

ĐÁNH GIÁ CÁC LOẠI VẬT LIỆU CHẾ TẠO THANH DẪN TRONG ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ: HIỆN TRẠNG VÀ XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Nguyễn Thị Thương Duyên^{1*}, Trần Thanh Tuyền^{1,2},

Phạm Anh Mai¹

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

²Đại học Trung Nam, Hồ Nam, Trung Quốc

*Email: phanlinh.dhm@gmail.com

TÓM TẮT

Động cơ không đồng bộ (KĐB) là một trong những động cơ quan trọng trong các ứng dụng công nghiệp và dân dụng, đặc biệt trong các hệ thống truyền động. Một trong những yếu tố quyết định hiệu suất của động cơ là vật liệu chế tạo thanh dẫn, đặc biệt là các vật liệu sử dụng cho rôto. Việc lựa chọn và cải tiến vật liệu thanh dẫn không chỉ ảnh hưởng đến khả năng dẫn điện mà còn tác động đến việc giảm tổn thất năng lượng, tối ưu hóa hiệu suất và nâng cao tuổi thọ của động cơ. Bài báo này đánh giá các vật liệu dẫn điện truyền thống như đồng và nhôm, đồng thời tìm hiểu các vật liệu thay thế tiên tiến, bao gồm hợp kim nhôm, hợp kim đồng và vật liệu nano cacbon (CNT). Mục tiêu là cung cấp cái nhìn sâu sắc về xu hướng phát triển các vật liệu dẫn điện mới trong nghiên cứu và ứng dụng, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về hiệu suất và độ tin cậy của động cơ trong các ngành công nghiệp hiện đại.

Từ khóa: Động cơ không đồng bộ (KĐB), vật liệu nano cacbon, thanh dẫn rôto, đồng và hợp kim đồng, nhôm và hợp kim nhôm, công nghệ chế tạo động cơ.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ không đồng bộ (KĐB) là một trong những loại động cơ phổ biến nhất trong công nghiệp nhờ vào cấu trúc đơn giản, độ bền cao và khả năng vận hành hiệu quả ở dải tốc độ trung bình. Tuy nhiên, với sự phát triển nhanh chóng của các ứng dụng hiện đại, đặc biệt là trong lĩnh vực xe điện và các hệ thống tốc độ cao, những hạn chế về khả năng chịu lực và tốc độ quay của động cơ rôto lồng sóc trở nên rõ ràng. Các yếu tố như tốc độ quay lớn và giới hạn vật liệu đã đặt ra những thách thức đối với thiết kế và hiệu suất của rôto. Những thách thức này đòi hỏi các nhà nghiên cứu và nhà sản xuất phải tìm ra các giải pháp tối ưu về vật liệu và công nghệ chế tạo, nhằm nâng cao độ bền cơ học, hiệu quả vận hành và khả năng ứng dụng của động cơ không đồng bộ trong môi trường hiện đại đầy khắc khe.

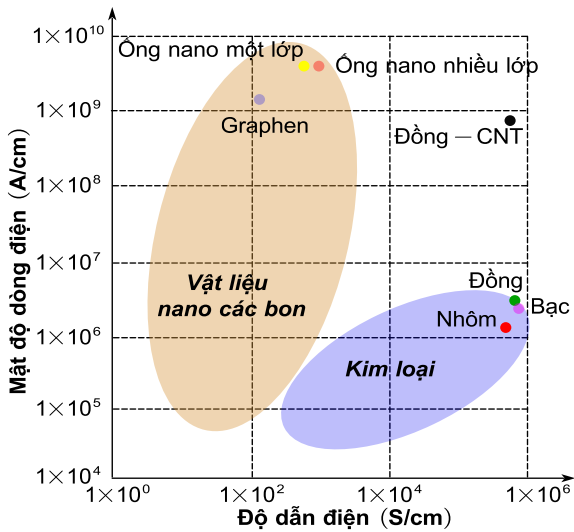
Để đáp ứng các yêu cầu này, một yếu tố quan trọng không thể bỏ qua là vật liệu chế tạo thanh dẫn, đặc biệt là vật liệu sử dụng cho rôto. Các vật liệu thanh dẫn truyền thống như đồng

và nhôm đã được sử dụng rộng rãi trong động cơ KĐB, nhưng sự phát triển nhanh chóng của các công nghệ hiện đại yêu cầu phải tìm kiếm các vật liệu tiên tiến hơn. Các vật liệu mới như hợp kim nhôm, hợp kim đồng và vật liệu nano cacbon (CNT) có thể cung cấp những cải tiến đáng kể về khả năng dẫn điện nâng cao hiệu suất của động cơ. Bài báo này sẽ đánh giá và so sánh các vật liệu thanh dẫn truyền thống và tiên tiến, nhằm tìm ra giải pháp tối ưu cho việc chế tạo động cơ KĐB, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về hiệu suất và độ tin cậy trong các ứng dụng hiện nay.

2. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU CHẾ TẠO THANH DẪN TRONG ĐỘNG CƠ ĐIỆN

Dây quấn động cơ thường được làm từ dây đồng. Mặc dù đồng có độ dẫn điện rất cao, nhưng độ dẫn điện của nó giảm theo nhiệt độ và tương đối nặng. Người ta dự đoán rằng trong tương lai, các vật liệu mới có độ dẫn điện cao, điện trở thấp và khối lượng riêng thấp sẽ được sử dụng trong các cuộn dây. Hình 1 cho thấy các tính chất của một số vật liệu được sử dụng

trong cuộn dây [1].



Hình 1. Đặc điểm của vật liệu dẫn điện trong dây quấn

Hiện nay, nghiên cứu đang tìm kiếm vật liệu dẫn điện có độ dẫn cao hơn đồng ở nhiệt độ môi trường. Việc sử dụng vật liệu siêu dẫn bị hạn chế do yêu cầu nhiệt độ thấp, không khả thi cho động cơ điện. Một lựa chọn tiềm năng là dây dẫn ống nano cacbon (CNT), với mật độ dòng điện tăng gấp 1000 lần và mật độ vật liệu giảm 8 lần, cải thiện đáng kể hiệu suất. CNT đã đạt 71% độ dẫn điện so với đồng, có thể thay thế đồng trong tương lai. Ở Việt Nam, có nhiều tài liệu nghiên cứu về vật liệu CNT [2-3], các vật liệu lai giữa CNT và các vật liệu khác được ứng dụng chế tạo các trong nhiều lĩnh vực mới như vật liệu điện tử, vật liệu hấp thụ, vật liệu dẫn điện,... Dự kiến trong 15 năm tới, trọng lượng cuộn dây sẽ giảm 84% và điện trở giảm xuống mức của đồng. Hình 2 minh họa cấu trúc vật liệu dẫn điện CNT.



Hình 2. Cấu trúc của ống nano cacbon

3. CÁC LOẠI VẬT LIỆU CHẾ TẠO THANH DẪN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

3.1. Nhôm và hợp kim nhôm

3.1.1. Nhôm nguyên chất

Nhôm và các hợp kim nhôm được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nhờ các ưu điểm vượt trội như vẻ ngoài đẹp mắt, trọng lượng nhẹ, tính chảy lỏng cao, khả năng đúc và gia công dễ dàng, khả năng hàn tốt, cùng với các đặc tính vật lý, cơ học và khả năng chống ăn mòn, chống rách nóng ấn tượng. Đặc biệt, nhôm thường được ưu tiên trong sản xuất rôto lồng sóc nhờ chi phí thấp và tính gia công thuận lợi (Hình 3). Tuy nhiên, so với các vật liệu khác như đồng, nhôm vẫn tồn tại một số hạn chế về hiệu suất.



Hình 3. Thanh dẫn rôto lồng sóc động cơ điện đúc bằng nhôm nguyên chất

3.1.2. Hợp kim nhôm

Hợp kim nhôm được phân thành hai nhóm chính: hợp kim rèn và hợp kim đúc, với hệ thống phân loại riêng do Hiệp hội Nhôm (AA) xây dựng (Bảng 1) [4]. Hợp kim rèn dùng hệ thống bốn chữ số để xác định nguyên tố chính, sửa đổi và nhận dạng hợp kim. Các hợp kim nhôm dùng để đúc thanh dẫn lồng sóc trong rôto động cơ điện thường là nhôm tinh khiết cao (1xx.x) và hợp kim nhôm chứa silicon (4xx.x). Nhôm tinh khiết cao (1xx.x) được ưa chuộng nhờ vào độ dẫn điện cao, giúp tối ưu hóa hiệu suất điện từ của thanh dẫn, đồng thời có khả năng chống ăn mòn tốt, đảm bảo độ bền lâu dài trong môi trường làm việc. Mặt khác, hợp kim nhôm chứa silicon (4xx.x) lại có ưu điểm về tính chảy lỏng, giúp dễ dàng đúc các thanh dẫn với hình dạng phức tạp,

đồng thời cải thiện tính chống mài mòn và khả năng chống ăn mòn. Tuy nhiên, hợp kim nhôm chứa silicon vẫn duy trì được độ dẫn điện hợp lý, phù hợp cho các ứng dụng động cơ điện yêu cầu kết hợp giữa tính cơ học tốt và khả năng đúc dễ dàng.

Bảng 1. Hệ thống phân loại hợp kim nhôm đúc

Các loại hợp kim Nhôm	Nguyên tố hợp kim chính
1xx.xx	Nhôm nguyên chất ($\geq 99\%$)
2xx.xx	Đồng
3xx.xx	Silicon, đồng và magie
4xx.xx	Silicon
5xx.xx	Magie
6xx.xx	Không sử dụng
7xx.xx	Kẽm
8xx.xx	Thiếc
9xx.xx	Loại khác

3.2. Đồng và hợp kim đồng

3.2.1. Đồng nguyên chất

Vi khả năng dẫn điện của đồng cao gấp 1.5 lần hoặc hơn so với nhôm, việc sử dụng rôto đúc đồng thay vì đúc nhôm đã được biết đến là cải thiện hiệu suất của động cơ không đồng bộ (KĐB). Trong quá trình đúc đồng, chi phí sản xuất vẫn cao do các khó khăn kỹ thuật, do nhiệt độ nóng chảy cao của đồng. Tuy nhiên, công nghệ đúc đồng gần đây đã có sự cải thiện, giúp có thể áp dụng không chỉ cho các sản phẩm nguyên mẫu mà còn cho việc sản xuất hàng loạt.



