



Tạp chí điện tử  
Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghệ Đông Á  
Website Tạp chí: <https://vjai.org.vn>

---

## Special Types of Induction Motors and Current Application Trends

Hoang Thi My<sup>1</sup>, Tran Huu Phuc<sup>2\*</sup>, Vu Thi Hang<sup>3</sup>, Luu Binh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical and Automation Engineering, Hai Duong Vocational College

<sup>2</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, EAUT

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Quang Ninh Industrial University

---

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

asynchronous motor,  
alternating current drive  
system,  
special electrical machine,  
induction motor (IM)

### ABSTRACT

Asynchronous motor drive systems are recognized as one of the pivotal technologies in modern industry. Numerous industrial applications, such as fan systems, water pumps, and hoisting winches, are operated by modern alternating current (AC) drive systems. Furthermore, modern electric transportation systems like electric vehicles (EVs) and e-trucks also utilize these drive systems. Recently, high-efficiency asynchronous motor drive systems have become a primary research focus aimed at reducing energy and fuel consumption. This paper presents recent trends and advancements in asynchronous motor research during the 2020–2025 period, including: the development of specialized asynchronous motor used to achieve high efficiency and high-performance drive capabilities; concurrently, it analyzes development trends in asynchronous motor design.

---

\* Corresponding author

Email: [phucth@eaut.edu.vn](mailto:phucth@eaut.edu.vn)

DOI: <https://doi.org/10.65153/6cffqs89>

Received: 07/03/2026; Received in revised form: 28/05/2026; Accepted: 06/06/2026

Available online: 09/06/2026

Published by: East Asia University of Technology



Tạp chí điện tử  
Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghệ Đông Á  
Website Tạp chí: <https://vjai.org.vn>

## Động cơ không đồng bộ đặc biệt và xu thế ứng dụng hiện nay

Hoàng Thị Mỹ<sup>1</sup>, Trần Hữu Phúc<sup>2\*</sup>, Vũ Thị Hằng<sup>3</sup>, Lưu Bình<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khoa Điện - Tự động hoá, Trường Cao đẳng Nghề Hải Dương

<sup>2</sup> Khoa Điện - Tự động hoá, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

<sup>3</sup> Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

### THÔNG TIN BÀI BÁO TÓM TẮT

*Từ khóa:*  
động cơ không đồng bộ  
(KĐB),  
hệ truyền động xoay chiều  
(AC),  
máy điện đặc biệt,  
động cơ cảm ứng

Hệ truyền động động cơ không đồng bộ (KĐB) được công nhận là một trong những công nghệ then chốt trong công nghiệp hiện đại. Nhiều ứng dụng công nghiệp, chẳng hạn như hệ thống quạt gió, bơm nước và tời nâng, đều được vận hành bằng các bộ truyền động xoay chiều (AC). Hơn nữa, các phương tiện giao thông vận tải điện hiện đại như xe điện (EVs) và xe tải điện cũng sử dụng các hệ truyền động này. Gần đây, các hệ truyền động động cơ KĐB hiệu suất cao đã trở thành đối tượng nghiên cứu trọng tâm nhằm giảm mức tiêu thụ năng lượng và nhiên liệu. Bài báo này trình bày các xu hướng và tiến bộ gần đây trong lĩnh vực nghiên cứu động cơ KĐB giai đoạn 2020–2025, bao gồm: sự phát triển của các thể hệ động cơ KĐB chuyên dụng được sử dụng để đạt được hiệu suất và tính năng truyền động cao; đồng thời phân tích xu hướng phát triển trong thiết kế động cơ KĐB.

\* Tác giả liên hệ

Email: [phucth@eaut.edu.vn](mailto:phucth@eaut.edu.vn)

DOI: <https://doi.org/10.65153/6cffqs89>

Ngày nhận: 07/03/2026; Ngày nhận bản sửa: 28/05/2026; Ngày chấp nhận: 06/06/2026

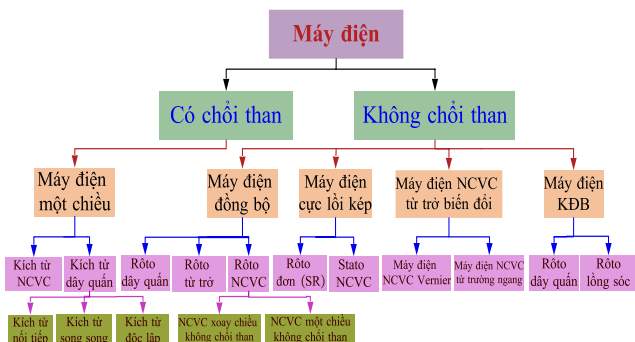
Ngày online: 09/06/2026

Đơn vị xuất bản: Trường Đại học Công nghệ Đông Á

## 1. MỞ ĐẦU

Động cơ không đồng bộ (KĐB) hiện diện phổ biến trong công nghiệp, chiếm gần 85% tổng số máy điện, trong đó phần lớn là loại rôto lồng sóc [1]. Nhờ kết cấu bền vững và khả năng điều khiển thuận tiện thông qua bộ biến đổi điện tử công suất, chúng được ứng dụng rộng rãi ở nhiều dải công suất khác nhau, từ thấp đến cao. Đặc biệt, đặc tính vận hành không phát sinh tia lửa điện (do không sử dụng vành góp–chổi than) giúp động cơ trở thành lựa chọn an toàn cho các môi trường khắc nghiệt như ngành dầu khí, khai thác than và nhiều lĩnh vực tiềm ẩn nguy cơ cháy nổ khác. Tuy nhiên, trước yêu cầu ngày càng cao về giảm tiêu thụ năng lượng, tiết kiệm nhiên liệu và nâng cao hiệu suất hệ thống, cấu trúc của động cơ KĐB đã và đang trở nên phức tạp hơn, đồng thời cần được thiết kế tối ưu để đáp ứng những tiêu chuẩn và điều kiện vận hành mới [2].

Trong những năm gần đây, ngoài các loại máy điện thông dụng, cụ thể là máy điện một chiều, máy điện KĐB và máy điện đồng bộ, thì đã xuất hiện các loại máy điện mới và bộ truyền động của chúng thể hiện nhiều tính năng thú vị về chuyển đổi năng lượng [3]. Do đó, chúng trở thành ứng cử viên phù hợp cho các lĩnh vực ứng dụng mới, chẳng hạn như công nghệ robot, tàu điện, máy bay, xe điện, sản xuất năng lượng gió, hệ thống đẩy không người lái, ...



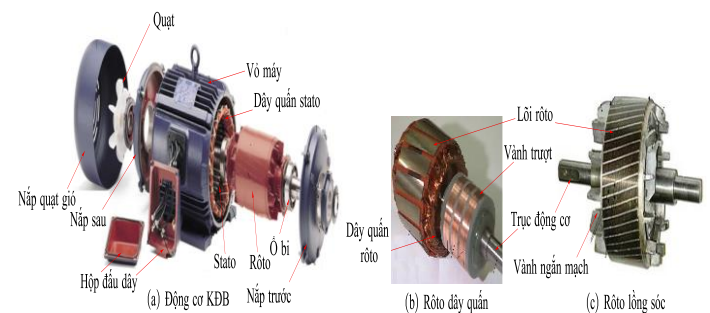
Hình 1. Phân loại máy điện [4].

