

پژوهش در زمینه طراحی، مدل سازی و بهینه سازی عملکرد سامانه ذخیره سازی انرژی فلابویل با یاتاقان مغناطیسی برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده، پشتیبانی توان و ارتقای بهره‌وری انرژی در سامانه‌های حمل و نقل ریلی شهری

مقاله علمی – پژوهشی

علی جاندوست، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*شهرام اعتمادی حقیقی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
پژمان صالحی، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: setemadi@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ – پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

صفحه ۳۶۰-۳۳۳

چکیده

با گسترش سامانه‌های حمل و نقل ریلی شهری و افزایش اهمیت کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، بازیابی انرژی ترمز احیاکننده به یکی از مؤلفه‌های کلیدی در ارتقای بهره‌وری انرژی شبکه‌های ریلی تبدیل شده است. در این میان، سامانه‌های ذخیره سازی انرژی فلابویل مجهز به یاتاقان‌های مغناطیسی، به دلیل چگالی توان بالا، قابلیت شارژ و دشارژ سریع، راندمان چرخه‌ای مطلوب، عمر بهره‌برداری طولانی و نیاز اندک به تعمیر و نگهداری، به عنوان یکی از گزینه‌های امیدبخش برای ذخیره سازی انرژی در سامانه‌های مترو مطرح هستند. پژوهش حاضر با هدف طراحی، مدل سازی و بهینه سازی عملکرد سامانه ذخیره سازی انرژی فلابویل با یاتاقان مغناطیسی، چارچوبی یکپارچه برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده، پشتیبانی توان کششی و ارتقای بهره‌وری انرژی در سامانه‌های حمل و نقل ریلی شهری ارائه می‌دهد. در این چارچوب، طراحی سازه فلابویل، انتخاب مواد روتور، مدل سازی یاتاقان‌های مغناطیسی، کوپلینگ الکترومکانیکی موتور-ژنراتور، مدیریت حرارتی و یکپارچه سازی سامانه ذخیره سازی با شبکه تغذیه کشش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اثر پارامترهای مؤثر بر پایداری دینامیکی روتور، کنترل ارتعاشات، رفتار گذرا، مدیریت جریان توان و راهبردهای بهینه سازی عملکرد سامانه در شرایط مختلف بهره‌برداری تحلیل شده است. افزون بر این، چالش‌های فنی و اجرایی از جمله هزینه بالای مواد پیشرفته، پیچیدگی کنترل یاتاقان‌های مغناطیسی، محدودیت‌های حرارتی و الزامات قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفته و راهکارهایی برای بهبود عملکرد و تسهیل پیاده سازی عملی این فناوری ارائه شده است. نتایج این پژوهش، مبنایی علمی و مهندسی برای توسعه سامانه‌های ذخیره سازی انرژی فلابویل با راندمان بالا فراهم می‌آورد و ظرفیت این فناوری را در افزایش بازیابی انرژی ترمز، پشتیبانی توان، کاهش نوسانات شبکه کشش و ارتقای بهره‌وری انرژی در سامانه‌های حمل و نقل ریلی شهری تبیین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیستم ذخیره سازی انرژی فلابویل با یاتاقان مغناطیسی، بازیابی انرژی ترمز احیاکننده، پشتیبانی توان کششی، بهینه سازی چندهدفه عملکرد سیستم؛ مدیریت انرژی در حمل و نقل ریلی شهری، یکپارچه سازی سیستم ذخیره سازی با شبکه کشش

۱-مقدمه

با تشدید تغییرات اقلیمی جهانی و افزایش تنش‌های مرتبط با امنیت انرژی، بسیاری از کشورها فرآیند گذار از سامانه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به سمت منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر را تسریع کرده‌اند. با این حال، ماهیت متغیر و وابسته به شرایط

محیطی منابعی همچون انرژی باد و خورشید، چالش‌های جدی در حفظ پایداری و کیفیت توان شبکه‌های قدرت ایجاد کرده است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). نفوذ روزافزون تولیدات فتوولتائیک در شبکه، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ، می‌تواند موجب تشدید نوسانات توان، افزایش انحرافات فرکانسی و در نتیجه تحمیل هزینه‌های اقتصادی قابل‌توجه ناشی از اختلال در عملکرد شبکه شود. در این میان، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی برای ایجاد تعادل میان تولید و مصرف و ارتقای انعطاف‌پذیری شبکه‌های قدرت مطرح شده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۵).

فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی را می‌توان بر اساس نقش عملکردی به دو دسته کلی «انرژی‌محور» و «توان‌محور» طبقه‌بندی کرد (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴). سامانه‌های انرژی‌محور، نظیر باتری‌های لیتیوم-یون و نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای، عمدتاً برای ذخیره‌سازی بلندمدت انرژی و کاربردهایی مانند کاهش پیک بار، پرکردن دره بار و تأمین توان پشتیبان طراحی شده‌اند. در مقابل، سامانه‌های توان‌محور شامل ابرخازن‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، برای پاسخ‌دهی سریع، پشتیبانی لحظه‌ای توان و ارائه خدماتی همچون تنظیم فرکانس و تثبیت ولتاژ به کار می‌روند. این دو دسته فناوری به‌صورت مکمل، امکان طراحی شبکه‌های قدرت مدرن با سطح بالایی از انعطاف‌پذیری و پایداری را فراهم می‌سازند (نظری و کیپور، ۲۰۲۳).

از منظر فناوری، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر مکانیزم‌های متنوعی از جمله الکتروشیمیایی، مکانیکی، الکترومغناطیسی، ترموشیمیایی، هیدروژنی و حرارتی توسعه یافته‌اند (نادیم و همکاران، ۲۰۲۴). هر یک از این فناوری‌ها دارای ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و حوزه‌های کاربردی خاص خود هستند. برای نمونه، فناوری‌های ذخیره‌سازی شیمیایی علی‌رغم بلوغ صنعتی و کاربرد گسترده، با محدودیت‌هایی همچون کاهش عمر مفید، حساسیت به شرایط محیطی و چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از دفع باتری‌ها مواجه‌اند. در مقابل، اگرچه فناوری‌های ابررسانا از نظر راندمان و تلفات انرژی عملکرد مطلوبی دارند، نیاز به شرایط دمایی بسیار پایین و زیرساخت‌های پیچیده، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود کرده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، ابرخازن‌ها با وجود توانایی پاسخ‌دهی بسیار سریع، از چگالی انرژی پایین برخوردار بوده و برای کاربردهای بلندمدت مناسب نیستند. همان‌گونه که در جدول ۱ آمده است، بررسی شاخص‌های عملکردی فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی بیانگر برتری ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در کاربردهای توان‌محور، پاسخ سریع و چرخه‌عمر بالا است.

جدول ۱. مقایسه شاخص‌های عملکردی فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی (منبع: جیا و همکاران، ۲۰۲۶)

شاخص‌های عملکردی	ذخیره‌سازی شیمیایی (باتری‌های الکتروشیمیایی)	ذخیره‌سازی ابررسانا (SMES)	ذخیره‌سازی ابرخازن (Supercapacitor)	ذخیره‌سازی فلایویل (FESS)
راندمان چرخه‌ای (%)	۷۰-۸۰	۸۰-۸۵	۸۰-۹۵	۸۵-۹۵
چگالی انرژی (Wh/kg)	۳-۱۵	۱-۱۰	۲/۱۰-۱	۵-۱۵۰
عمر مفید (سال)	۳-۱۵	>۲۰	>۲۰	>۲۰
بازه دمای عملیاتی	-۱۰ تا +۳۰ °C	K تا ۴.۲۷۷	-۳۰ تا +۵۰ °C	-۴۰ تا +۵۰ °C
ویژگی شاخص عملکردی	مناسب برای ذخیره‌سازی بلندمدت، اما محدود به چرخه عمر و مسائل زیست‌محیطی	راندمان بالا، اما نیازمند دمای بسیار پایین و زیرساخت پیچیده	پاسخ بسیار سریع، اما با چگالی انرژی پایین	چگالی توان بالا، پاسخ سریع، عمر طولانی و مناسب برای کاربردهای توان‌محور

پژوهشگران و صنعتگران عمل کند. در نهایت، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که توسعه و به‌کارگیری گسترده سامانه‌های فلاپویل با یاتاقان مغناطیسی می‌تواند نقشی مهم در ارتقای پایداری شبکه‌های قدرت آینده، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و حرکت به‌سوی سیستم‌های انرژی هوشمند و پایدار ایفا نماید.