Hình 4. Thanh dẫn rôto lồng sóc động cơ điện đúc bằng đồng nguyên chất [5]

Rôto đúc đồng [5] và thanh đồng gia công là lựa chọn tốt nhất để tối đa hóa hiệu suất nhờ

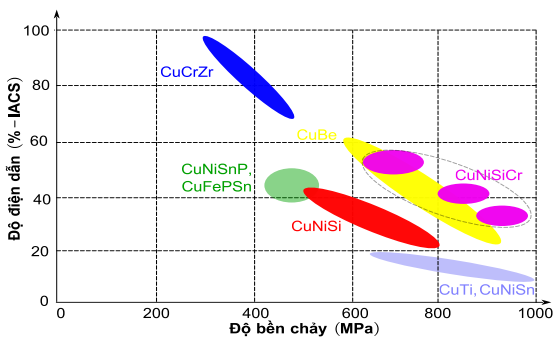
khả năng dẫn điện cao, nhưng mô-men khởi động của chúng lại thấp hơn so với rôto nhôm, gây ra sự đánh đổi giữa hiệu suất và mô-men khởi động. Rôto đồng có tính linh hoạt trong thiết kế cao hơn, cho phép thay đổi điện trở của thanh rôto mà không cần thay đổi công cụ. Tuy nhiên, thanh đồng nặng hơn nhôm khoảng ba lần, đòi hỏi các lớp cách điện phải đủ bền và chi phí gia công cùng vật liệu đồng cao hơn đáng kể.

Thanh đồng có dung lượng nhiệt vượt trội so với thanh nhôm, giúp chịu được tải quán tính cao và các lần khởi động lại tốt hơn, do thanh nhôm dễ bị nóng hơn và sinh ra ứng suất cao hơn. Với động cơ nhỏ, rôto nhôm đúc là lựa chọn tối ưu nhờ chi phí thấp và hiệu suất hợp lý, trong khi rôto đồng đúc và thanh nhôm gia công là lựa chọn thứ hai. Thanh đồng gia công tuy tốt nhất về hiệu suất nhưng yêu cầu chi phí cao nhất.

Đúc đồng rôto tuy mang lại hiệu suất cao, nhưng cũng đi kèm với một số nhược điểm đáng kể. Đầu tiên, chi phí sản xuất cao hơn nhiều so với nhôm, do đồng có giá thành đắt và yêu cầu thiết bị chịu nhiệt cao để xử lý nhiệt độ nóng chảy lên tới 1085°C . Điều này không chỉ làm tăng chi phí đầu tư ban đầu mà còn tiêu tốn nhiều năng lượng. Bên cạnh đó, mật độ cao của đồng khiến rôto nặng hơn, gây ra ứng suất lớn trên các bộ phận quay và yêu cầu vật liệu chế tạo phải có độ bền cơ học cao hơn. Ngoài ra, khả năng sản xuất hàng loạt của đúc đồng còn hạn chế, đặc biệt với các rôto có hình dạng phức tạp, dẫn đến chi phí sản xuất cao hơn. Một nhược điểm kỹ thuật khác là mô-men khởi động của rôto đồng thấp hơn so với rôto nhôm, gây khó khăn trong một số ứng dụng yêu cầu khả năng khởi động mạnh mẽ. Hơn nữa, trong các điều kiện tải quán tính lớn hoặc khởi động lại nhiều lần, thanh dẫn đồng có thể chịu ứng suất nhiệt cao, đòi hỏi thiết kế rôto phải đảm bảo đủ độ bền. Những yếu tố này khiến đúc đồng rôto phù hợp hơn với các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao, nhưng không lý tưởng cho các ứng dụng tiêu chuẩn hoặc giá thành thấp.

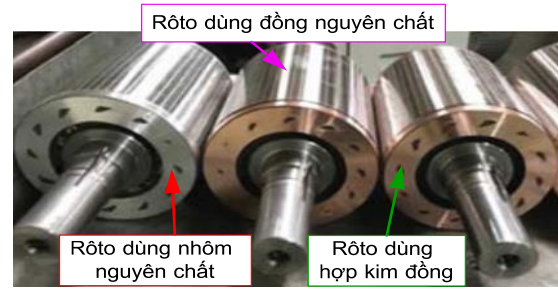
3.2.2. Hợp kim đồng

Việc lựa chọn vật liệu cho lồng rôto của các máy cảm ứng tốc độ cao đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng. Đồng nguyên chất thường không được sử dụng do có độ bền chảy thấp hơn và dễ mềm ở nhiệt độ cao. Các loại hợp kim đồng khác nhau có thể được cân nhắc, như minh họa trong Hình 5. Tuy nhiên, nhìn chung, hợp kim càng mạnh thì độ dẫn điện của hợp kim đồng càng giảm, dẫn đến tổn thất năng lượng tăng lên. Đối với động cơ KĐB, tổn thất trong rôto khó được giải tỏa hơn. Các động cơ thương mại thường sử dụng các hợp kim như CuAl_2O_3 , CuCr và CuZr , với độ bền chảy khoảng 400–450 MPa [6].