Máy điện có nhiều cấu trúc khác nhau, dẫn đến các cách phân loại đa dạng. Truyền thống, chúng được chia thành hai nhóm: máy điện một chiều (DC) và máy điện xoay chiều (AC). Tuy

nhien, với sự xuất hiện của các cấu trúc mới, cách phân loại này không còn phù hợp. Hình 1 đề xuất sơ đồ phân loại máy điện với nguyên tắc, máy điện được chia thành hai nhóm: máy có cổ góp (dùng cổ góp và chổi than) và máy không cổ góp (không dùng cổ góp và chổi than) [4]. Xu hướng hiện nay tập trung vào phát triển các loại máy không cổ góp để nâng cao hiệu suất của động cơ.

## 2. TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ KĐB

Động cơ KĐB hay còn gọi là động cơ cảm ứng là động cơ điện AC, với tốc độ quay của rôto không bằng tốc độ quay của từ trường quay do stato sinh ra [5]. Về cấu tạo động cơ KĐB như Hình 2a, stato gồm các lá thép kỹ thuật điện ghép lại với nhau và có rãnh đặt dây quấn (với động cơ 3 pha thường đấu hình sao hoặc hình tam giác), còn rôto cũng tương tự như stato làm bằng các lá thép kỹ thuật điện ghép lại với nhau và có rãnh đặt dây quấn (dây quấn rôto thường làm bằng đồng hoặc nhôm với hai đồng đấu ngắn mạch với nhau).



Hình 2. Cấu trúc rôto của động cơ KĐB [5].

Động cơ KĐB truyền thống có hai loại rôto dây quấn và rôto lồng sóc là loại máy điện xoay chiều phổ biến và được sử dụng lâu đời nhất trong công nghiệp, nổi bật với độ tin cậy, kết cấu chắc chắn, giá thành hợp lý và khả năng bảo trì thuận tiện. Nhờ thiết kế hình trụ truyền thống, động cơ KĐB có thể chịu tải cơ học tốt và dễ dàng áp dụng nhiều phương pháp điều khiển từ đơn giản đến hiện đại, đáp ứng linh hoạt yêu cầu về tốc độ và mô men. Tuy nhiên, nhược điểm của loại động cơ này là mật độ

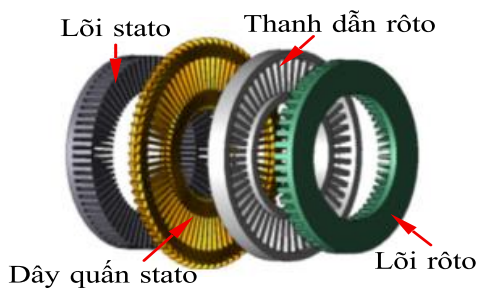
công suất thấp, kích thước công kênh, hình dạng ít linh hoạt, đồng thời có thể phát sinh tổn thất lõi thép cao. Do đó hiện nay, các nhà nghiên cứu đã cải tiến cấu trúc của động cơ KĐB phù hợp với nhu cầu thực tế cũng như cải thiện hiệu suất của động cơ KĐB.

### 3. CÁC LOẠI ĐỘNG CƠ KĐB ĐẶC BIỆT

#### 3.1. Động cơ KĐB từ thông hướng trục

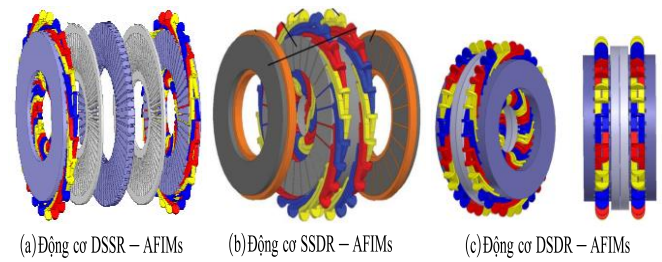
Động cơ KĐB định hướng từ thông [6] chia làm hai loại là động cơ KĐB từ thông hướng kính và động cơ KĐB từ thông hướng trục (AFIMs).

Động cơ KĐB hướng kính có cấu trúc giống động cơ KĐB truyền thống với nhờ độ bền cao và chi phí hợp lý, thường được sử dụng cho các thiết bị như băng tải, bơm và hệ thống thông gió. Với thiết kế đặc biệt của động cơ này giúp cải tiến và kỹ thuật tối ưu, góp phần nâng cao hiệu suất và độ tin cậy. Trong khi đó, động cơ AFIMs [7], với thiết kế nhỏ gọn và khả năng tạo momen xoắn lớn, mang lại lợi thế trong các ứng dụng hạn chế về không gian. Các đổi mới như cấu hình đa stato/đa rôto và chiến lược điều khiển tối ưu cho phép loại động cơ này vận hành hiệu quả trong môi trường khắc nghiệt.



**Hình 3.** Cấu trúc động cơ AFIMs đơn rôto và đơn stato (SSSR) [7].

Cấu tạo của động cơ AFIMs có từ thông trong khe hở không khí có hướng song song với trục. trong đó stato và rôto có dạng đĩa như Hình 3. Các cuộn dây stato thường được bố trí trên một mặt phẳng.



**Hình 4.** Các loại động cơ AFIMs cải tiến khác nhau.

Động cơ AFIMs trong những năm gần đây thường được cải tiến thành các loại như sau (Hình 4): loại 2 stato 1 rôto (DSSR), 1 stato 2 rôto (SSDR) và loại 2 stato, 2 rôto (DSDR).

Động cơ DSSR [8-10] kết hợp thiết kế cấu trúc tiên tiến với đặc tính điện từ vượt trội, mang lại mật độ mô men cao, hiệu suất lớn và kích thước gọn. Khả năng tối ưu để cân bằng các mục tiêu mâu thuẫn (như hiệu suất và thể tích) giúp chúng phù hợp cho ô tô điện, tuabin gió và truyền động công nghiệp. Với sự phát triển của công nghệ chế tạo, động cơ DSSR hứa hẹn sẽ thay thế các thiết kế truyền thống dạng hướng kính hoặc động cơ SSSR trong các ứng dụng đòi hỏi hiệu quả năng lượng cao.

Động cơ SSDR [11-12] kết hợp thiết kế nhỏ gọn, mật độ mô men cao và khả năng vận hành độc lập của các rôto, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu điều khiển tốc độ vi sai và hiệu suất cao. Với cấu trúc linh hoạt, tiết kiệm vật liệu và khả năng làm việc bền bỉ, chúng trở thành lựa chọn ưu việt so với các loại động cơ truyền thống trong ô tô điện, truyền động công nghiệp và hệ thống năng lượng tái tạo. Những tiến bộ liên tục trong tối ưu hóa dây quấn và vật liệu sẽ tiếp tục nâng cao tính cạnh tranh của chúng trong các ứng dụng hiệu năng cao.