۲- ساختار و اصل عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل

(چرخ طیار)

۲-۱- طراحی و معماری سیستم ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل با تعلیق یاتاقان مغناطیسی

سیستم ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل یک سامانه چندرشته‌ای پیچیده است که به‌طور هم‌زمان از اصول مهندسی مکانیک، الکترومغناطیس، الکترونیک قدرت و کنترل پیشرفته بهره می‌گیرد. این سامانه عموماً از اجزای اصلی شامل روتور فلاپویل، سیستم یاتاقان مغناطیسی (تعلیق بدون تماس)، واحد موتور/ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، سیستم کنترل و زیرسامانه مدیریت حرارتی و خلأ تشکیل شده است (چی و همکاران، ۲۰۲۵). تعامل هماهنگ این اجزا، یک ساختار یکپارچه را شکل می‌دهد که قابلیت ذخیره‌سازی، نگهداری و آزادسازی انرژی را با راندمان بالا فراهم می‌سازد (لی و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۲- تحلیل چرخه‌های شارژ، نگهداری و دشارژ در سیستم

ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل بر پایه تبدیل الکتریکی-دورانی

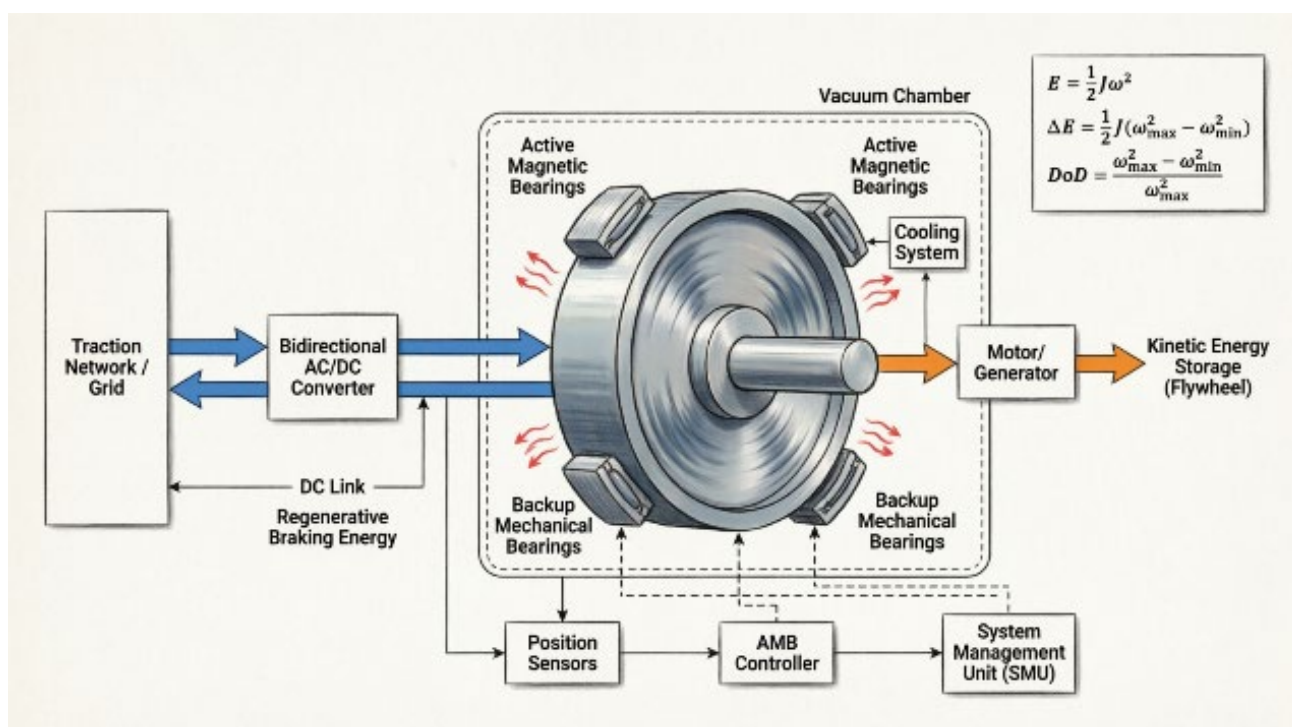
عملکرد سیستم فلاپویل بر پایه تبدیل دوطرفه انرژی الکتریکی و انرژی جنبشی دورانی، مطابق با قانون بقای انرژی و روابط حاکم بر انرژی جنبشی دورانی استوار است (ما و لی، ۲۰۲۴). چرخه عملکرد این سیستم به سه حالت اصلی شامل شارژ (ذخیره‌سازی انرژی)، نگهداری و دشارژ (آزادسازی انرژی) تقسیم می‌شود (یانو و همکاران، ۲۰۲۵). روند کلی این چرخه در شکل ۱ نشان داده شده است.

در میان فناوری‌های مختلف، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از چگالی توان بالا، عمر چرخه‌ای طولانی، پاسخ‌دهی در مقیاس میلی‌ثانیه و عدم وابستگی به شرایط سخت محیطی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های برتر در کاربردهای توان‌محور شناخته می‌شوند. اساس عملکرد این سامانه‌ها بر تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی جنبشی ذخیره‌شده در روتور دوار با سرعت بالا و بازیافت آن از طریق ماشین الکتریکی در زمان نیاز استوار است (تانگ، ۲۰۲۴). این ویژگی‌ها، ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل را به فناوری‌ای راهبردی برای کاربردهایی نظیر تنظیم فرکانس، تثبیت شبکه، سیستم‌های منبع تغذیه بدون وقفه و پشتیبانی از منابع انرژی تجدیدپذیر تبدیل کرده است (اینگاله و مانکار، ۲۰۲۰).

با وجود مزایای قابل‌توجه، توسعه و بهره‌برداری از سامانه‌های فلاپویل همچنان با چالش‌های فنی متعددی روبه‌رو است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به پیچیدگی طراحی و کنترل موتورهای سنکرون آهنربای دائم، تغییرپذیری پارامترهای الکتریکی تحت شرایط حرارتی و بارگذاری مختلف، و محدودیت‌های ناشی از استفاده از حسگرهای مکان‌یابی در سرعت‌های بالا اشاره کرد. این عوامل می‌توانند موجب کاهش دقت کنترل، افزایش خطاهای تخمین حالت و در نهایت، کاهش پایداری عملکرد سیستم شوند (گانو و همکاران، ۲۰۲۴).

در این راستا، این مقاله مروری جامع و نظام‌مند بر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل مبتنی بر یاتاقان‌های مغناطیسی ارائه می‌دهد. تمرکز این پژوهش بر تحلیل و یکپارچه‌سازی جنبه‌های کلیدی شامل طراحی و بهینه‌سازی ساختار روتور، انواع یاتاقان‌های مغناطیسی (فعال، غیرفعال و هیبریدی)، راهکارهای کنترل پیشرفته و فناوری‌های مدیریت حرارتی در محیط‌های خلأ و سرعت‌های بالا است. علاوه بر این، چالش‌های اساسی از جمله پایداری روتور در شرایط حدی، هزینه بالای مواد پیشرفته و محدودیت‌های حسگرها مورد بررسی قرار گرفته و مسیرهای تحقیقاتی نوظهور برای بهبود عملکرد سیستم معرفی شده‌اند.

از منظر کاربردی، این مطالعه چارچوبی جامع از «طراحی سیستم تا کنترل و بهره‌برداری صنعتی» برای ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان مرجعی ارزشمند برای



تصویر ۱. شماتیک عملکردی سیستم ذخیره‌سازی انرژی فلابویل

(۱) مرحله شارژ (ذخیره‌سازی انرژی)

در این مرحله، مبدل الکترونیک قدرت نقش کلیدی در مدیریت جریان انرژی ایفا می‌کند. توان الکتریکی AC ورودی ابتدا به DC تبدیل شده و سپس به موتور/ژنراتور اعمال می‌شود. ماشین الکتریکی در حالت موتوری عمل کرده و انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی دورانی تبدیل می‌کند که موجب افزایش سرعت زاویه‌ای روتور فلابویل می‌شود (سون و همکاران، ۲۰۲۵). انرژی ذخیره‌شده در فلابویل مطابق رابطه انرژی جنبشی دورانی به صورت زیر تعریف می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴).

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2 \quad (۱)$$

که در آن (J) ممان اینرسی روتور، (m) جرم معادل، (r) شعاع مؤثر و ω سرعت زاویه‌ای روتور است.

در فرآیند شارژ، رابطه بین توان، گشتاور و سرعت زاویه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود (فانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

(۲)

$$T = \frac{P}{\omega}$$

که در آن (T) گشتاور الکترومغناطیسی و (P) توان ورودی به ماشین الکتریکی است.

(۲) مرحله نگهداری انرژی

در این حالت، سیستم در وضعیت پایدار و بدون تبادل خالص انرژی قرار دارد. فلابویل با سرعت تقریباً ثابت در حال چرخش است و موتور/ژنراتور در حالت بی‌باری یا جبران‌کننده حداقل تلفات عمل می‌کند. در این وضعیت، تنها تلفات مکانیکی و الکترومغناطیسی (از جمله اصطکاک باقیمانده، تلفات بادزنی و تلفات الکتریکی جزئی) باید توسط سیستم جبران شوند تا سرعت مطلوب حفظ گردد. این حالت نقش مهمی در کاربردهای متصل به شبکه و سامانه‌های بر روی قطار ایفا می‌کند (هو و همکاران، ۲۰۲۴).

(۳) مرحله دشارژ (آزادسازی انرژی)

در این مرحله، ماشین الکتریکی از حالت موتوری به حالت ژنراتوری تغییر وضعیت می‌دهد. کاهش تدریجی سرعت روتور موجب تبدیل انرژی جنبشی ذخیره‌شده به انرژی الکتریکی و تزریق آن به شبکه یا بار مصرفی می‌شود. توان خروجی در این حالت متناسب با نرخ کاهش انرژی جنبشی است و سیستم قادر به ارائه پاسخ دینامیکی بسیار سریع می‌باشد. این ویژگی، FESS را برای کاربردهایی نظیر تنظیم فرکانس و جبران توان گذرا بسیار مناسب می‌سازد (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال،

جرم روتور توخالی

$$m = \pi \rho h (R_o^2 - r_i^2) \quad (9)$$

ممان اینرسی و انرژی فلاپویل توخالی:

$$J_{hollow} = \frac{1}{2} \pi \rho h (R_o^4 - r_i^4) \quad (10)$$

$$EJ_{hollow} = \frac{1}{2} \pi \rho h \omega^2 (R_o^4 - r_i^4) \quad (11)$$

در این روابط، ρ چگالی ماده و h ضخامت یا ارتفاع روتور است.