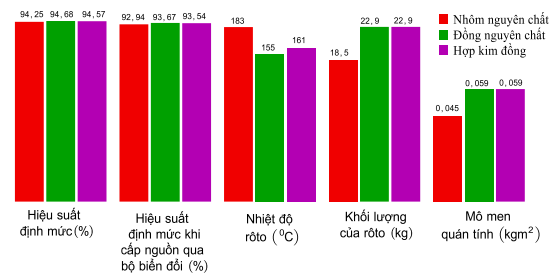
Hình 5. Đặc điểm của các hợp kim đồng [1]

Để đạt được độ bền cao hơn, trên 700 MPa, vật liệu được lựa chọn truyền thống là CuBe (hợp kim đồng-beryllium); tuy nhiên, việc sử dụng hợp kim này rất khó khăn do Beryllium là một chất gây ung thư và việc sử dụng cũng như gia công hợp kim này chỉ được phép trong các điều kiện đặc biệt với mức độ bảo vệ cao cho những người tiếp xúc gần. Một sự phát triển mới là các hợp kim Colson (CuNiSiCr), đạt được hiệu suất tương tự như CuBe nhưng không sử dụng Beryllium, giúp dễ dàng áp dụng trong môi trường sản xuất hàng loạt. Các nghiên cứu có xu hướng tìm cách nâng cao hiệu suất của các hợp kim này, với độ bền vượt quá 900 MPa và độ dẫn điện trên 70% IACS (Tiêu chuẩn Đồng Nung Quốc tế).



Hình 6. Mô hình rôto động cơ KĐB với thanh dẫn dùng các vật liệu khác nhau

Để đánh giá ưu nhược điểm của rôto đúc nhôm, đúc đồng và hợp kim, ta có thể dựa theo mô hình thực nghiệm (Hình 6) với các loại rôto [7] và kết quả như Hình 7 dưới đây:



Hình 7. So sánh các kết quả kỹ thuật thực nghiệm động cơ khi dùng các rôto với thanh dẫn khác nhau

Thông qua kết quả Hình 7 có thể thấy rôto động cơ sử dụng vật liệu đồng và hợp kim đồng cải thiện được hiệu suất của động cơ, giảm được nhiệt độ làm việc của rôto. Tuy nhiên làm khối lượng tăng lên đồng thời mô-men quán tính của động cơ cũng tăng. Ngoài ra, khi dùng hợp kim đồng thì chất lượng động cơ cũng cải thiện hiệu suất hơn sử dụng đồng.

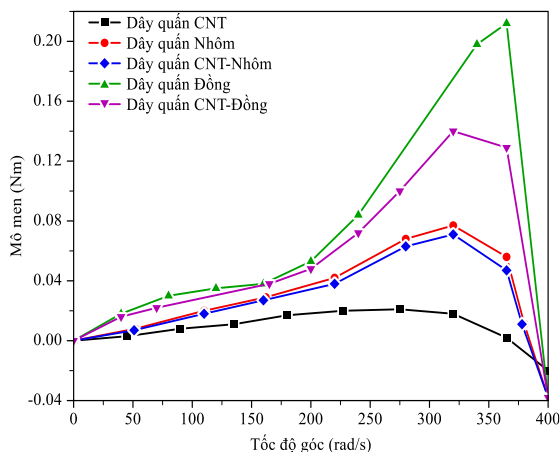
3.3. Vật liệu CNT

Vật liệu CNT có thể đại diện cho thế hệ dây dẫn cực kỳ dẫn điện tiếp theo, với ưu điểm nhẹ, có tính chất cơ học cao và hiệu ứng bề mặt nhỏ. Các ống nano cacbon đã thu hút rất nhiều sự quan tâm kể từ phát minh đột phá của Iijima vào năm 1991 nhờ vào các đặc tính cơ học, điện và nhiệt đáng chú ý của chúng.

Những tiến bộ công nghệ gần đây trong vật liệu nano đã mở ra những khả năng mới cho việc ứng dụng sợi CNT ở quy mô vĩ mô. Với giá trị lên đến 100 MS/m đo được trên từng sợi CNT, vật liệu sợi CNT hứa hẹn có khả năng dẫn điện vượt trội so với các kim loại. Sợi CNT nhẹ, mạnh mẽ và có khả năng dẫn điện cao cuối

cùng đã có thể đạt được, có thể thay thế đồng như một vật liệu quấn dây tiềm năng. Mặc dù hiện tại sợi CNT chưa đạt được độ điện trở thấp như đồng, nhưng những sợi CNT mới nhất hiện nay mang đến những triển vọng hấp dẫn cho việc cải thiện hiệu suất của các máy điện.

Các sợi CNT và hợp kim kim loại/CNT, giống như các dây kim loại thông thường, đã đạt được các đặc tính điện tương đương với các kim loại tương ứng. Những vật liệu thay thế đồng và nhôm tiềm năng bao gồm vật liệu CNT và các hợp kim kim loại/CNT, ví dụ như hợp kim nano cacbon nhôm (CNT–Nhôm) và nano cacbon đồng (CNT–Đồng). Các vật liệu này có nhiều ưu điểm, bao gồm giảm trọng lượng, đặc tính cơ học cao, khả năng cảm biến, khả năng chịu điều kiện khắc nghiệt và dẫn điện cũng như dẫn nhiệt tốt. Các vật liệu CNT có thể giúp các ngành hàng không vũ trụ, hàng hải và ô tô nâng cao chất lượng các dây dẫn cho điện, viễn thông, cảm biến, động cơ và máy phát điện.