**Bảng 1.** So sánh các loại động cơ AIFMs với động cơ KĐB truyền thống.

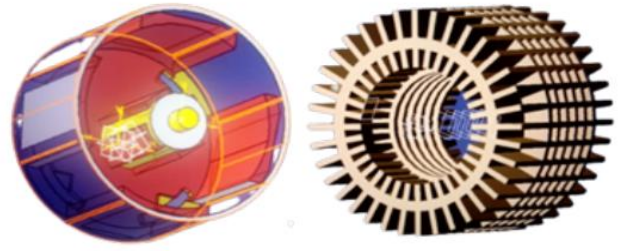
Thông số	SSSR-AFIM [7]	DSSR-AFIM [8-10]	DSDR- AFIM [13]	SSDR-AFIM [11-12]	Động cơ KĐB truyền thống
Mật độ công suất	Trung bình	Cao	Cao	Cao	Trung bình
Mật độ mô men	Thấp	Rất cao	Cao	Cao	Trung bình
Hiệu suất (đầy tải)	83,6%	84,9%	89%	80,6~91,2%	75~80%
Trọng lượng	Trung bình	Nhẹ	Nhẹ	Nhẹ	Nặng
Cân bằng lực dọc trục	Không cân bằng	Cân bằng	Cân bằng	Cân bằng	Không cân bằng
Lượng vật liệu sử dụng	Cao	Thấp	Thấp	Thấp	Cao
Đáp ứng động lực học	Chậm	Rất nhanh	Nhanh	Nhanh	Trung bình
Độ gọn dọc trục	Gọn	Rất gọn	Gọn	Gọn	Không gọn
Ứng dụng chính	Truyền động công nghiệp công suất thấp	Ô tô điện, tuabin gió, truyền động công nghiệp	Ô tô điện, hệ thống công suất lớn	Dẫn động vi sai cho xe điện, dẫn động bánh xe	Truyền động công nghiệp chung, bom, băng tải
Ảnh hưởng lực dọc trục lên ổ bi	Cao	Thấp	Thấp	Thấp	Thấp
Độ phức tạp chế tạo	Thấp	Cao	Cao	Cao	Thấp
Khả năng làm mát	Tốt	Rất tốt	Xuất sắc	Tốt	Trung bình

Động cơ DSDR [13] sở hữu mật độ công suất cao, hiệu suất lớn và thiết kế gọn nhờ cấu trúc đối xứng kép stato-rôto cùng rôto không gông. Đặc tính loại bỏ lực dọc trục, giảm khối lượng và vận hành hiệu quả trên dải tốc độ rộng khiến chúng đặc biệt phù hợp cho xe điện (nhất là dẫn động bánh xe) và các ứng dụng công nghiệp hiệu năng cao. Với sự tiến bộ của công nghệ chế tạo, động cơ DSDR hứa hẹn sẽ giữ vai trò quan trọng trong các hệ thống điện hóa thế hệ mới.

Dựa vào Bảng 1 có thể thấy các động cơ AFIMs cải tiến (DSSR, DSDR, SSSR) vượt trội so với động cơ KĐB truyền thống và động cơ SSSR-AFIM nhờ hiệu suất cao (89–91,2%), mật độ công suất/mô men lớn, trọng lượng nhẹ, sử dụng ít vật liệu, khả năng làm mát tốt và cân bằng lực dọc trục, giúp tăng tuổi thọ ổ bi và độ tin cậy. Động cơ DSSR nổi bật về mật độ mô men và đáp ứng nhanh, động cơ DSDR cân bằng giữa hiệu suất, công suất và làm mát, trong khi động cơ SSSR có dải hiệu suất rộng, phù hợp cho dẫn động vi sai. Nhược điểm chính của các thiết kế này là cấu trúc phức tạp, chi phí chế tạo cao, song chúng vẫn đặc biệt thích hợp cho các ứng dụng đòi hỏi hiệu suất và mật độ công suất cao như ô tô điện và truyền động công nghiệp, trong khi động cơ truyền thống vẫn giữ lợi thế về chi phí thấp và độ tin cậy cho các ứng dụng phổ thông.

### 3.2. Động cơ KĐB từ thông hướng kính hai rôto

Động cơ KĐB từ thông hướng kính hai rôto (DRRFIM) [14] là loại động cơ KĐB từ thông hướng tâm với rotor kép (trong và ngoài) và cấu trúc stato độc đáo, mang lại những lợi thế vượt trội về hiệu suất, hiệu suất và khả năng thích ứng cho các ứng dụng công nghiệp và ô tô.



(a) Cấu trúc rôto trong và ngoài (b) Cấu trúc stato

#### Hình 5. Cấu tạo của động cơ DRRFIM.

Động cơ DRRFIM (Hình 5) có thiết kế hai rôto và stato dây quấn hai phía, giúp rút ngắn đầu dây, giảm điện trở và điện cảm rò so với động cơ KĐB truyền thống. Nhờ đó, động cơ DRRFIM đạt hệ số công suất cao hơn, hiệu suất tới 86%, mật độ công suất lớn nhờ cân bằng khe hở không khí, đồng thời phản ứng nhanh và ổn định trước biến thiên tải cũng như trong cả trạng thái bão hòa và chưa bão hòa. Với cấu trúc gọn, mật độ mô men cao và khả năng thay thế hộp số, động cơ DRRFIM đặc biệt phù hợp cho EVs và truyền động công nghiệp hiệu suất cao, trong khi động cơ KĐB truyền thống tuy phổ biến nhưng kém thích hợp hơn ở các ứng dụng yêu cầu gọn nhẹ và hiệu suất vượt trội.

Có thể thấy động cơ DRRFIM có những ưu điểm sau:

- Hiệu suất và hệ số công suất cao: Hiệu suất tới 82–86%, tổn hao và điện cảm giảm, cải thiện hệ số công suất;

- Mật độ công suất và mô men lớn: Cấu trúc hai rôto và khe hở tối ưu cho từ thông đồng đều;

- Cấu trúc linh hoạt: Cuộn dây trên cả hai mặt stato, rôto lồng sóc liên kết, thích ứng với tốc độ thay đổi;

- Đáp ứng động học ổn định: Duy trì mô men khi tải thay đổi, bão hòa giúp ổn định dòng rôto.

Nhược điểm còn tồn tại ở động cơ này là:

- Bảo hòa từ: Giảm mô men khởi động, tăng thời gian khởi động, gây giảm hệ số công suất;

- Phức tạp trong mô hình hóa: Từ trường hai liên kết, cần xét bảo hòa và khe hở, tăng độ khó thiết kế;

- Nhạy với khe hở và tải: Hiệu suất phụ thuộc khe hở, dòng rôto dao động khi tải thay đổi;

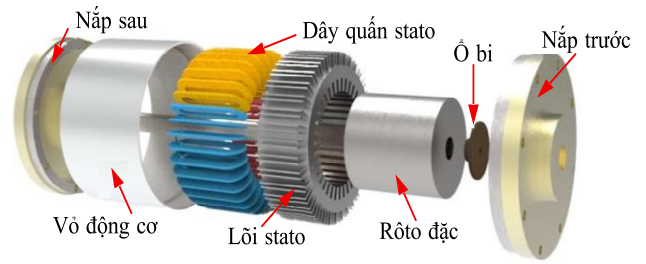
- Chế tạo phức tạp: Hai rôto và cuộn hai mặt yêu cầu độ chính xác cao, tăng chi phí.