کاربرد در سیستم‌های انرژی بادی

در کاربردهای انرژی بادی، سیستم‌های فلاپویل به‌عنوان یک فناوری کلیدی برای جبران ماهیت متناوب توان خروجی توربین‌های بادی عمل می‌کنند. این سامانه‌ها قادرند نوسانات توان را هموارسازی کنند، پیروی از برنامه تولید را بهبود بخشند و در خدمات کمکی شبکه نظیر تنظیم فرکانس و پیک‌سایی مشارکت نمایند (گارسپا و همکاران، ۲۰۱۷). به دلیل پاسخ‌دهی بسیار سریع در مقیاس میلی‌ثانیه، FESS قادر است افت‌های فرکانسی گذرا را به‌طور مؤثر مهار کرده و پایداری دینامیکی شبکه را ارتقا دهد. در نتیجه، استفاده از این فناوری در مزارع بادی موجب کاهش وابستگی به واحدهای تولید سنتی، افزایش نفوذپذیری انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت آینده می‌شود (شو و فانگ، ۲۰۱۹).

۳- تحلیل فناوری‌های کلیدی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل (چرخ لنگر)

۳-۱- طراحی و بهینه‌سازی روتور فلاپویل در سامانه‌های

ذخیره‌سازی انرژی: رویکردی بر سازه و مواد

روتور فلاپویل، مؤلفه اصلی و هسته سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل است و عملکرد آن تأثیر مستقیمی بر ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، بازده و پایداری عملیاتی کل سامانه دارد. طراحی روتور عمدتاً بر دو محور اساسی، یعنی بهینه‌سازی سازه‌ای و انتخاب مواد، متمرکز است.

به دلیل محدودیت‌های فیزیکی در محدوده سرعت عملیاتی روتور، امکان استخراج کامل انرژی نظری وجود ندارد. انرژی قابل استفاده واقعی به صورت زیر بیان می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۵):

$$E = \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (3)$$

در این رابطه، ω_{min}^2 و ω_{max}^2 به ترتیب بیشینه و کمینه سرعت زاویه‌ای مجاز سیستم هستند. این محدودیت‌ها عمدتاً ناشی از استحکام مکانیکی مواد روتور بوده و در روتورهای فلزی توسط تنش تسلیم و در مواد کامپوزیتی مانند CFRP توسط تنش کششی نهایی تعیین می‌شوند. برای ارزیابی میزان بهره‌برداری از ظرفیت انرژی، پارامتر «عمق دشارژ» تعریف می‌شود (هو و همکاران، ۲۰۲۶).

$$DOD = \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} \quad (4)$$

ممان اینرسی روتورها

ممان اینرسی برای روتورهای ایده‌آل به صورت زیر تعریف می‌شود.

فلاپویل توپر

$$J_{solid} = \frac{1}{2} m r^2 \quad (5)$$

فلاپویل توخالی

$$J_{hollow} = \frac{1}{2} m (R_o^2 + r_i^2) \quad (6)$$

در این روابط، R_o شعاع خارجی و r_i شعاع داخلی روتور توخالی است. این روابط بر اساس فرض چگالی یکنواخت و هندسه ساده‌شده استخراج شده‌اند (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۰). برای مدل پیوسته با چگالی جرمی یکنواخت ρ و ارتفاع h ، روابط دقیق‌تر به صورت زیر ارائه می‌شوند.

$$J_{solid} = \frac{1}{2} \pi \rho h r^4 \quad (7)$$

$$E_{solid} = \frac{1}{2} \pi \rho h \omega^2 r^4 \quad (8)$$

تحلیل فناوری‌های کلیدی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل (چرخ لنگر)

طراحی و بهینه‌سازی روتور فلاپویل در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی: رویکردی بر سازه و مواد

روتور فلاپویل، مؤلفه اصلی و هسته سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل است و عملکرد آن تأثیر مستقیمی بر ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، بازده و پایداری عملیاتی کل سامانه دارد. طراحی روتور عمدتاً بر دو محور اساسی، یعنی بهینه‌سازی سازه‌ای و انتخاب مواد، متمرکز است (یوننه، ۲۰۱۰).

تحلیل تطبیقی ساختارهای دیسک جامد و پره‌ای در طراحی

روتور فلاپویل برای بهینه‌سازی چگالی انرژی و توزیع تنش از دیدگاه سازه‌ای، در طراحی روتور فلاپویل باید شاخص‌هایی همچون ممان اینرسی (لختی دورانی) و نحوه توزیع تنش با دقت مورد توجه قرار گیرند. ساختارهای متداول روتور شامل دیسک جامد و پره‌ای هستند. ساختار دیسک جامد، اگرچه از نظر ساخت و تولید ساده‌تر است، معمولاً ممان اینرسی نسبتاً کمتری ایجاد می‌کند. در مقابل، در ساختار پره‌ای، با طراحی بهینه تعداد، شکل و آرایش پره‌ها می‌توان ضمن کاهش جرم روتور، ممان اینرسی آن را افزایش داد. افزون بر این، این ساختار موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکز تنش در بخش‌های بحرانی روتور می‌شود که در نهایت، قابلیت اطمینان، ایمنی و پایداری عملکرد سامانه را بهبود می‌بخشد (ماکسنس و همکاران، ۲۰۲۰). روتور فلاپویل به‌عنوان جزء اصلی ذخیره‌سازی انرژی، انرژی مکانیکی را به‌صورت انرژی جنبشی دورانی و در سرعت‌های زاویه‌ای بالا ذخیره می‌کند. شایان ذکر است که تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و بالعکس، توسط موتور/ژنراتور انجام می‌شود و روتور صرفاً وظیفه ذخیره‌سازی انرژی را بر عهده دارد. ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در این سامانه‌ها تابعی از ممان اینرسی روتور و مجذور سرعت زاویه‌ای آن است، در حالی که مقدار ممان اینرسی عمدتاً به جرم و ابعاد هندسی روتور وابسته است. از این رو، افزایش هر یک از این دو

پارامتر می‌تواند ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی را افزایش دهد، هرچند این افزایش همواره با محدودیت‌های مکانیکی، تنش و مواد سازنده روتور همراه است (کومار و همکاران، ۲۰۱۹). چگالی انرژی ذخیره‌شده در روتور فلاپویل نیز به‌صورت نسبت ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی به جرم روتور تعریف می‌شود.

$$e_m = E_m = K_s \sigma_{max} \rho \quad (12)$$

در معادله (۹)، ضریب شکلی روتور فلاپویل با K_s ، حداکثر تنش مجاز با σ_{max} و چگالی ماده با ρ نشان داده شده‌اند. بر اساس این معادله، برای دستیابی به چگالی انرژی ذخیره‌سازی بالاتر e_m ، می‌توان از موادی با استحکام بالا و چگالی پایین در ساخت روتور فلاپویل استفاده کرد. افزون بر این، هندسه‌ها و پیکربندی‌های مختلف روتور فلاپویل دارای ضرایب شکلی متفاوتی هستند که به‌طور مستقیم بر چگالی انرژی ذخیره‌شده تأثیر می‌گذارند (یو و همکاران، ۲۰۱۶). انواع ساختارها، اشکال روتور و ضرایب شکلی متناظر با آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. از دیدگاه انتخاب مواد، فلاپویل‌های اولیه عمدتاً از مواد فلزی، به‌ویژه فولاد، ساخته می‌شدند. با این حال، چگالی زیاد و استحکام کششی محدود این مواد، حداکثر سرعت دورانی و در نتیجه چگالی انرژی ذخیره‌سازی فلاپویل را محدود می‌کند. جدول ۳ پارامترهای مشخصه مواد رایج مورد استفاده در ساخت روتور فلاپویل را نشان می‌دهد. با پیشرفت علم مواد، کامپوزیت‌های الیاف کربن به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر استحکام ویژه بالا، چگالی کم و مدول الاستیسیته زیاد، به گزینه‌ای مطلوب برای ساخت فلاپویل‌های با کارایی بالا تبدیل شده‌اند. روتورهای ساخته‌شده از کامپوزیت‌های الیاف کربن قادرند سرعت‌های دورانی بسیار بالاتری را تحمل کنند و در نتیجه انرژی بیشتری ذخیره نمایند (آزوکیزاوا و همکاران، ۲۰۱۸). برای نمونه، حداکثر سرعت دورانی برخی فلاپویل‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های الیاف کربن می‌تواند به ده‌ها هزار دور بر دقیقه برسد که این ویژگی، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی سیستم را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