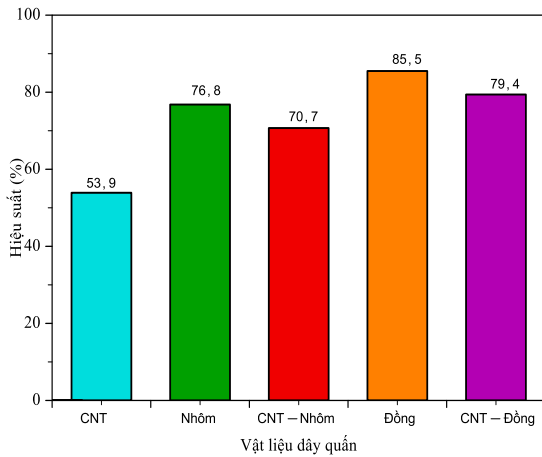
Hình 8. Đặc tính cơ của động cơ KĐB với các thanh dẫn có vật liệu khác nhau

Đã có các nghiên cứu về việc thay thế dây quấn đồng bằng sợi CNT trong một máy biến áp. Các thử nghiệm tải và mạch hở cho thấy máy biến áp sử dụng dây CNT có các đặc tính phù hợp với lý thuyết máy biến áp điện. Cuộn dây của máy biến áp hoạt động hiệu quả trên một phạm vi tần số rộng. Một nguyên mẫu động cơ CNT cũng đã được phát triển bằng cách thay thế cuộn dây đồng bằng sợi CNT nhẹ. Các sợi CNT được phủ một lớp cách điện mỏng PVA để tránh hiện tượng chập mạch. Kết quả cho thấy động cơ hoạt động tốt với điện áp áp dụng 6V.

Một nghiên cứu số đã được thực hiện để tìm phân bố nhiệt trong động cơ KĐB ba pha bằng cách thay thế các vật liệu nano mới. Các vật liệu nano CNT cho việc tản nhiệt trong cuộn dây động cơ điện được tìm thấy là một sự thay thế khả thi và hiệu quả cho các vật liệu truyền thống. Thêm vào đó, một mô hình máy điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu đã được phát triển bằng cách thay thế cuộn dây đồng bằng dây CNT. Các sợi CNT có độ dẫn điện 3,4 MS/m đã được sử dụng và đạt hiệu suất 69%. Tuy nhiên, chưa có phần mềm tính toán đáng tin cậy và nhanh chóng cho việc thiết kế máy điện với các vật liệu nano dựa trên cacbon. Ngoài sợi CNT, việc xử lý các hợp kim CNT dựa trên kim loại như hợp kim CNT - Nhôm và hợp kim CNT-Đồng trong ứng dụng quấn dây vẫn còn là một thách thức. Thiết kế một máy điện như động cơ KĐB với các vật liệu mới cần yêu cầu tối ưu hiệu suất điện, trọng lượng và ước tính tiềm năng của các vật liệu mới trong ứng dụng quấn dây động cơ.

Trong nghiên cứu [7], tác giả đã mô phỏng và đánh giá so sánh hiệu quả của các vật liệu truyền thống so với CNT. Trong bài báo này, tác giả sử dụng vật liệu nhôm, đồng và các vật liệu CNT ở cả các dây dẫn stato và thanh dẫn rôto.

Ảnh hưởng của các vật liệu dẫn điện truyền thống và vật liệu tiên tiến đối với mô-men được trình bày trong Hình 8. Kết quả cho thấy việc tăng độ dẫn điện của vật liệu rôto và stato làm cho điểm mô-men làm việc gần hơn với tốc độ đồng bộ và khoảng tuyến tính trở nên dốc hơn. Có thể thấy rằng trong khoảng tốc độ góc của rôto từ 160 đến 320 rad/s, mô-men xoắn tăng lên và sau đó giảm từ 320 đến 400 rad/s. Đối với các cuộn dây vật liệu có độ dẫn điện cao hơn, giá trị mô-men cực đại được cải thiện. Trong khoảng tuyến tính của động cơ KĐB, việc cải thiện độ dẫn điện của rôto và stato có thể giúp động cơ duy trì mô men định mức với hệ số trượt nhỏ nhất.



Hình 9. Hiệu suất của động cơ KĐB với các thanh dẫn có vật liệu khác nhau

Tại tốc độ góc 360 và 320 rad/s, sự gia tăng mô-men đạt giá trị cực đại, lần lượt là 0,14 và 0,22 đối với động cơ có dây quấn bằng đồng và CNT-Đồng và thấp nhất đối với dây quấn CNT và CNT-Nhôm. Do đó, động cơ KĐB sử dụng dây quấn hợp kim CNT- Đồng tốt hơn dây quấn CNT-Nhôm vì mô-men phụ thuộc vào độ dẫn điện của vật liệu.