### 3.3. Động cơ KĐB rôto đặc

Động cơ KĐB rôto đặc (SRIM) [15] là một loại động cơ KĐB chuyên biệt với rotor đặc (thường làm bằng vật liệu sắt từ như thép) thay vì rôto được ghép từ các lá thép như Hình 6. Các đặc điểm cấu trúc và vận hành độc đáo của chúng khiến chúng phù hợp cho các ứng dụng tốc độ cao và yêu cầu độ tin cậy cao.

Động cơ SRIM sử dụng rôto nguyên khối bằng thép từ tính (ví dụ Fe52 hoặc S45C), thay cho rôto ghép lá, mang lại độ bền cơ học cao, chịu được lực ly tâm cực lớn ở tốc độ cao (tới 60.000 vòng/phút) và môi trường khắc nghiệt [16-19]. Kết cấu đơn giản, không có dây quấn hay vòng ngắn mạch, giảm độ phức tạp chế tạo và nâng cao độ tin cậy [15]. Bề mặt rôto phủ đồng hoặc có rãnh/chuồng sóc cải thiện mô men điện từ (tăng 54–82%) và giảm tổn hao dòng xoáy [16,19]. Điện cảm rôto phụ thuộc trượt và tần số, với dòng trượt cao tập trung trên bề mặt, làm tăng bảo hòa và tổn hao [17,19]. Hiệu suất tối ưu đạt 82%–86%, hệ số công suất ~0,66, mật độ mô men cao nhờ cân bằng khe hở rôto trong/ngoài [15,18]. Hệ thống làm mát bằng khí nén áp suất cao giảm nhiệt độ cực đại lên tới 78,2%, với lưu lượng tối ưu 0,072–0,084 m<sup>3</sup>/phút [18]. Động cơ SRIMs thích hợp cho truyền động tốc độ cao, robot công nghiệp, tua bin gió, máy nén khí và hệ thống tích trữ năng

lượng bánh đà, hay các lĩnh vực yêu cầu khởi động/dừng nhiều và độ tin cậy cao [16-19].



**Hình 6.** Cấu tạo của động cơ SRIM [15].

- Các ưu điểm của động cơ SRIM so với động cơ KĐB truyền thống là:

- Độ bền cao: Rôto liền khối chịu lực ly tâm lớn, vận hành ổn định trong môi trường khắc nghiệt;

- Cấu trúc đơn giản: Không dây quấn hay lõi ghép, giảm bảo trì, tăng độ tin cậy;

- Hiệu suất điện từ cao: Tăng cường mô men và mật độ công suất, hiệu quả cải thiện 6–82%;

- Hệ thống làm mát tốt: Làm mát khí áp suất cao giảm nhiệt độ tối đa 78,2%.

- Tuy nhiên cũng có các nhược điểm như là:

- Tổn hao cao: Dòng xoáy và tổn hao dòng AC lớn ở tốc độ cao;

- Khởi động kém: Dòng khởi động tăng 15,42%, tỷ số mô men/dòng giảm;

- Nhạy với làm mát: Áp suất khí ảnh hưởng nhiệt độ rôto; cần tối ưu lưu lượng;

- Trở kháng phức tạp: Thay đổi theo trượt, tần số, bảo hòa và phi tuyến;

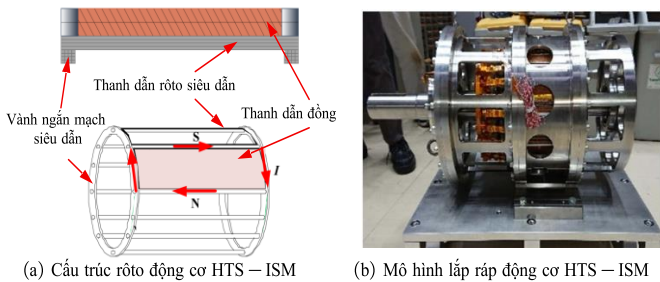
- Hệ số công suất thấp: hệ số thấp từ 0,57–0,72, cần bù công suất phản kháng.

### 3.4. Động cơ KĐB siêu dẫn nhiệt độ cao

Động cơ KĐB chịu nhiệt độ cao (HTIM), đặc biệt là loại siêu dẫn nhiệt độ cao (HTS-ISM) như Hình 7 [20], có khả năng vận hành trong dải nhiệt rộng từ môi trường siêu lạnh (77K) đến nhiệt độ phòng và trên 130K. Nhờ vật liệu siêu dẫn (Bi-2223, YBCO), động cơ đạt hiệu suất rất cao (tới 99,7%), mật độ công

suất lớn và vẫn duy trì hoạt động an toàn khi hệ thống làm mát gặp sự cố [21]. Cấu trúc rôto lai kết hợp dây quấn siêu dẫn và đồng giúp giảm tổn hao, tăng độ bền cơ học; stator dùng dây đồng và cách điện gốm cho phép chịu nhiệt tới 350°C [22-23].

Động cơ có thể hoạt động ở chế độ đồng bộ (siêu dẫn) và không đồng bộ (dẫn thường), tự động chuyển đổi theo tải và nhiệt độ [24]. Về tổn hao, đồng tăng theo nhiệt độ trong khi sắt giảm; tổn hao AC ở cuộn siêu dẫn được giữ ở mức rất thấp nhờ thiết kế tối ưu [22-23]. Hệ thống làm mát sử dụng cryostat và nitơ lỏng kết hợp vật liệu không từ tính bền cơ học để đảm bảo độ tin cậy [22]. Nhờ đó, động cơ HTS-ISM được ứng dụng trong hàng không vũ trụ, hạt nhân, động lực tàu thủy và lưu trữ năng lượng, mặc dù vẫn tồn tại hạn chế về mô men và dòng khởi động khi nhiệt độ cao [21].



**Hình 7.** Động cơ HTS-ISM.

- Các ưu điểm của động cơ HTS-ISM như sau:

- Dải nhiệt độ rộng, vận hành liên tục ngay cả khi hệ thống làm mát gặp sự cố;

- Hiệu suất cao trong trạng thái siêu dẫn, duy trì công suất ổn định ở tải thấp và tốc độ thấp;

- Mật độ công suất lớn, phù hợp ứng dụng cần nhẹ và gọn;

- Cấu trúc dây quấn lai ổn định, giảm tổn hao, tăng độ bền cơ học và hỗ trợ làm mát.

- Nhược điểm của động cơ này là:

- Phụ thuộc hệ thống làm mát, làm tăng chi phí và độ phức tạp;

- Hiệu năng giảm khi nhiệt độ cao;

- Hạn chế về vật liệu và thiết kế, tổn hao AC vẫn tồn tại khi tải biến đổi;

- Chi phí và độ phức tạp cao, dây quấn lai khó chế tạo;

- Nhạy cảm với nhiệt độ khi dẫn thường, tổn hao đồng tăng, ảnh hưởng đến ổn định dài hạn.

Động cơ HTS-ISM cung cấp hiệu suất vượt trội, mật độ công suất cao và vận hành đáng tin cậy trong trạng thái siêu dẫn, với các chế độ linh hoạt và khả năng thích ứng nhiệt độ, nhưng vẫn gặp phải các thách thức do phụ thuộc vào làm mát, hiệu suất giảm ở nhiệt độ cao và chi phí cùng độ phức tạp cao.