جدول ۲. انواع متداول روتورهای فلاپویل، ویژگی‌های هندسی و ضریب شکلی متناظر

نوع روتور	ویژگی هندسی	محدوده ضریب شکلی (K _s)	ویژگی‌های عملکردی
دیسک با تنش یکنواخت	ضخامت متغیر به صورت تابعی از شعاع به منظور یکنواخت سازی تنش	0.95–1.00	بیشترین چگالی انرژی، بهترین توزیع تنش، طراحی بهینه، ساخت پیچیده
دیسک جامد	دیسک توپر با ضخامت یکنواخت	0.606	ساخت ساده، هزینه پایین، مناسب سرعت‌های متوسط
دیسک توخالی	دیسک دارای سوراخ مرکزی با ضخامت یکنواخت	وابسته به 0.55–0.80 نسبت شعاع داخلی به خارجی	کاهش تمرکز تنش، قابلیت دستیابی به سرعت‌های بالاتر نسبت به دیسک جامد
حلقه ضخیم	حلقه با ضخامت شعاعی قابل توجه	0.60–0.80	مناسب فلاپویل‌های کامپوزیتی چندلایه، تنش محیطی کمتر از حلقه نازک
حلقه دیواره نازک	حلقه با ضخامت بسیار کم نسبت به شعاع	0.5	بیشترین تنش محیطی، ساخت ساده، کاربرد محدود در سرعت‌های بسیار بالا
روتور چندحلقه‌ای	چند حلقه هم‌مرکز با پیش‌تندگی یا اتصال انقباضی	0.80–0.95	توزیع تنش بهینه، ظرفیت انرژی بالا، مناسب فلاپویل‌های پیشرفته
روتور کامپوزیتی چندلایه	لایه‌های متعدد الیاف کربن با جهت‌گیری کنترل شده	0.90–1.00	مناسب سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با سرعت فوق‌بالا، نسبت استحکام به وزن بسیار زیاد

جدول ۳. خواص مکانیکی مواد متداول مورد استفاده در ساخت روتورهای فلاپویل

ماده	چگالی (kg/m ³)	استحکام کششی یا تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	استحکام ویژه (N·m/kg ۱۰ ^۳ ×)	کاربرد و ویژگی اصلی
فولاد آلیاژی AISI 4340	7850	850–1100	205–211	0.29	108–140	هزینه پایین، ماشین‌کاری آسان، مناسب فلاپویل‌های سرعت متوسط
فولاد مارجنینگ (Maraging Steel)	8000	1800–2400	190–200	0.3	225–300	استحکام بسیار بالا، مناسب فلاپویل‌های پرسرعت فلزی
آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V	4430	900–1100	110–115	0.34	203–248	نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت مناسب در برابر خوردگی
آلیاژ آلومینیوم T6-۷۰۷۵	2810	500–570	71–72	0.33	178–203	وزن کم، مناسب نمونه‌های آزمایشگاهی و فلاپویل‌های کوچک
کامپوزیت الیاف شیشه (GFRP)	1900–2100	900–1500	35–55	0.25–0.30	430–710	قیمت پایین، عملکرد متوسط، جایگزین اقتصادی
کامپوزیت الیاف کربن (CFRP)	1550–1700	1800–3500*	120–300**	0.25–0.34	1100–2200	مناسب فلاپویل‌های سرعت فوق‌بالا، بیشترین چگالی انرژی
کامپوزیت هیبریدی کربن/شیشه	1700–1900	1500–2500	80–180	0.28–0.33	850–1400	ایجاد تعادل میان هزینه، استحکام و قابلیت اطمینان

کاربردی برای انتخاب جنس روتور فلایویل متناسب با الزامات و نیازهای گوناگون مهندسی فراهم می‌آورد.

مروری بر راهبردهای بهینه‌سازی روتور در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل پرسرعت: از انتخاب مواد تا طراحی سازه‌ای

در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، بهینه‌سازی روتور یکی از عوامل کلیدی در ارتقای عملکرد، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود بهره‌وری کلی سامانه محسوب می‌شود. با افزایش سرعت چرخش روتورهای متداول به بیش از ۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه، چالش‌هایی نظیر تمرکز تنش، افزایش تنش‌های گریز از مرکز و رشد مصرف انرژی ناشی از جرم زیاد روتور پدیدار می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی روتور از جنبه‌های مختلف، از جمله انتخاب مواد، طراحی هندسی و بهینه‌سازی اجزای سازه‌ای، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (سوپریت و همکاران، ۲۰۲۵). در سال‌های اخیر، پژوهشگران مطالعات متعددی در زمینه انتخاب مواد، طراحی سازه و بهینه‌سازی اجزای اتصال انجام داده‌اند تا اهدافی همچون کاهش تنش، افزایش چگالی انرژی و بهبود پایداری دینامیکی سامانه را محقق سازند. انتخاب ماده، نخستین و مهم‌ترین گام در فرآیند بهینه‌سازی روتور به شمار می‌رود. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، به دلیل استحکام ویژه بالا و چگالی پایین، از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای افزایش چگالی انرژی روتورهای فلایویل محسوب می‌شوند. افزون بر این، بهینه‌سازی آرایش الیاف و نسبت رزین می‌تواند عملکرد مکانیکی و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی این روتورها را بیش از پیش بهبود بخشد (کوشوها و همکاران، ۲۰۲۴). در مقابل، مواد با چگالی بالا، نظیر آلیاژهای تنگستن، اگرچه موجب افزایش جرم کلی روتور می‌شوند، اما در برخی کاربردهای خاص می‌توانند با افزایش ممان اینرسی، چگالی انرژی ذخیره‌سازی را تا حدودی ارتقا دهند (دومون و همکاران، ۲۰۲۰). در حوزه طراحی سازه‌ای، بهینه‌سازی هندسه روتور با هدف کاهش مصرف مواد و توسعه ساختارهای سبک‌وزن، نقش مهمی در افزایش چگالی انرژی ایفا می‌کند. استفاده از طرح‌هایی نظیر روتورهای توخالی یا توزیع بهینه ماده، ضمن حفظ استحکام و سختی مورد نیاز، موجب کاهش جرم روتور و بهبود عملکرد آن می‌شود. در تحقیق لیم و همکاران (۲۰۲۴) نوع جدیدی از سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل با آرایش عمودی و ساختار متقارن

در میان سه دسته اصلی مواد مورد استفاده در ساخت فلایویل (چرخ‌لنگر)، فلایویل‌های ساخته‌شده از آلیاژهای تیتانیوم، ظرفیت نسبتاً بالایی برای ذخیره‌سازی انرژی دارند. این فلایویل‌ها، علاوه بر برخورداری از تنش داخلی پایین و تغییر شکل ناچیز، دارای خواص مکانیکی برتری نیز هستند. با این حال، هزینه بسیار بالای تولید، مانع از کاربرد گسترده آن‌ها در مقیاس صنعتی شده است. از این رو، استفاده از این آلیاژها عمدتاً به حوزه‌های پیشرفته‌ای محدود می‌شود که الزامات عملکردی بسیار سخت‌گیرانه‌ای برای ذخیره‌سازی انرژی دارند؛ از جمله صنایع هوافضا و سامانه‌های تأمین برق بدون وقفه (UPS) در مراکز کنترل و تولید (ووس و همکاران، ۲۰۲۶). فلایویل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن، در مقایسه با دو گروه ماده دیگر، بالاترین چگالی انرژی ویژه را ارائه می‌دهند. این مواد، علاوه بر تنش داخلی پایین، تغییر شکل اندک و وزن کم، سازگاری مطلوبی با روتورهای بزرگ و سرعت‌های چرخشی بالا دارند که به افزایش ایمنی عملیاتی آن‌ها منجر می‌شود. از آنجا که CFRP یک کامپوزیت ذاتاً شکننده است و فاقد حد تسلیم مشخص است، مقاومت آن معمولاً بر اساس استحکام کششی نهایی ارزیابی می‌شود که مقدار متداول آن در حدود ۲۰۰۰ مگاپاسکال است (وانگ و ژانگ، ۲۰۲۶). مجموعه این ویژگی‌ها، کامپوزیت‌های CFRP را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی تبدیل کرده است که در آن‌ها ایمنی بالا و وزن کم از اولویت‌های اصلی به شمار می‌روند؛ از جمله سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی نصب‌شده روی وسیله نقلیه در خودروهای الکتریکی و کشتی‌ها. اگرچه فلایویل‌های ساخته‌شده از فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ دارای تنش داخلی و تغییر شکل نسبتاً زیاد، چگالی انرژی ذخیره‌سازی پایین و محدودیت در تحمل سرعت‌های چرخشی بسیار بالا هستند، چگالی زیاد این فولاد همچنان امکان دستیابی به عملکردی قابل قبول در ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه در سرعت‌های چرخشی متوسط، را فراهم می‌کند. افزون بر این، هزینه پایین و فناوری ساخت بالغ و توسعه‌یافته این ماده، زمینه‌ساز کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف شده است. از این رو، فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ در حال حاضر یکی از پرکاربردترین مواد برای ساخت روتور فلایویل به شمار می‌رود (اسپنهان و هونه، ۲۰۲۶). تحلیل تطبیقی ارائه‌شده، که بر پایه داده‌های جدول ۳ و با در نظر گرفتن عملکرد، هزینه و سناریوهای کاربردی مواد مختلف انجام شده است، مرجعی جامع، شفاف و

