55 Nm, giới hạn khả năng chịu tải lớn. Vật liệu SWCNT và DWCNT vượt trội ở khả năng khởi động (≥ 121 Nm), độ ổn định mô men tốt nhất và trọng lượng nhẹ, lý tưởng cho các hệ thống cần đáp ứng nhanh, chính xác. Tuy vậy, khả năng chịu tải cực đại thấp là hạn chế lớn trong các ứng dụng công suất cao.

Vật liệu CNT, đặc biệt là SWCNT và DWCNT, được đánh giá cao nhờ khả năng khởi động nhanh, dao động mô men thấp và hiệu suất vận hành ổn định trong điều kiện tải biến thiên. Điều này làm cho CNT đặc biệt phù hợp với các hệ thống tải nhẹ như quạt gió, bơm nước hay máy nén nhỏ, nơi yêu cầu tốc độ phản hồi nhanh và vận hành êm ái. Ngược lại, Cu và Al vẫn là lựa chọn hợp lý trong các ứng dụng công nghiệp truyền thống như máy nghiền, máy nén lớn hoặc băng tải, nơi ưu tiên khả

năng chịu tải lớn, vận hành bền bỉ và chi phí đầu tư thấp.

Việc lựa chọn vật liệu rôto cần dựa trên sự cân nhắc giữa hiệu suất mô men, khả năng chịu tải, độ ổn định tốc độ và chi phí. Với vật liệu CNT, cần đánh giá kỹ khả năng tản nhiệt và tuổi thọ vận hành trong điều kiện làm việc kéo dài hoặc môi trường khắc nghiệt. Trong khi đó, Cu và Al vẫn phù hợp với các hệ thống không yêu cầu độ chính xác quá cao nhưng cần độ tin cậy dài hạn.

4. KẾT LUẬN

➤ Phân tích đặc tính cơ và điện của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực cho thấy vật liệu CNT, đặc biệt SWCNT/DWCNT, mang lại ưu thế rõ rệt trong các ứng dụng yêu cầu khởi động nhanh, ổn định tốc độ và trọng lượng nhẹ. SWCNT đạt mô men khởi động lên tới 122,94 Nm – gấp 5 lần Cu, sai số tốc độ (RMSE) chỉ khoảng 0,007%, đồng thời dao động mô men thấp nhất. Trong khi đó, các vật liệu truyền thống như Cu và Al vẫn phù hợp với tải nặng nhờ mô men cực đại cao và chi phí thấp, nhưng hạn chế về khả năng khởi động và độ ổn định tốc độ. Vật liệu lai CNT-Cu/Al cung cấp giải pháp cân bằng, vừa duy trì khả năng chịu tải tốt, vừa cải thiện độ ổn định và phản hồi tốc độ;

➤ Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào tối ưu hóa đặc tính tản nhiệt và cấu trúc vật liệu CNT, bao gồm tỷ lệ pha trộn với kim loại và ảnh hưởng của kích thước ống nano, đồng thời phát triển công nghệ sản xuất CNT quy mô lớn để giảm chi phí. Việc ứng dụng CNT không chỉ cho rôto mà còn cho dây dẫn stato trong các loại động cơ khác nhau được xem là bước quan trọng hướng tới phát triển động cơ hiệu suất cao, tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường, phù hợp với xu hướng công nghiệp 4.0 và các mục tiêu giảm phát thải □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Jankowska, K., Gwoździewicz, M. and Dybkowski, M. "Application of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor in Converter Drive System with Increased Safety Level". *Electronics*, vol. 14, no. 9, pp. 1787, 2025, doi:10.3390/electronics14091787.
- [2] Özsoy, M., Kaplan, O. and Akar, M. "FEM-based analysis of rotor cage material and slot geometry on double air gap axial flux induction motors". *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 102393, 2024, doi:10.1016/j.asej.2023.102393.
- [3] Zhao, C., Zhao, H., Li, J., Zhang, X., Ruan, Y. and Wang, H. "Aluminum Windings and Their Manufacturing Technologies in Electrical Machines: A Review". In *2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Fukuoka, Japan, 2024, pp. 1523-1530, doi:10.23919/ICEMS60997.2024.10921067.
- [4] Popescu, M., Di Leonardo, L., Fabri, G., Volpe, G., Riviere, N. and Villani, M. "Design of induction motors with flat wires and copper rotor for E-vehicles traction system". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 3889-3900, 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3256391.



- [5] Sivasubramaniyam, V., Ramasamy, S., Venkatraman, M., Gatto, G. and Kumar, A. "Carbon nanotubes as an alternative to copper wires in electrical machines: A review". *Energies*, vol. 16, no. 9, pp. 3665, 2023, doi:10.3390/en16093665.
- [6] Zhang, F., Gerada, D., Xu, Z., He, Y., Zhang, H. and Hua, W. and et al. "Performance entitlement by using novel high strength electrical steels and copper alloys for high-speed laminated rotor induction machines". *Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 210, 2022, doi:10.3390/electronics11020210.
- [7] Klimov, A. V., Ryabtsev, F. A., Anisimov, V. R., Akulov, A. A. and Klimenko, V. A. "Analysis of the Tendentious Developing of the New Materials Used in the Production of Traction Electric Motors". In *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1-5, doi: 0.1109/TIRVED53476.2021.9639131.
- [8] Seryasat, O. R., Honarvar, F. and Rahmani, A. "Multi-fault diagnosis of ball bearing using FFT, wavelet energy entropy mean and root mean square (RMS)". In *2010 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 4295-4299, doi: 10.1109/ICSMC.2010.5642389.

RESEARCH ON APPLICATION OF NANO CARBON MATERIALS IN FABRICATING ROTOR BARS FOR LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS RESEARCH ON

Thanh Tuyen Tran¹, Huu Phuc Tran^{2,*}, Thi Thuong Duyen Nguyen¹, Thi Bich Thuy Doan¹

¹ Quang Ninh University of Industry, Mao Khe W., Quang Ninh, Viet Nam

² East Asia University of Technology, Phan Tay Nhac, Ha Noi, Viet Nam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 08/4/2026

Revised: 05/5/2026

Accepted: 10/5/2026

^{2,*} Corresponding author:

Email: phucth@eaut.edu.vn

ABSTRACT

The line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) is capable of direct grid-starting while maintaining high efficiency and power factor. In the rotor design of LSPMSMs, the conductor material plays a critical role in starting performance, torque ripple, and overall weight. Traditionally, aluminum (Al) and copper (Cu) have been widely used; however, they still face limitations in terms of weight, resistivity, and thermal load capacity. This paper evaluates the potential of carbon nanotube (CNT) materials for rotor conductor fabrication. CNTs exhibit high electrical conductivity, low mass, high current-carrying capability, and a negative temperature coefficient, which contribute to improved electrical performance, reduced weight, and enhanced speed stability. The authors conducted simulations on an 11 kW, 4-pole LSPMSM to compare the performance of traditional conductor materials (Cu, Al) with CNT-based materials, focusing on metrics such as torque, speed stability, and starting capability. The results demonstrate that CNTs are promising materials for enhancing the efficiency and stability of next-generation LSPMSMs, while also enabling the development of high-performance, lightweight, and environmentally friendly electric motors.

Keywords: Line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM), carbon nanotube (CNT), rotor bar, Ansys Maxwell software

@ Vietnam Mining Science and Technology Association