### 3.5. Động cơ KĐB thay đổi số cực

Động cơ KĐB thay đổi số cực (VPIMs) [25] là loại động cơ KĐB tiên tiến, có khả năng điều chỉnh số cực stato để cung cấp hiệu suất mô men–tốc độ linh hoạt mà không cần hộp số cơ học. Bằng cách chuyển đổi giữa nhiều cấu hình cực như Hình 8 [25], động cơ VPIMs tạo mô men lớn ở tốc độ thấp và vận hành hiệu quả ở tốc độ cao, mở rộng dải mô men–tốc độ và tối ưu hóa hiệu suất năng lượng. Thiết kế dây quấn đặc biệt, như toroidal hoặc phân tán, kết hợp với bộ biến tần đa pha, cho phép chuyển cực chính xác, giảm tổn hao và tăng khả năng chịu lỗi. Kích thước nhỏ gọn và mật độ công suất cao đạt được nhờ điều chỉnh cấu hình cực theo tải. Các chiến lược điều khiển tiên tiến, bao gồm phân tách mặt sóng hài, và giảm từ thông, đảm bảo chuyển đổi mượt mà và hiệu suất tối ưu. Động cơ VPIMs cũng có độ tin cậy cao nhờ bảo vệ dây quấn chắc chắn và khả năng chịu lỗi của biến tần đa pha, thích hợp cho ứng dụng xe điện [26-28].

- Ưu điểm của động cơ VPIM:

- Đa dạng mô men–tốc độ: Động cơ VPIMs có thể chuyển đổi giữa nhiều cấu hình cực, cung cấp mô men lớn ở tốc độ thấp và

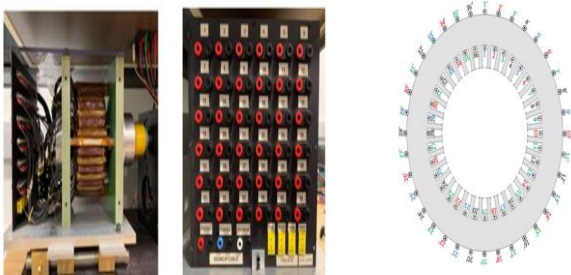
vận hành hiệu quả ở tốc độ cao, phù hợp với nhu cầu xe điện;

- Hiệu suất cao và giảm tổn hao: Việc điều chỉnh cấu hình cực theo tải giúp mở rộng vùng hoạt động hiệu quả và giảm tổn hao điện;

- Kích thước nhỏ gọn, mật độ công suất cao: Động cơ VPIMs đạt cùng dải mô men–tốc độ với kích thước nhỏ hơn động cơ cổ định nhờ tối ưu hóa cấu hình cực;

- Thiết kế dây quấn linh hoạt và khả năng chịu lỗi: Dây quấn toroidal cho phép chuyển cực linh hoạt, giảm tổn hao đồng và lõi; bộ biến tần đa pha duy trì hoạt động ngay cả khi có sự cố pha;

- Công suất tối ưu: Điều chỉnh cấu hình cực và điện áp DC bus giúp tăng khả năng cung cấp công suất ở dải tốc độ cao, cải thiện hiệu suất xe điện.



(a) Mô hình thực nghiệm động cơ VPIM (b) Cách quấn dây stato của động cơ VPIM

### Hình 8. Mô hình động cơ VPIM.

Nhược điểm của động cơ VPIM:

- Cấu tạo stato phức tạp: Dây quấn phải hỗ trợ nhiều cấu hình cực, tăng độ phức tạp và chi phí sản xuất;

- Phụ thuộc vào điều khiển biến tần: Cần biến tần đa pha và chiến lược điều khiển phức tạp để chuyển cực, tăng yêu cầu về điều chỉnh điện áp/dòng;

- Hạn chế hiệu suất ở cấu hình cực cao: Cực nhiều yêu cầu dòng kích từ cao, hạn chế mô men và có thể gây bão hòa từ;

- Thay đổi dây quấn và biến tần: Dây quấn đơn giản hơn giảm chi phí nhưng tăng tổn hao; dây hai lớp có thể giảm hiệu suất ở một

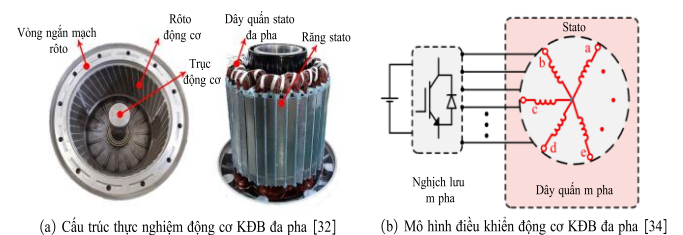
số cấu hình. Biến tần nhiều pha tăng chi phí và quản lý nhiệt;

- Nhạy cảm với bão hòa từ: Cấu hình cực thấp dễ bị bão hòa từ ở stato/rôto, làm tăng tổn hao lõi và giới hạn mô men ở tốc độ cao.

- Tóm lại, động cơ VPIMs cung cấp độ linh hoạt, hiệu suất và mật độ công suất vượt trội cho xe điện, nhưng gặp các thách thức về độ phức tạp trong chế tạo, phụ thuộc vào hệ thống điều khiển và sự đánh đổi hiệu suất giữa các cấu hình cực.

### 3.6. Động cơ KĐB đa pha

Động cơ KĐB đa pha (MPIMs) sở hữu nhiều đặc tính kỹ thuật nổi bật so với động cơ KĐB ba pha, chủ yếu nhờ cấu hình dây quấn đặc thù, chiến lược điều khiển tiên tiến và nguyên lý vận hành cải tiến. Về khả năng chịu lỗi, động cơ MPIMs có tính dư thừa pha cao, cho phép duy trì hoạt động khi mất một hoặc nhiều pha nhờ các cấu hình dây quấn đặc biệt và thuật toán tái cấu hình thích ứng [29-32] với cấu trúc như Hình 9. Về hiệu suất và mật độ công suất, việc phân bố công suất trên nhiều pha giúp giảm dòng mỗi pha, hạn chế tổn hao đồng và cải thiện quản lý nhiệt, đồng thời tận dụng sóng hài để nâng cao mô men; một số thiết kế đạt hiệu suất trên 94% [29, 31-33].



(a) Cấu trúc thực nghiệm động cơ KĐB đa pha [32] (b) Mô hình điều khiển động cơ KĐB đa pha [34]

### Hình 9. Mô hình động cơ KĐB đa pha.

Về điều khiển, động cơ MPIMs cho phép tách biệt mô men và truyền công suất nhờ các phương pháp phân tích không gian vector và điều khiển thích ứng, đồng thời vẫn có thể tích hợp với bộ điều khiển ba pha hiện có [30,31,33,34]. Ngoài ra, động cơ MPIMs đạt được mô men êm và ít sóng hài nhờ

trường quay đồng đều cùng các giải pháp triệt tiêu hài bậc thấp [29,32,33]. Về cấu trúc, động cơ MPIMs đa dạng với các biến thể 5, 6, 9 hoặc 12 pha, rotor ngoài cho mật độ công suất cao, cũng như rotor quấn kép cho phép truyền công suất không tiếp xúc; nhiều thiết kế có thể tái cấu hình từ khung stato ba pha nhằm tối ưu chi phí [32,33]. Một ưu điểm đặc thù khác là khả năng truyền công suất không tiếp xúc, loại bỏ vòng trượt và giảm yêu cầu bảo trì trong các ứng dụng quay liên tục [34]. Nhờ các đặc tính trên, động cơ MPIMs đặc biệt phù hợp với tự động hóa công nghiệp, giao thông vận tải điện, hệ thống năng lượng tái tạo và truyền động hải quân, nơi yêu cầu độ tin cậy và công suất cao [29–33]. Thông qua các tài liệu tham khảo trên có thể thấy được đặc điểm của các động cơ KĐB đa pha so với động cơ KĐB truyền thống như trong Bảng 2.