طراحی و پیاده‌سازی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که سرعت بحرانی روتور تحت تأثیر تغییرات تنش تماسی قرار دارد و این یافته می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی روتورهای مشابه باشد. همچنین، در تحقیق وانگ و همکاران (۲۰۲۳) رفتار انواع فلاپیول‌های ساخته‌شده از آلیاژهای با استحکام بالا تحت شرایط مختلف تنش بررسی شد و آزمایش‌های تعلیق مغناطیسی و چرخه‌های شارژ و دشارژ نیز انجام گرفت. بر پایه نتایج این مطالعه، طرحی برای طراحی سامانه شفت مناسب جهت چرخش در سرعت‌های بالا ارائه شد که در مقایسه با سامانه‌های متداول موتورهای پرسرعت و تجهیزات تعلیق مغناطیسی، عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داد. در ادامه این پژوهش، نمونه اولیه یک سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلاپیول با تعلیق کاملاً مغناطیسی، با ظرفیت ۴۰۰ کیلووات/۲۵ مگاژول و سرعت چرخش ۱۸۰۰۰ دور بر دقیقه توسعه یافت. در تحقیق ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) با در نظر گرفتن استحکام نهایی ماده به‌عنوان قید طراحی، از روش تبدیل جامع برای تبدیل هم‌زمان سرعت چرخش فلاپیول و ممان اینرسی بر واحد جرم به پارامترهای هندسی بهینه روتور استفاده شد. این پژوهش، روابط کمی میان شاخص‌های عملکردی فلاپیول و پارامترهای کلیدی طراحی را استخراج کرد و نشان داد که افزایش چگالی انرژی مستلزم کاهش محدودیت‌های ناشی از فرآیند ساخت و دستیابی به ضرایب شکل بهینه است. در تحقیق ژو و همکاران (۲۰۲۵) نیز سه ماده شامل آلیاژ تیتانیوم، آلیاژ آلومینیوم و فولاد کروم‌دار با کربن متوسط انتخاب شدند و رفتار تنش‌تویپی و طوقه آن‌ها در سرعت‌های مختلف چرخش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحلیل شد. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ آلومینیوم برای ساخت تویپی، در مقایسه با دو ماده دیگر، امکان استفاده از طوقه‌ای با جرم بیشتر را فراهم کرده و در نتیجه، دستیابی به چگالی انرژی ذخیره‌سازی بالاتر را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، در تحقیق ووس و همکاران (۲۰۲۶) با بهره‌گیری از نظریه کنترل بهینه، چگالی انرژی ذخیره‌سازی به‌عنوان تابع هدف و تنش به‌عنوان قید طراحی در نظر گرفته شد و شکل بهینه روتورهای فلاپیول برای محدوده‌های مختلف سرعت، شامل سرعت‌های پایین، متوسط و بالا، تعیین گردید. در مجموع، رویکردهای کنونی بهینه‌سازی روتور فلاپیول طیف گسترده‌ای از جنبه‌ها، از جمله انتخاب مواد، طراحی سازه‌ای و بهینه‌سازی اتصالات را در بر می‌گیرند و این راهکارها به‌صورت مکمل و هم‌افزا در ارتقای

عملکرد سامانه نقش دارند. انتظار می‌رود پژوهش‌های آینده با تمرکز بر توسعه مواد پیشرفته، تعمیق بهینه‌سازی سازه‌ای تحت شرایط کوپلینگ چندفیزیکی و انجام بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن فرآیندهای ساخت، هزینه و قابلیت تولید، زمینه را برای توسعه و کاربرد گسترده‌تر فناوری ذخیره‌سازی انرژی فلاپیول در سامانه‌های پیشرفته فراهم سازند.

طبقه‌بندی و تحلیل عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپیول: از ساختارهای فعال و غیرفعال تا رویکردهای ترکیبی

یاتاقان‌های تعلیق مغناطیسی از فناوری‌های کلیدی در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌لنگر هستند. این سامانه‌ها با استفاده از نیروهای الکترومغناطیسی، تعلیق بدون تماس روتور را فراهم می‌کنند. در نتیجه، اصطکاک مکانیکی حذف شده و بازده و عمر کاری سیستم افزایش می‌یابد. یاتاقان‌های مغناطیسی به سه دسته اصلی شامل فعال، غیرفعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند (ماسوزاوا و همکاران، ۲۰۱۸). یاتاقان‌های مغناطیسی فعال: شامل الکترومگنت، حسگر جابه‌جایی، کنترل‌کننده و تقویت‌کننده توان هستند. موقعیت روتور به‌صورت بلادرنگ اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال خطا تولید شده و جریان کنترلی توسط کنترل‌کننده محاسبه می‌گردد. سپس تقویت‌کننده توان، جریان لازم برای الکترومگنت‌ها را اعمال می‌کند تا نیروی تعلیق تولید شود (بلومنستاک و براون، ۲۰۱۵). این یاتاقان‌ها دارای دقت بالا و قابلیت کنترل کامل در چند درجه آزادی هستند و برای کاربردهای دقیق مناسب‌اند (بلومنستاک و براون، ۲۰۱۱). یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال: شامل سه زیرگروه اصلی هستند.

مغناطیس دائم: تعلیق از طریق نیروهای جاذبه/دافعه بین آهنرباهای دائم ایجاد می‌شود. سیستم ساده است و نیازی به توان خارجی ندارد. با این حال، پایداری کامل در شش درجه آزادی به‌تنهایی حاصل نمی‌شود و معمولاً نیازمند ساختار کمکی است (دلینگر و همکاران، ۲۰۰۵).

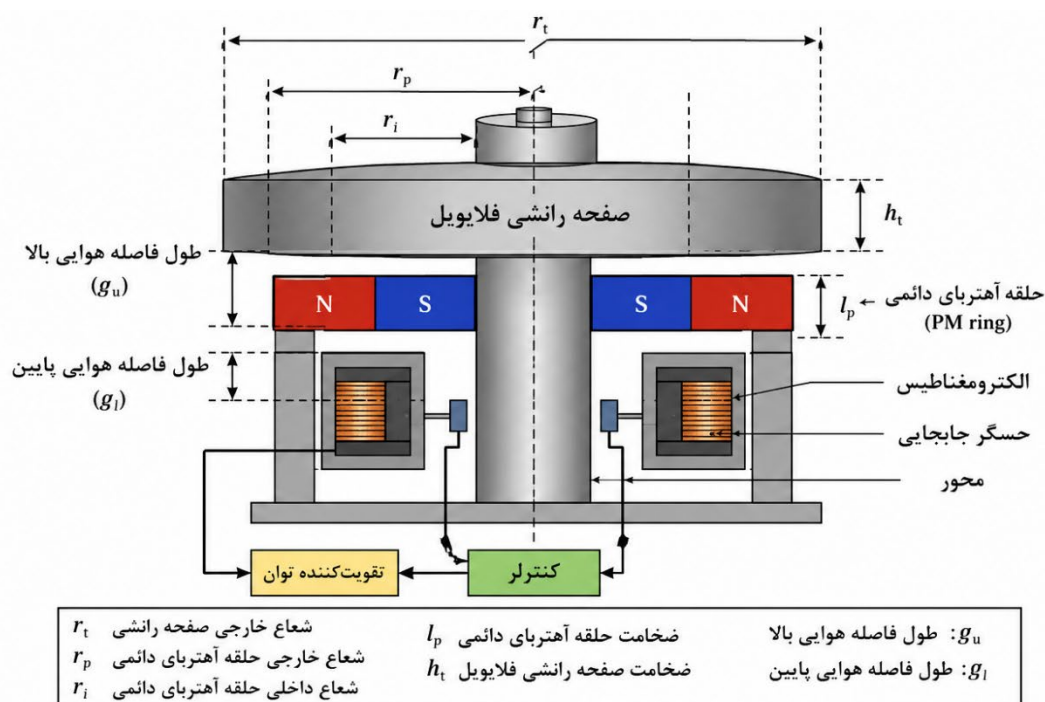
ابررسانا: مبتنی بر آهنربای دائم و ابررسانای دمای بالا است (وو و همکاران، ۲۰۲۶). عملکرد بر اساس اثر مایسنر و پدیده

یاتاقان‌های مغناطیسی ترکیبی: ترکیبی از ساختارهای فعال و غیرفعال هستند (شکل ۲). بار اصلی توسط بخش غیرفعال تحمل می‌شود، در حالی که بخش فعال وظیفه کنترل دقیق موقعیت را بر عهده دارد.

این ساختار باعث کاهش توان مصرفی و افزایش دقت کنترلی به صورت هم‌زمان می‌شود (شیائو و همکاران، ۲۰۲۶).

قفل‌شدگی شار است. این ساختار منجر به تعلیق پایدار و اصطکاک تقریباً صفر می‌شود. محدودیت اصلی، نیاز به دمای بسیار پایین و سیستم سرمایشی پیچیده است. کاربرد آن عمدتاً در شرایط خاص با پایداری بالا است.

الکترونیسمی: نیروی تعلیق از جریان‌های گردابی ناشی از حرکت نسبی بین میدان مغناطیسی و هادی ایجاد می‌شود. این ساختار بدون کنترل فعال عمل می‌کند و در سرعت‌های بالا پایداری مناسبی دارد. به طور گسترده در سیستم‌های فلایویل پرسرعت استفاده می‌شود (فو و همکاران، ۲۰۲۰).



در این ساختار، یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال (حلقه آهنربای دائمی) بیشتر نیروی باربری را تأمین می‌کنند و یاتاقان‌های مغناطیسی فعال (الکترومغناطیس‌ها) وظیفه تنظیم دقیق و کنترل پایدار را بر عهده دارند.

تصویر ۲. نمای شماتیکی یاتاقان رانشی مغناطیسی هیبریدی

غیرفعال و مدل‌سازی یاتاقان‌های مغناطیسی هیبریدی تقسیم می‌شوند.