Hình 9 so sánh hiệu suất của tất cả các mô hình động cơ KĐB sử dụng các vật liệu dẫn điện khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng động cơ KĐB sử dụng dây quấn CNT-Đồng có hiệu suất cao hơn

so với các vật liệu khác, ngoại trừ động cơ KĐB sử dụng dây quấn đồng.

4. XU HƯỚNG CÔNG NGHỆ VẬT LIỆU NANO CACBON MỚI

Một ứng dụng tiềm năng khác của CNT và hợp kim CNT là dây cáp truyền tải, có thể truyền tải điện từ nhà máy đến hộ tiêu thụ hoặc được sử dụng trong các thiết bị điện. Vật liệu CNT [8] có nhiều lợi ích so với dây đồng truyền thống, bao gồm khả năng ổn định môi trường, có thể chịu được các điều kiện khắc nghiệt như áp suất cao và sự thay đổi nhiệt độ đột ngột, cũng như khả năng dẫn điện cực kỳ cao lên đến 10⁸ S/m đối với CNT đơn vách (SWCNT), vượt trội hơn cả đồng. Các CNT đơn vách có mật độ 1.3 g/cm³, trong khi CNT đa vách có mật độ 2.1 g/cm³ và với độ cứng dao động từ 1.0 TPa đến 50 GPa, vật liệu này sở hữu các đặc tính cơ học và nhiệt đặc biệt. Gần đây, CNT đã trở thành vật liệu nổi bật trong thế kỷ mới và được xem xét cho các ứng dụng từ các cấu trúc khổng lồ trong ô tô đến các sản phẩm điện tử ở quy mô nano. Dây CNT cũng đang nổi lên như một ứng cử viên đầy hứa hẹn cho việc sử dụng làm cảm biến điện tử, bộ truyền động và thu năng lượng.

Bảng 2. So sánh các tiêu chí và xu thế nghiên cứu của các CNT và kim loại thông thường

Tiêu chí	Nhôm	Hợp kim nhôm	Đồng	Hợp kim đồng	CNT thường	CNT - Nhôm	CNT – Đồng
Dẫn điện	Khá tốt	Tốt	Rất tốt	Tốt	Kém	Kém	Tốt
Chịu nhiệt	Trung bình	Tốt	Tốt	Tốt	Kém	Trung bình	Tốt
Chống ăn mòn	Cao	Trung bình	Cao	Cao	Thấp	Thấp	Rất cao
Cơ học	Trung bình	Tốt	Tốt	Tốt	Kém	Kém	Tốt
Trọng lượng	Rất nhẹ	Nhẹ	Trung bình	Trung bình	Rất nhẹ	Rất nhẹ	Rất nhẹ
Chi phí sản xuất	Thấp	Thấp	Cao	Cao	Rất thấp	Thấp	Cao
Gia công	Tốt	Tốt	Tốt	Trung bình	Khó	Khó	Trung bình
Chịu mài mòn	Kém	Trung bình	Tốt	Tốt	Rất kém	Kém	Rất tốt
Ổn định lâu dài	Trung bình	Tốt	Tốt	Tốt	Rất kém	Kém	Tốt
Chế tạo thanh dẫn động cơ	Chủ yếu dùng trong động cơ ít yêu cầu về hiệu suất	Tốt, sử dụng trong động cơ nhẹ, yêu cầu tiết kiệm chi phí	Rất phổ biến, là vật liệu lý tưởng cho dây dẫn động cơ	Tốt, trong động cơ yêu cầu chịu nhiệt, chống mài mòn	Không phù hợp làm dây dẫn trong động cơ	Ít sử dụng, tính ổn định không cao, dẫn điện kém	Ứng dụng trong động cơ yêu cầu nhẹ và hiệu suất cao
Xu hướng phát triển	Nghiên cứu cải thiện hiệu suất dẫn điện	Nghiên cứu cải thiện khả năng dẫn điện	Ứng dụng trong các động cơ hiệu suất cao	Cải thiện chi phí sản xuất và khả năng gia công	Đang trong giai đoạn thử nghiệm và nghiên cứu	Tiềm năng trong lĩnh vực ứng dụng nhẹ, đang nghiên cứu cải thiện dẫn điện	Tiềm năng lớn, đang nghiên cứu giảm giá thành và cải thiện khả năng gia công

Các hợp kim từ CNT có nhiều lợi ích, bao gồm độ bền và mô-đun cao đi kèm với mật độ thấp và trọng lượng nhẹ. Tuy nhiên, chúng

thường có khả năng dẫn điện hạn chế. Dẫn điện của sợi CNT dao động từ 10 đến 67,000 S/cm, tùy thuộc vào vật liệu sử dụng và các phân tử

hay hợp chất hóa học lạ trong sợi. Độ dẫn nhiệt dao động từ 5 đến 1230 W/mK và mật độ từ 0.28 đến 2 g/cm³.