**Bảng 2.** So sánh các loại động cơ KĐB đa pha với động cơ KĐB truyền thống.

Thông số	KĐB 3 pha	KĐB 5 pha	KĐB 6 pha	KĐB 9 pha	KĐB 12 pha
Khả năng chịu lỗi	Kém, dừng khi mất pha	Cao, mất 1 pha vẫn giữ ~96% mô men, mất 3 pha còn ~90%; đầu hình sao–ngũ giác giảm mất cân bằng.	Cao: thiết kế bất đối xứng duy trì ~66% tải khi mất 1 pha.	Rất cao: duy trì ~70% công suất khi hỏng 1 pha.	Rất cao: cấu hình 4 cụm 3 pha độc lập cho phép cô lập lỗi từng cụm; mất 1 cụm vẫn giữ 75% công suất.
Hiệu suất và hệ số công suất	Trung bình: hệ số công suất không tải ~0,125; hiệu suất giảm mạnh khi bán tải.	Cao hơn: hệ số công suất không tải ~0,24 (gấp 1,92 lần 3 pha); 78–81% khi mất 2–3 pha; tổn hao đồng giảm nhờ phân bố đồng.	Cao: tương đương (~90%) nhưng hệ số lấp đồng cao hơn, cách điện đơn giản hơn.	Cao: cải thiện hệ số cơ bản thêm 5% so với 3 pha; tổn hao hài bậc cao nhất thấp.	Cao: nghịch lưu 3 pha mô-đun tối ưu chia sẻ công suất; thích hợp ứng dụng công suất lớn (>10 kW) với hiệu suất ~90%.
Độ gọn mô men	Cao: nhạy với sóng hài bậc thấp	Thấp: tỉ số vòng dây thay đổi giảm 36,1% gọn mô men so với quấn 5 pha thông thường	Rất thấp: dịch stator triệt hài khe; giảm gọn sóng mô men. Vượt trội: cấu hình D3P giảm hài trong không gian xy; P6P tăng trở kháng phụ	Rất thấp: quán đối xứng với dịch pha 20° giảm mạnh gọn mô men.	Rất thấp: nhiều cụm 3 pha cân bằng dòng, gọn <5%.
Khử sóng hài	Hạn chế: chịu ảnh hưởng lớn bởi hài 5 và 7	Hiệu quả: tiêm hài bậc 3 tăng mô men; quấn sao–ngũ giác triệt hài bậc ba	Trung tính đơn giản hóa, tận dụng điện áp tốt hơn; tương thích PWM chuẩn.	Xuất sắc: thiết kế 117 rãnh/36 cực triệt hài bậc 1/5/13	Xuất sắc: nhiều bộ quấn lệch 15° triệt hài bậc thấp; điều khiển VSD cô lập không gian hài
Hệ thống điều khiển	Đơn giản nhưng hạn chế: chủ yếu dựa FOC/DTC	Tách biệt: VSD phân tách dq (mô men) và xy (hài).		Thích ứng: A-DMS giữ điều khiển 3 pha (DFVC) trong mọi điều kiện, không cần phần cứng bổ sung.	Mô-đun: mỗi cụm 3 pha điều khiển độc lập, hỗ trợ chia sẻ công suất.
Ứng dụng chính	Truyền động công nghiệp phổ thông, máy công suất nhỏ.	EVs, gia công siêu âm quay, hệ thống chịu lỗi	EV bánh xe, bơm công suất lớn	Truyền động trung–cao áp (tàu thủy, máy nén dầu/khí)	Kéo tải nặng (đầu máy, tuabin gió)

Như vậy, có thể thấy những ưu điểm của động cơ MPIMs như sau:

- Khả năng chịu lỗi cao: Duy trì mô men và vận hành khi mất pha hoặc cuộn dây;
- Giảm mất cân bằng khi sự cố: Cấu hình cuộn dây hạn chế dòng không thứ tự và gọn mô men;
- Điều khiển tách kênh và linh hoạt: Bộ điều khiển cho phép điều khiển riêng từng không gian con; hỗ trợ truyền công suất và mô men đồng thời;
- Tương thích điều khiển 3 pha: Có thể áp dụng các thuật toán chuẩn (FOC, DTC) trên từng bộ ba pha;

- Hiệu suất cao, gọn mô men thấp: Thiết kế cuộn dây tối ưu, dịch cực stato và phân phối pha giảm tổn hao và dao động mô men;
- Giảm dòng mỗi pha: Phân bố công suất trên nhiều pha làm giảm tổn hao đồng;
- Ứng dụng chuyên biệt: Truyền công suất không tiếp xúc, và tận dụng khung stato 3 pha để giảm chi phí chế tạo.

Tuy nhiên, động cơ MPIMs còn có những hạn chế:

- Kết cấu và chế tạo phức tạp: Yêu cầu kết hợp khe rãnh-cực chính xác, cuộn dây đặc thù và thiết kế roto ngoài khó bảo trì;

- Chi phí và phụ thuộc nghịch lưu: Cần nghịch lưu đa pha (5–9 pha), đắt hơn và đòi hỏi bộ xử lý tính toán cao;

- Hạn chế vận hành: Truyền công suất dựa trên sóng hài bị giới hạn theo tốc độ; ước lượng tốc độ cảm biến-less khó ở chế độ khởi động;

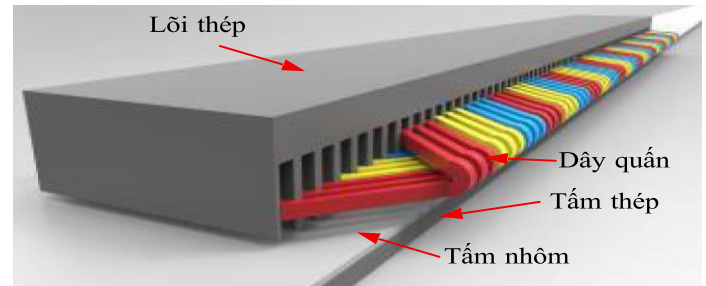
- Khả năng tích hợp hạn chế: Cấu hình đa pha không trực tiếp tương thích hệ truyền động 3 pha cũ, cần thay đổi phần cứng/phần mềm;

- Độ nhạy tham số: Hiệu suất phụ thuộc vào tỉ số vòng dây và độ chính xác thông số điện; sai lệch gây suy giảm công suất, hệ số công suất, và sai số quan sát.