مدل‌سازی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال

روش مدار معادل مغناطیسی

روش مدار معادل مغناطیسی به عنوان یک رویکرد کلاسیک برای مدل‌سازی نیروی تعلیق در یاتاقان‌های مغناطیسی، کاربرد گسترده‌ای در تحلیل و طراحی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال و هیبریدی دارد. فرایند اجرای این روش عموماً شامل سه گام

تحلیل تطبیقی روش‌های مدل‌سازی نیروی تعلیق در یاتاقان‌های مغناطیسی سامانه‌های فلایویل: از مدار معادل مغناطیسی تا تانسور تنش ماکسول

روش‌های مدل‌سازی با دقت بالا

با توجه به دسته‌بندی ارائه شده برای یاتاقان‌های مغناطیسی، روش‌های مدل‌سازی نیز به سه دسته اصلی شامل مدل‌سازی یاتاقان‌های مغناطیسی فعال، مدل‌سازی یاتاقان‌های مغناطیسی

یاتاقان مغناطیسی شده و در نتیجه، نیروی تعلیق دینامیکی به طور چشمگیری کمتر از مقدار نیروی تعلیق در شرایط ایستا خواهد بود. بنابراین، توسعه مدل های ریاضی دقیق برای یاتاقان های مغناطیسی فعال که اثرات جریان گردابی را در ساختارهای روتور جامد لحاظ کنند، از اهمیت مهندسی بالایی برخوردار است (میزونو و همکاران، ۲۰۰۶).

در تحقیق لی و همکاران (۲۰۲۶) مدلی برای توزیع میدان مغناطیسی در سیستم یاتاقان الکترومغناطیسی با روتور جامد ارائه شده، عبارات تحلیلی نیروی تعلیق و نیروی مماسی استخراج گردیده و با تلفیق این مدل با سیستم واقعی، محاسبات و تحلیل ویژگی های تلفات انجام گرفته است. در مطالعه ای دیگر هوانگ و همکاران (۲۰۲۶) مدل ریاضی جامعی شامل اثرات جریان گردابی برای یاتاقان های محوری (تراست) فعال توسعه یافته و پارامترهای سختی دینامیکی جریان و سختی جابجایی از طریق رویکرد ترکیبی تحلیلی و المان محدود تعیین و حل شده است. پدیده جریان گردابی در روتورهای جامد با سرعت چرخش بالا بسیار حائز اهمیت است. در این شرایط، برهم کنش میدان جریان گردابی و میدان مغناطیسی تحریک، قانون توزیع خطوط شار مغناطیسی را تغییر می دهد و موجب تشدید اعوجاج میدان مغناطیسی شکاف هوا و اثرات پسماندزدایی مغناطیسی می شود. این عوامل در نهایت باعث کاهش نیروی تعلیق و تغییرات قابل ملاحظه در ویژگی های حرکتی روتور می گردند. این دسته از روش های مدل سازی عمدتاً برای یاتاقان های مغناطیسی با ساختار روتور جامد کاربرد دارند و پایه نظری لازم را برای تحلیل ویژگی های تعلیق دینامیکی تحت شرایط سرعت بالا فراهم می آورند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل سازی یاتاقان های مغناطیسی غیرفعال

(۱) مدل ریاضی عمومی

بیانکینی و همکاران (۲۰۲۵) مدل ریاضی عمومی را برای یاتاقان های مغناطیسی غیرفعال ارائه کرد که قابلیت توصیف ویژگی های هر دو نوع یاتاقان با مغناطیس شدگی شعاعی و محوری را داراست و از عمومیت بالایی برخوردار است (بیانکینی و همکاران، ۲۰۲۵) اعتبار این مدل بر پایه پیش فرض های زیر استوار است: نخست، شدت القای مغناطیسی پسماند ماده آهنربای دائمی بالا فرض می شود؛ دوم، تأثیر اثر انحنای بر دقت محاسبات نادیده گرفته می شود؛ سوم، دو آهنربای

اصلی است: نخست، تحلیل مدار مغناطیسی یاتاقان در سیستم ذخیره سازی انرژی فلابویل؛ سپس ترسیم نمودار مدار معادل مغناطیسی متناظر با یاتاقان؛ و در نهایت، تدوین مدل نیروی تعلیق یاتاقان مغناطیسی.

روش تانسور ماکسول

با توجه به شباهت های ساختاری و اصول عملکرد یاتاقان های مغناطیسی جریان متناوب (AC) با زیرسیستم های تعلیق این یاتاقان ها، و با الهام از روش های متداول مدل سازی ریاضی نیروی تعلیق شعاعی، رویکرد مدل سازی مبتنی بر تانسور ماکسول ارائه شده است. هدف این روش، استخراج مدلی ریاضی دقیق، فشرده و تعمیم پذیر برای نیروی تعلیق شعاعی در یاتاقان های مغناطیسی جریان متناوب است. این تکنیک به عنوان یک چارچوب تخصصی در حوزه مدل سازی نیروی تعلیق شناخته می شود و به ویژه برای یاتاقان های مغناطیسی جریان متناوب مناسب است. ماژول سیستم کنترلی نشان داده شده در شکل ۳ بر پایه این مدل طراحی شده است.

در شکل ۳، نمادهای A ، B و C بیانگر موقعیت هر یک از قطب ها هستند. همچنین، iA ، iB و iC جریان های کنترلی شعاعی تولید شده توسط سه سیم پیچ کنترلی شعاعی را نشان می دهند. جابجایی های روتور در راستای محورهای x ، y و z به ترتیب با متغیرهای x ، y و z نمایش داده می شوند که جهت مثبت آن ها مطابق با جهت مثبت محورهای مختصات مربوطه تعریف شده است. نمادهای دارای ستاره بیانگر مقادیر مرجع یا مطلوب هستند.

۴- مدل سازی و کنترل یاتاقان های مغناطیسی در سامانه های

فلابویل: از رویکردهای ریاضی با اثر جریان گردابی تا الگوریتم های کنترلی هوشمند

ایجاد مدل های ریاضی با در نظر گرفتن اثرات جریان گردابی هنگامی که روتور با سرعت چرخشی بالا کار می کند، ویژگی های تعلیق دینامیکی آن به دلیل تأثیرات جریان گردابی، تفاوت قابل توجهی با حالت ساکن نشان می دهد. میدان جریان گردابی القا شده در داخل روتور با میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم پیچ های تحریک جفت می شود و سبب انحراف چرخشی در توزیع شار مغناطیسی می گردد. این پدیده منجر به اعوجاج و اثرات پسماندزدایی مغناطیسی در میدان مغناطیسی شکاف هوایی

شعاعی با مغناطیس‌شدگی محوری ارائه کردند (گرونوالد و کرن، ۲۰۲۵).

مدل‌سازی یاتاقان‌های مغناطیسی هیبریدی

روش‌شناسی مدل‌سازی نیروی تعلیق در یاتاقان‌های مغناطیسی هیبریدی مشابه یاتاقان‌های فعال است و عموماً شامل سه رویکرد اصلی می‌شود. روش مدار مغناطیسی معادل، کلاسیک‌ترین و متداول‌ترین روش به شمار می‌رود. برای یاتاقان‌های هیبریدی با تحریک جریان متناوب (AC)، از روش تانسور ماکسول برای مدل‌سازی و تحلیل بهره گرفته شده است. در حالتی که روتور دارای ساختار رسانای جامد است، لحاظ کردن اثرات جریان گردابی ضروری بوده و از روش‌های مدل‌سازی دینامیکی مرتبط برای توصیف ویژگی‌های نیروی تعلیق استفاده می‌گردد (جیاو و همکاران، ۲۰۲۵).

الگوریتم‌های کنترل با عملکرد بالا

یاتاقان‌های مغناطیسی به‌عنوان اجزای کلیدی در سیستم‌های انتقال قدرت بدون تماس، تعلیق روتور را از طریق نیروهای الکترومغناطیسی محقق می‌سازند. عملکرد پایدار این سیستم‌ها به‌شدت وابسته به استراتژی‌های کنترل دقیق است (تانگ و همکاران، ۲۰۲۳). نمودار بلوکی الگوریتم کنترل جابجایی مبتنی بر جریان پیشنهادی برای سیستم روتور-یاتاقان مغناطیسی فعال (AMB) در شکل ۴ نشان داده شده است (هه و همکاران، ۲۰۲۵).

با توجه به ماهیت چندمتغیره، با کوپلینگ قوی و غیرخطی سیستم یاتاقان مغناطیسی، دستیابی به کنترل پایدار نیازمند الگوریتم‌های کنترل با عملکرد بالا است. الگوریتم‌های کنترل متداول شامل کنترل PID، کنترل فازی و کنترل شبکه عصبی هستند (کولکارنی و همکاران، ۲۰۱۸). کنترل PID به دلیل سادگی و سهولت پیاده‌سازی مورد توجه است، اما عملکرد آن تحت تأثیر تغییرات پارامترهای سیستم یا اغتشاشات خارجی قرار می‌گیرد. در مقابل، کنترل‌های فازی و شبکه عصبی از پایداری ساختاری و قابلیت‌های تطبیقی بالایی برخوردارند که امکان مقابله مؤثرتر با رفتار غیرخطی و عدم قطعیت‌های سیستم را فراهم کرده و عملکرد کلی یاتاقان مغناطیسی را بهبود می‌بخشند (شی و همکاران، ۲۰۲۵).

یاتاقان‌های مغناطیسی بر اساس وابستگی یا عدم وابستگی به سنسورهای فیزیکی برای کسب اطلاعات موقعیت روتور، به دو

موازی به‌عنوان ساختارهایی با طول بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شوند و خطوط مغناطیسی صرفاً در سطح مقطع آهنرباها توزیع می‌گردند که این امر مسئله را به یک تحلیل دوبعدی ساده‌سازی می‌کند.