Các vật liệu hợp kim dựa trên CNT cho nhiều ứng dụng gần đây đã được phát triển và nhiều loại hợp kim, chẳng hạn như CNT– Đồng, đã đạt được thành công. Hợp kim CNT – Đồng gần đây đã được chứng minh là vượt trội hơn đồng về các tính chất nhiệt và cơ học. Hơn nữa, hợp kim CNT – Đồng với tỷ lệ thể tích CNT cao nhẹ hơn đồng rất nhiều và thể hiện khả năng dẫn điện và nhiệt ổn định với nhiệt độ tương đương với đồng. Các tiêu chí đánh giá của các kim loại thông thường và các vật liệu mới tiên tiến đưa ra trong Bảng 2. Qua Bảng 2, có thể thấy được trong tương lai, CNT – Đồng là vật liệu có tiềm năng lớn để thay thế các vật liệu truyền thống trong động cơ điện.

Với xu hướng phát triển công nghệ vật liệu, tại Việt Nam, nhiều cơ quan nghiên cứu đã tập trung vào vật liệu CNT với các ứng dụng trong điện tử, y sinh, môi trường, năng lượng và vật liệu. Từ năm 2002, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã đạt được nhiều thành tựu, như thử nghiệm vật liệu lai CNT trong cao su gia cường, hợp kim CNT dùng chế tạo tản nhiệt, vật liệu hấp thụ sóng điện từ, Đặc biệt, nghiên cứu chế tạo vật liệu hợp kim lai CNT – Đồng [9] mở ra tiềm năng làm chủ công nghệ

sản xuất CNT – Đồng chất lượng cao với giá thành thấp, nâng cao hiệu suất động cơ điện. Đồng thời, Viện Dầu khí Việt Nam (VPI) đã tổng hợp thành công vật liệu CNT từ nguồn khí thiên nhiên giàu CO₂, đặc biệt từ các mỏ khí lô B và Cá Voi Xanh [10], đáp ứng tiềm năng thị trường gần 3.700 tấn/năm vào năm 2030, góp phần khai thác hiệu quả nguồn khí thiên nhiên của Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Vật liệu dây quấn động cơ đóng vai trò then chốt trong việc tối ưu hóa kích thước và hiệu suất của động cơ điện, đặc biệt là động cơ KĐB. Bài báo này đã giới thiệu các vật liệu dẫn điện truyền thống như đồng, nhôm, cũng như các vật liệu mới đang được nghiên cứu, bao gồm sợi CNT, hợp kim CNT – Nhôm và hợp kim CNT – Đồng. Các vật liệu tiên tiến này, đặc biệt là hợp kim CNT– Đồng, mang lại tiềm năng lớn trong việc thay thế các kim loại nguyên chất, như nhôm và đồng, nhờ vào những đặc tính vượt trội như độ bền cao, trọng lượng nhẹ và khả năng dẫn điện tốt. Qua đó, bài báo cung cấp cái nhìn về xu hướng và tiềm năng sản xuất cũng như ứng dụng các vật liệu CNT trong chế tạo động cơ điện nói riêng và trong ngành công nghiệp Việt Nam nói chung, mở ra cơ hội phát triển công nghệ mới, giúp nâng cao hiệu suất động cơ và giảm chi phí sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Zhang, F., Gerada, D., Xu, Z., He, Y., Zhang, H., Hua, W., & Gerada, C. (2022). Performance entitlement by using novel high strength electrical steels and copper alloys for high-speed laminated rotor induction machines. *Electronics*, 11(2), 210.
2. Dương Vũ Trường, Nguyễn Quang Thành, Nguyễn Hữu Lâm (2023). Nâng cao đặc tính nhạy khí ở nhiệt độ phòng của cảm biến khí NH₃ dựa trên vật liệu tổ hợp NANO các bon và hạt NANO ZnO. *Tạp chí khoa học và công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, Tập 228(số 02), trang 318-326.
3. Nguyễn Linh Nam. (2016). Đặc tính điện tử của ống nano carbon và ứng dụng trong chế tạo nanotransistor. *Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 11(108.2).
4. Li, Y., Hu, A., Fu, Y., Liu, S., Shen, W., Hu, H., & Nie, X. (2022). Al alloys and casting processes for induction motor applications in battery-powered electric vehicles: A review. *Metals*, 12(2), 216.
5. Varghese, S. T., Singh, B., & Rajagopal, K. R. (2017). Fault investigations on die-cast copper rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 184-194.
6. Gerada, D., Mebarki, A., Brown, N. L., Bradley, K. J., & Gerada, C. (2010). Design aspects of high-speed high-power-density laminated-rotor induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(9), 4039-4047.

7. Schuffenhauer, U., Miersch, S., Schuhmann, T., Schmitz, D., Breuckmann, M., Herget, F., & Machalitzka, K. (2022, September). Realization of high-speed cast copper cage induction machines for electric mobility. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 2290-2296). IEEE.
8. Hassan, A., Abbas, S., Jie, L., Youming, L., & Quanfang, C. (2022). Investigation of the advanced novel carbon nanotube (CNT) yarn and carbon nanotube aluminum/copper composite windings for a single-phase induction motor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(11), 14915-14933.
9. Phạm Văn Trinh, Nguyễn Ngọc Anh, Tô Anh Đức, Nguyễn Văn Chúc, Phan Ngọc Hồng, Phan Ngọc Minh và Bùi Đức Thắng (2017). Nghiên cứu chế tạo vật liệu lai giữa ống nano cac bon và các hạt nano cu định hướng ứng dụng cho chất lỏng nano. *Hue University Journal of Science: Natural Science*, 126(1A), 93-101.
10. Nguyễn Hữu Lương, Huỳnh Minh Thuận, Nguyễn Mạnh Huấn, Đỗ Phạm Noa Uy, Nguyễn Thị Châu Giang, và Đặng Ngọc Lương (2022). Tiềm năng phát triển vật liệu carbon nanotube từ nguồn khí thiên nhiên giàu CO₂ của Việt Nam. *Tạp chí Dầu khí*, Số 9, trang 31-40, DOI: 10.47800/PVJ.2022.09-05.