### 3.7. Động cơ KĐB tuyến tính

Động cơ KĐB tuyến tính (LIMs) là thiết bị điện tử chuyên dụng chuyển đổi trực tiếp điện năng thành chuyển động thẳng (Hình 10), loại bỏ nhu cầu về các cơ cấu truyền động cơ khí như bánh răng hay dây đai. Với cấu trúc đơn giản gồm phần sơ cấp chứa lõi thép và cuộn dây đa pha, kết hợp với phần thứ cấp (tấm dẫn nhôm hoặc đồng gắn trên thép từ), động cơ LIMs có khả năng thiết kế mô-đun, dễ mở rộng cho hành trình dài như băng tải hay tàu maglev [35-36]. Đặc điểm nổi bật của động cơ LIMs là lực đẩy phi bám dính, cho phép hoạt động trên dốc lớn, bán kính cong nhỏ, hoặc trong điều kiện khắc nghiệt như từ trường mạnh (3.3T), nhiệt độ cao (250°C) hay môi trường chân không [35], [37]. Tuy nhiên, hiệu suất của động cơ LIMs thường thấp hơn so với động cơ tuyến tính nam châm vĩnh cửu, do tồn tại tổn hao đồng ở cuộn dây, tổn hao dòng xoáy trên tấm thứ cấp và hiện tượng biên làm giảm lực đẩy từ 4–15% [35-36]. Các nghiên cứu đã đề xuất giải pháp cải thiện như thay nhôm bằng đồng cho phần thứ cấp, tối ưu hoá thiết kế ống nhằm giảm hiệu ứng biên và nâng cao mật độ

lực [36]. Động cơ LIMs hiện được triển khai đa dạng từ giao thông đô thị (tàu điện ngầm, tàu maglev), hệ thống băng tải công nghiệp, đến các thiết bị chuyên dụng trong lò phản ứng nhiệt hạch, minh chứng cho tính thích ứng cao của công nghệ này trong môi trường vận hành khắc nghiệt [35-37].



**Hình 10.** Mô hình động cơ KĐB tuyến tính [35].

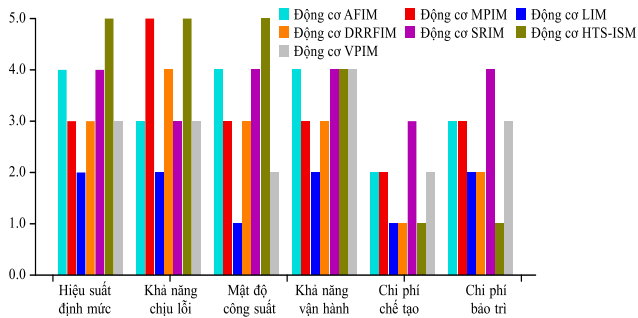
Các ưu điểm của động cơ LIMs là:

- Sinh lực đẩy phi bám dính, hoạt động tốt trên dốc lớn và bán kính cong nhỏ;
- Phần thứ cấp thụ động, kết cấu đơn giản, dễ mở rộng mô-đun và giảm bảo trì;
- Biến thể không lõi sắt (ironless LIMs) hoạt động trong môi trường khắc nghiệt: từ trường mạnh, nhiệt độ cao, chân không;
- Dung sai khe hở lớn, phù hợp với sai lệch lắp đặt và rung động.

Các nhược điểm còn tồn tại của động cơ LIMs:

- Hiệu suất thấp hơn so với động cơ tuyến tính NCVVC; tổn hao đồng và dòng xoáy cao;
- Hệ số công suất thấp;
- Ảnh hưởng biên gây giảm lực đẩy 4–15%, mô hình hóa phức tạp;
- Mật độ lực đẩy thấp, cần kích thước sơ cấp lớn hơn để đạt cùng lực với động cơ đồng bộ tuyến tính;
- Chi phí cao ở biến thể ironless do sử dụng cáp dẫn điện và tấm đồng dày.

Từ các phần trên nhóm tác giả tổng hợp ra Hình 11 với điểm tính từ 1 đến 5 điểm (trong đó 5 là tốt nhất và 1 là kém nhất).



**Hình 11.** So sánh các thông số kỹ thuật và chỉ số kinh tế của các loại động cơ KĐB đặc biệt.

Dựa trên Hình 11, có thể nhận xét như sau: động cơ HTIM đạt điểm cao nhất (3,8), thể hiện hiệu suất, khả năng chịu lỗi và mật độ công suất vượt trội nhưng chi phí cao; các động cơ AFIM và SRIM cùng đạt 3,7, nổi bật ở hiệu suất và khả năng thích ứng vận hành; động cơ MPIM đạt 3,5 nhờ khả năng chịu lỗi tốt, phù hợp ứng dụng cần độ tin cậy cao; động cơ VPIM ở mức 3,2, cân bằng giữa hiệu suất, chịu lỗi và vận hành; động cơ DRRFIM đạt 2,7, nhờ dự phòng rôto kép; động cơ LIM thấp nhất với 1,7 do hiệu suất, mật độ công suất và khả năng chịu lỗi đều kém.

#### 4. KẾT LUẬN

Các động cơ KĐB đặc biệt hiện nay, bao gồm các động cơ AFIM, MPIM, LIM, DRRFIM, VPIM và HTS-ISM, được phát triển theo xu hướng tăng hiệu suất, nâng cao khả năng chịu lỗi và tối ưu mật độ công suất.

Các động cơ AFIM và SRIM thích hợp cho ứng dụng tốc độ cao, động cơ MPIM nổi bật về độ tin cậy trong hệ thống đa pha, động cơ LIM ưu thế cho truyền động tuyến tính không ma sát, các động cơ DRRFIM và VPIM cân bằng giữa hiệu suất và khả năng chịu lỗi, trong khi động cơ HTS-ISM đạt hiệu suất và mật độ công suất cực cao nhưng chi phí lớn. Nhìn chung, xu hướng ứng dụng tập trung vào truyền động công nghiệp tiên tiến, phương tiện điện, hệ thống năng lượng cao và các ứng dụng đặc thù yêu cầu độ tin cậy và hiệu suất tối ưu.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Amrolia, H., & Badgujar, K. (2024). An overview of techniques for detecting mechanical anomalies in induction motors, *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, Vol. 9, No.1, pp. 71-86.
- [2]. Agamloh, E., Von Jouanne, A., & Yokochi, A (2020). An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles, *Machines*, Vol. 8, No.2, pp. 20.
- [3]. Liu, C., Chau, K. T., Lee, C. H., & Song, Z. (2020). A critical review of advanced electric machines and control strategies for electric vehicles, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 109, No. 6, pp. 1004-1028.
- [4]. Chau, K. T., Li, W., & Lee, C. H. (2012). Challenges and opportunities of electric machines for renewable energy, *Progress In*

*Electromagnetics Research B*, Vol. 42, pp. 45-74.

[5]. Giri, F. (2013). *AC electric motors control: advanced design techniques and applications, 1st Edition*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.

[6]. Gupta, V. K., Samanta, P., Sahay, P. K., & Srinivas, V. L. (2025). From Conveyor Belts to Crushers: A Review on Radial and Axial Flux Induction Motor Advances and Applications in Industrial Mining Operations, *In 2025 IEEE 1st International Conference on Smart and Sustainable Developments in Electrical Engineering (SSDEE)*, Dhanbad, India, pp. 01-06.

[7]. Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Roshandel, E., & Cao, Z. (2021). Optimal design of Axial-Flux Induction Motors based on an improved analytical model, *Energy*, Vol. 237, pp. 121552.