(۲) مدل ریاضی ساده‌شده

استخراج مدل ریاضی ساده‌شده بر اساس چارچوب مدل عمومی پیشنهادی یونت انجام می‌گیرد. در این روش، آهنربای حلقوی هم‌محور معادل یک آهنربای نواری با طول بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. با بهره‌گیری از اصل روش بار مغناطیسی معادل و تحلیل انرژی مغناطوستاتیکی بین آهنرباهای واحد طول، مدل ساده‌شده برای یاتاقان‌های مغناطیسی شعاعی با مغناطیس‌شدگی محوری از طریق مشتق اول و دوم انرژی مغناطوستاتیکی نسبت به مختصات X و Y توسعه می‌یابد (وی و ژو، ۲۰۲۶).

(۳) مدل ریاضی استوانه‌ای موهومی مبتنی بر روش بار مغناطیسی معادل

(وانگ و همکاران ۲۰۲۵) بر پایه چارچوب مدل عمومی، آهنربای حلقوی را به ساختار ترکیبی دو آهنربای استوانه‌ای معادل‌سازی کرد و با استفاده از روش بار مغناطیسی معادل، مدل ریاضی مناسبی را برای یاتاقان‌های مغناطیسی شعاعی با مغناطیس‌شدگی محوری ارائه نمود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

(۴) مدل ریاضی با مغناطیس‌شدگی شعاعی مبتنی بر روش بار مغناطیسی معادل

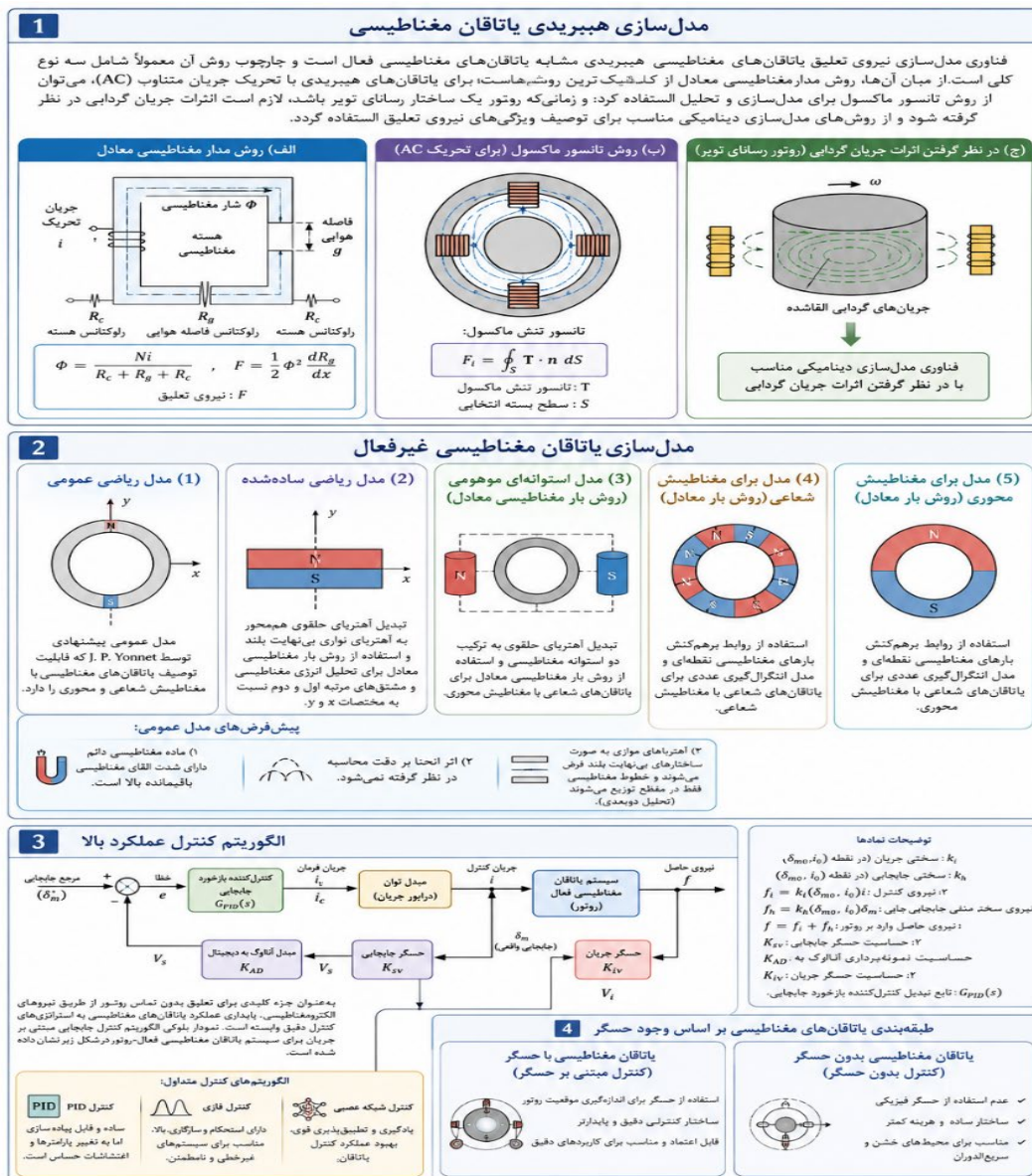
محققانی همچون ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) با برقراری روابط تعامل بین بارهای مغناطیسی نقطه‌ای بر اساس مدل عمومی، مدل انتگرال‌گیری عددی مناسبی را برای یاتاقان‌های مغناطیسی شعاعی با مغناطیس‌شدگی شعاعی توسعه دادند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

مدل ریاضی با مغناطیس‌شدگی محوری مبتنی بر روش بار مغناطیسی معادل

محققانی همچون گرونوالد و کرن (۲۰۲۵) با ایجاد روابط تعامل بین بارهای مغناطیسی نقطه‌ای در چارچوب مدل عمومی، مدل انتگرال‌گیری عددی مناسبی را برای یاتاقان‌های مغناطیسی

کاربرد یاتاقان‌های کنترل‌شده با سنسور و یاتاقان‌های کنترل‌شده بدون سنسور تقسیم می‌شوند. این دو گروه از نظر طراحی ساختاری، اصول کاری، ویژگی‌های عملکردی و حوزه‌های

دسته یاتاقان‌های کنترل‌شده با سنسور و یاتاقان‌های کنترل‌شده بدون سنسور تقسیم می‌شوند. این دو گروه از نظر طراحی ساختاری، اصول کاری، ویژگی‌های عملکردی و حوزه‌های



تصویر ۴. چارچوب‌های تحلیلی و کنترلی در یاتاقان‌های مغناطیسی فعال، غیرفعال و هیبریدی

و فنی به شمار می‌روند (ساتروستیگوی، ۲۰۲۱). اصل عملکرد این سامانه‌ها بر پایش لحظه‌ای موقعیت روتور به‌وسیله حسگرهای فیزیکی خارجی استوار است. کنترل‌کننده بر اساس سیگنال انحراف موقعیتی دریافت‌شده، جریان سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که نیروی تعلیق لازم

طبقه‌بندی و تحلیل یاتاقان‌های مغناطیسی در سامانه‌های فلاپویل: از کنترل مبتنی بر حسگر تا رویکردهای بدون حسگر یاتاقان‌های مغناطیسی کنترل‌شده مبتنی بر حسگر یاتاقان‌های مغناطیسی کنترل‌شده مبتنی بر حسگر، بالغ‌ترین و پرکاربردترین نوع یاتاقان‌های مغناطیسی در کاربردهای صنعتی

شکاف هوایی ثابت (معمولاً ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) بین حسگر و روتور، عملکرد سیستم را در محیط‌های چالش‌برانگیز (نظیر آلودگی روغن، گردوغبار و دماهای بالا) آسیب‌پذیر می‌سازد و می‌تواند منجر به اعوجاج سیگنال یا آسیب به حسگر شود. این عوامل در نهایت موجب افزایش هزینه سیستم و الزامات نگهداری می‌گردند.

یاتاقان‌های مغناطیسی کنترل‌شده بدون حسگر

یاتاقان‌های مغناطیسی کنترل‌شده بدون حسگر، رویکردی نوین و رو به رشد هستند که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. مزیت اصلی این فناوری، حذف حسگرهای فیزیکی خارجی است. در این روش، اطلاعات موقعیت روتور به‌صورت غیرمستقیم از طریق پردازش سیگنال‌های الکتریکی (جریان و ولتاژ) در سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی یاتاقان تخمین زده شده و فرآیند کنترل تعلیق انجام می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۰). این رویکرد را می‌توان به‌منزله جایگزینی حسگرهای سخت‌افزاری با الگوریتم‌های تخمین نرم‌افزاری دانست.

ساختار اصلی این سامانه‌ها تنها شامل یاتاقان مغناطیسی، کنترل‌کننده و تقویت‌کننده توان است و نیازی به حسگر موقعیت اضافی ندارد. نمودار بلوکی سیستم کنترل بدون حسگر در شکل ۵ ارائه شده است. کنترل‌کننده در این سامانه‌ها به الگوریتم‌های مشاهده‌گر بدون حسگر پیشرفته‌ای نظیر فیلتر کالمن تعمیم‌یافته، مشاهده‌گر مد لغزشی یا روش‌های شناسایی پارامترهای اندوکتانس مجهز است.