Thông tin của tác giả:**ThS. Nguyễn Thị Thương Duyên**

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).986 440 798- Email:phanlinh.dhm@gmail.com

ThS. Trần Thanh Tuyền

NCS. Đại học Trung Nam, Hồ Nam, Trung Quốc

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).977 386 134 - Email: tuyenttbk48@gmail.com

ThS. Phạm Anh Mai

Trung tâm đào tạo nghề, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84). 912 521 075 - Email: maiphuongkietthao@gmail.com

ASSESSMENT OF CONDUCTOR MATERIALS FOR INDUCTION MOTORS: CURRENT STATE AND FUTURE TRENDS

Information about authors:

Nguyen Thi Thuong Duyen, Master, Department of Electrical, Quang Ninh University of Industry

Email: phanlinh.dhm@gmail.com.

Tran Thanh Tuyen, PhD Student, School of Automation, Central South University, Changsha, China, Department of Electrical, Quang Ninh University of Industry.

Pham Anh Mai, Master, Vocational Training Center, Quang Ninh University of Industry.

ABSTRACT:

Induction motors (IM) are among the most important motors in industrial and civilian applications, especially in drive systems. One of the key factors determining the performance and durability of motors is the materials used for conductor bars, particularly those used in the rotor. The selection and improvement of conductor materials not only affect electrical conductivity but also influence energy loss reduction, performance optimization, and the motor's longevity. This paper evaluates traditional conductive materials such as copper and aluminum, while also exploring advanced alternative materials, including aluminum alloys, copper alloys, and carbon nanotube (CNT) materials. The goal is to provide valuable insights into the development trends of new conductive

materials in research and applications, meeting the growing demands for motor performance and reliability in modern industries.

Keywords: Induction motor (IM), nanocarbon materials (CNT), rotor bars, copper and copper alloys, aluminum and aluminum alloys, motor manufacturing technology.

REFERENCES

1. Zhang, F., Gerada, D., Xu, Z., He, Y., Zhang, H., Hua, W., & Gerada, C. (2022). Performance entitlement by using novel high strength electrical steels and copper alloys for high-speed laminated rotor induction machines. *Electronics*, 11(2), 210.
2. Trường, D. V., Thành, N. Q., & Lâm, N. H. (2023). Improvement of sensitive characteristics at room temperature of NH₃ gas sensor based on composite of nano carbon and ZnO nanoparticles. *TNU Journal of Science and Technology*, 228(02), 318-326.
3. Nam, N. L. (2016). Electronic properties of carbon nanotubes and their application in making nanotransistors. *Journal of Science and Technology, The University of Danang*, 11(108.2).
4. Li, Y., Hu, A., Fu, Y., Liu, S., Shen, W., Hu, H., & Nie, X. (2022). Al alloys and casting processes for induction motor applications in battery-powered electric vehicles: A review. *Metals*, 12(2), 216.
5. Varghese, S. T., Singh, B., & Rajagopal, K. R. (2017). Fault investigations on die-cast copper rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 184-194.
6. Gerada, D., Mebarki, A., Brown, N. L., Bradley, K. J., & Gerada, C. (2010). Design aspects of high-speed high-power-density laminated-rotor induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(9), 4039-4047.
7. Schuffenhauer, U., Miersch, S., Schuhmann, T., Schmitz, D., Breuckmann, M., Herget, F., & Machalitzka, K. (2022, September). Realization of high-speed cast copper cage induction machines for electric mobility. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 2290-2296). IEEE.
8. Hassan, A., Abbas, S., Jie, L., Youming, L., & Quanfang, C. (2022). Investigation of the advanced novel carbon nanotube (CNT) yarn and carbon nanotube aluminum/copper composite windings for a single-phase induction motor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(11), 14915-14933.
9. Van Trinh, P., Anh, N. N., Tam, N. T., Duc, T. A., Van Chuc, N., Hong, P. N., ... & Thang, B. H. (2017). Preparation of carbon nanotube and Cu nanoparticle hybrid material for nanofluids. *Hue University Journal of Science: Natural Science*, 126(1A), 93-101.
10. Nguyen, H. L., Huynh, M. T., Nguyen, M. H., Do, P. N. U., Nguyen, T. C. G., & Dang, N. L. (2022). Potential for the development of carbon nanotube materials from Vietnam's CO₂-rich natural gas resources. *Petroleum Journal*, 9, 31–40. <https://doi.org/10.47800/PVJ.2022.09-05>

Ngày nhận bài: 24/12/2024;

Ngày gửi phản biện: 24/12/2024;

Ngày nhận phản biện: 30/12/2024;

Ngày chấp nhận đăng: 07/01/2025.