[8]. Wang, Q., Wang, J., & Geng, W. (2024). Equivalent Two-Dimensional Finite Element Analysis of Axial Flux Induction Motor with Double Stator and Single Rotor, *In 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Fukuoka, Japan, pp. 2556-2562.

[9]. Ergun, B. E., Ozmen, T., Akyildiz, A., Goksun, B., & Gulbahce, M. O. (2025). Meta-Heuristic Based Design and Optimization of Double Stator-Single Rotor Axial-Flux

Induction Generator, *In 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Houston, TX, USA, pp. 1323-1327.

[10]. Mei, J., Zuo, Y., Lee, C. H., & Kirtley, J. L. (2020). Modeling and optimizing method for axial flux induction motor of electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No.11, pp. 12822-12831.

[11]. Banchhor, D. K., & Dhabale, A. (2018). Design, modeling, and analysis of dual rotor axial flux induction motor, *In 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, India, pp. 1-6.

[12]. Sinha, S., Deb, N. K., Mondal, N., & Biswas, S. K. (2007). Design and performance of a single stator, dual rotor induction motor, *In 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, pp. 1163-1166.

[13]. Mei, J., Lee, C. H., & Kirtley, J. L. (2019). Design of axial flux induction motor with reduced back iron for electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No. 1, pp. 293-301.

[14]. Bobade, C. M., Mohod, S. B., & Singh, S. K. (2024). Robust Analysis of Dual Rotor Radial Flux Induction Motor Used for Industrial Application, *Indian Journal of*

*Science and Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 457-464.

[15]. Wang, P., Sun, Y., Si, J., Nie, R., & Xu, S. (2024). A Novel High-Speed Solid Rotor Induction Motor with Equidirectional Toroidal Rectangular Winding, *In 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Fukuoka, Japan, pp. 562-567.

[16]. Ortiz, F., Nerg, J., Grönman, A., Degano, M., Lindh, P., Toleukaiyr, T., ... & Pyrhönen, J. (2024). Analysing the performance of a high-speed solid rotor induction machine with copper coating, *In 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Torino, Italy, pp. 1-5.

[17]. Xu, H., Zhao, J., Yan, S., & Wang, H. (2025). Magnetic field and rotor impedance analysis of solid rotor induction motors using the multilayer analytical method, *IET Electric Power Applications*, Vol. 19, No. 1, pp. e70004.

[18]. Qiu, H., Cao, M., Lu, J., & Zhao, Q. (2024). Investigation on Heat Transfer Characteristics of High-Speed Solid-Rotor Asynchronous Motor Cooled by Different Pressure Natural Gas, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 19, No. 7, pp. 4159-4168.

[19]. Xu, H., Zhao, J., & Yan, S. (2025). Parameter Calculation and Rotor Structure

Optimization Design of Solid Rotor Induction Motors, *Sensors*, Vol. 25, No. 9, pp. 2929.

[20]. Nakamura, T., Yoshikawa, M., Terazawa, T., Matsuki, K., Gao, Y., & Kiss, T. (2023). Development of 50-kW-class high-temperature superconducting induction/synchronous motor with continuous drive characteristics from room temperature, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 33, No. 5, pp. 5200205.

[21]. Takahashi, Y., Hanzawa, M., Fujimoto, Y., Takao, T., Nakamura, K., Sakamoto, O., & Tsukamoto, O. (2025). Flywheel-type uninterruptible power supply using high temperature superconducting induction machine, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1327 No. 1, pp. 012187.

[22]. Mhaske, P., Ghosh, S., Birajdar, R., & Gosavi, K. (2024). Effect of High Temperature on Electromagnetic Performance of Canned Induction Motor, *In 2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangalore, India, pp. 1-6.

[23]. Liu, B., Badcock, R., Shu, H., & Fang, J. (2018). A superconducting induction motor with a high temperature superconducting armature: Electromagnetic theory, design and analysis, *Energies*, Vol. 11, No. 4, pp. 792.

- [24]. Dias, F. J. M., Sotelo, G. G., & de Andrade Júnior, R. (2022). Performance comparison of superconducting machines with induction motors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 32, No. 7, pp. 1-5.
- [25]. Libbos, E., Ku, B., Agrawal, S., Tungare, S., Banerjee, A., & Krein, P. T. (2019). Variable-pole induction machine drive for electric vehicles, *In 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Diego, CA, USA, pp. 515-522.
- [26]. Raj, R., Subramaniyan, P., & Peretti, L. (2022). Design of a variable phase-pole induction machine for electric vehicle applications, *In 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Valencia, Spain, pp. 976-982.
- [27]. Nisar, H., & Bazzi, A. M. (2024). Investigating the effect of inverter dc bus voltage on variable pole induction motor performance in electric vehicles, *In 2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA, pp. 1-5.
- [28]. Libbos, E., Krause, E., Banerjee, A., & Krein, P. T. (2023). Winding layout considerations for variable-pole induction motors in electric vehicles, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 9, No. 4, pp. 5214-5225.
- [29]. Varma, P. S., Rao, K. P., Ravikumar, C. V., Pau, G., Sathish, K., & Nelapati, R. P. (2023). Development and performance analysis of five phase induction motor, *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 112515-112525.
- [30]. Rubino, S., Mandrile, F., Armando, E., Bojoi, I. R., & Zarri, L. (2022). Fault-tolerant torque controller based on adaptive decoupled multi-stator modeling for multi-three-phase induction motor drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 58, No.6, pp. 7318-7335.
- [31]. Yu, J., Shen, H., Wang, H., & Wu, X. (2022). Speed estimation of multiphase induction motor using rotor slot harmonics with limited SNR and dynamic load conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 70, No. 7, pp. 6618-6631.
- [32]. Metwly, M. Y., Abdel-Khalik, A. S., Hamad, M. S., Ahmed, S., & Elmalhy, N. A. (2022). Multiphase stator winding: New perspectives, advanced topologies, and futuristic applications, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 103241-103263.
- [33]. Rezazadeh, G., Tahami, F., Capolino, G. A., Nasiri-Gheidari, Z., Henao, H., & Sahebazamani, M. (2021). Improved design of an outer rotor six-phase induction motor with variable turn pseudo-concentrated windings, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 37, No. 2, pp. 1020-1029.

- [34]. Ismail, A., Abdel-Moneim, M. G., Abdel-Khalik, A. S., Hamdy, R. A., & Ahmed, S. (2025). Contactless Power Transfer to Shaft-Mounted Loads via Multiphase Induction Machine With Decoupled Torque and Rotor Power Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 72, No. 8, pp. 7839-7849.
- [35]. Cao, R., Lu, M., Jiang, N., & Cheng, M. (2019). Comparison between linear induction motor and linear flux-switching permanent-magnet motor for railway transportation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 12, pp. 9394-9405.
- [36]. Sari, M., Ouazir, Y., & Mezani, S. (2023). New 2-D Quasi-analytical computation of eddy currents in axisymmetrical problems: Application to tubular linear induction motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 59, No. 3, pp. 1-13.
- [37]. Fang, J., Khodak, A., & Titus, P. (2024). Preliminary Design of Ironless Linear Induction Motors for ITER MSE Shutter Actuators, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 52, No. 9, pp. 4096-4102.