اساس عملکرد این الگوریتم‌ها بر وابستگی متقابل اندوکتانس (خودالقایی) سیم‌پیچ‌ها و موقعیت روتور استوار است. تغییر موقعیت روتور موجب تغییر شکاف هوایی و در نتیجه تغییر اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها می‌شود که این تغییر، بر پاسخ ولتاژ-جریان اثر می‌گذارد. کنترل‌کننده با نمونه‌برداری لحظه‌ای از سیگنال‌های جریان و ولتاژ و اعمال آن‌ها به الگوریتم مشاهده‌گر، موقعیت روتور را تخمین زده و با تنظیم مناسب جریان تحریک، حلقه کنترل بسته تعلیق را برقرار می‌سازد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمودار بلوکی سیستم کنترل بدون حسگر ساختار کلی حلقه کنترل را نمایش می‌دهد.

برای حفظ پایداری روتور تولید شود. هنگامی که روتور تحت تأثیر اغتشاشات خارجی از موقعیت تعادل خود خارج می‌شود، حسگر موقعیت، میزان جابجایی را به سیگنال الکتریکی تبدیل کرده و به کنترل‌کننده ارسال می‌کند. کنترل‌کننده با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته کنترلی (نظیر PID یا کنترل تطبیقی)، پارامترهای جریان اصلاحی را محاسبه کرده و از طریق تقویت‌کننده توان، جریان تحریک سیم‌پیچ‌ها را تنظیم می‌کند. نیروی الکترومغناطیسی حاصل، روتور را به موقعیت تعادل بازمی‌گرداند و بدین ترتیب حلقه کنترل بسته تکمیل می‌شود.

علاوه بر اجزای اصلی یاتاقان مغناطیسی (استاتور، سیم‌پیچ و روتور)، حسگرهای موقعیت و ماژول‌های پردازش سیگنال نیز از اجزای ضروری این سامانه‌ها محسوب می‌شوند. این حسگرها معمولاً در موقعیت‌های کلیدی شعاعی و محوری نصب می‌شوند تا پایش جامع جابجایی روتور امکان‌پذیر گردد. حسگرهای متداول در این کاربردها عبارتند از:

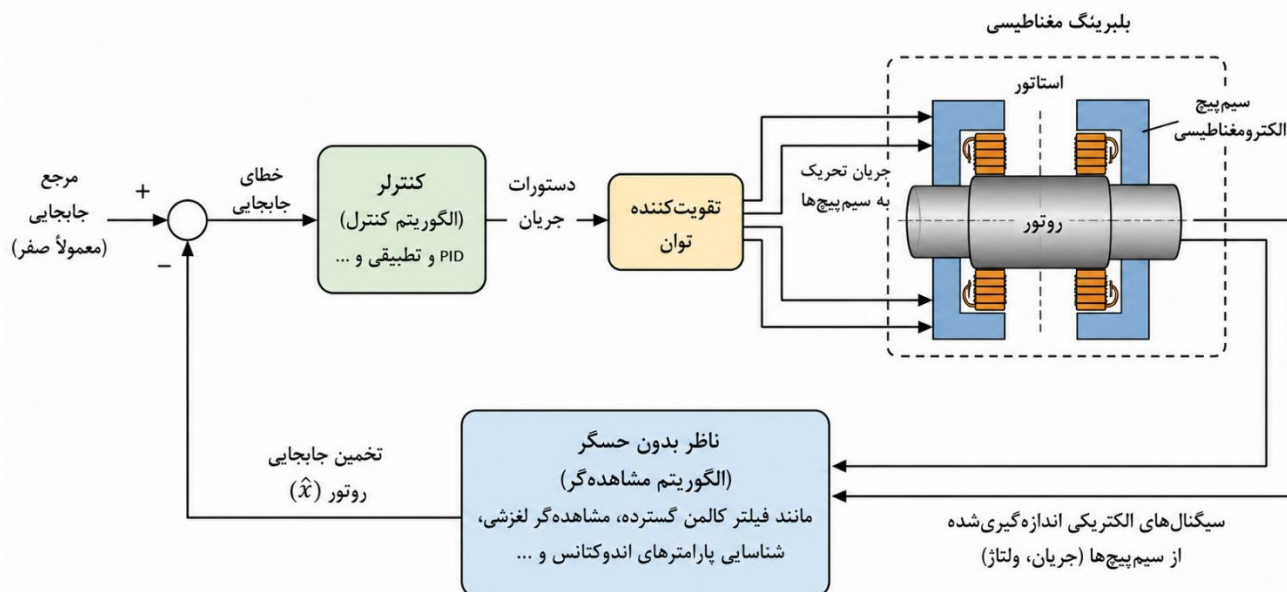
حسگرهای جریان گردابی: به دلیل دقت بالا، پایداری مناسب، مقاومت مطلوب در برابر تداخلات و سازگاری گسترده صنعتی، پرکاربردترین گزینه در یاتاقان‌های مغناطیسی محسوب می‌شوند (شیه و همکاران، ۲۰۲۵).

حسگرهای القایی: دارای ساختار ساده و هزینه پایین هستند، اما از دقت نسبتاً محدود برخوردارند.

حسگرهای خازنی: از دقت بالا و پاسخ‌دهی سریع برخوردارند، اما نسبت به تداخلات محیطی حساس هستند.

حسگرهای فوتوالکتریک: امکان اندازه‌گیری بدون تماس با دقت بالا را فراهم می‌کنند، اما نیازمند شرایط نصب و محیطی دقیق هستند.

برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان، فناوری تلفیق چندحسگری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد که با ترکیب مزایای انواع حسگرها، تخمین دقیق‌تری از موقعیت روتور فراهم می‌سازد (چونگ و همکاران، ۲۰۲۴). یاتاقان‌های مغناطیسی کنترل‌شده مبتنی بر حسگر، دقت کنترل جابجایی در محدوده میکرومتر تا نانومتر، پاسخ‌دهی سریع، پایداری بالا، بلوغ فناوری و سازگاری مناسب با شرایط عملیاتی سخت (از جمله سرعت‌های بالا و بارهای سنگین) را ارائه می‌دهند. با این حال، نیاز به فضای اضافی برای نصب حسگرها موجب افزایش حجم و پیچیدگی ساختاری سامانه می‌شود. علاوه بر این، وجود



تصویر ۵. نمای کاربردی فلاپویل در متروی تهران - کرج

موتورهای القایی: این موتورها در مراحل اولیه توسعه سیستم های فلاپویل مورد استفاده قرار گرفتند. مزایای اصلی آنها شامل هزینه پایین، عدم نیاز به حسگر موقعیت روتور و دامنه سرعت کاری نسبتاً گسترده است. با این حال، محدودیت در محدوده تنظیم سرعت و ویژگی های نامطلوب گشتاور، موجب شده است استفاده از آنها در خودروهای الکتریکی که نیازمند شتاب گیری و ترمزگیری های مکرر هستند، کارایی مطلوبی نداشته باشد (زردالی و همکاران، ۲۰۲۴).

موتورهای رلوتکناسی سوئیچ شونده: این موتورها از محدوده تنظیم سرعت گسترده تر و انعطاف پذیری بالاتری در کنترل برخوردارند که آنها را برای شرایط کاری با دفعات زیاد راه اندازی و توقف مناسب می سازد. با وجود این، نوسانات زیاد گشتاور (ضریب موجی گشتاور بالا) و سطح قابل توجه نویز صوتی در هنگام کارکرد، کاربرد آنها را در فلاپویل های نصب شده روی خودرو محدود کرده است (درکوش و همکاران، ۲۰۲۵). موتورهای آهنربای دائم: این موتورها به دلیل برخورداری از مزایای برجسته ای همچون چگالی توان بالا، بازدهی عالی، وزن کم و تلفات پایین، به گزینه غالب در کاربردهای خودروهای الکتریکی و سیستم های فلاپویل پرسرعت تبدیل شده اند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

مدیریت حرارتی در سیستم های ذخیره سازی انرژی فلاپویل
پرسرعت: تحلیل منابع گرما، چالش های خنک کاری روتور در خلأ و راهکارهای دفع حرارت
فناوری موتور/ژنراتور الکتریکی

در سیستم های ذخیره سازی انرژی فلاپویل، موتور/ژنراتور به عنوان عنصر اصلی تبادل و تبدیل انرژی عمل می کند. این واحد در مرحله ذخیره سازی انرژی (شارژ)، در نقش موتور ظاهر شده و انرژی الکتریکی را به انرژی جنبشی فلاپویل تبدیل می نماید؛ در مرحله بازیابی انرژی (تخلیه)، نیز به عنوان ژنراتور عمل کرده و انرژی جنبشی ذخیره شده را دوباره به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. عملکرد این مؤلفه تأثیر مستقیم و تعیین کننده ای بر بازده کلی تبدیل انرژی و سرعت پاسخ دهی دینامیکی سیستم دارد.

انواع و ویژگی های موتور/ژنراتورها

موتور/ژنراتور به عنوان مؤلفه کلیدی در تبدیل دوطرفه انرژی الکتریکی و مکانیکی، نقشی اساسی در عملکرد و کارایی سیستم های ذخیره سازی انرژی فلاپویل ایفا می کند. انتخاب نوع موتور/ژنراتور در طراحی و کاربردهای عملیاتی، عمده تاً شامل سه دسته اصلی است (هوای و همکاران، ۲۰۲۴). موتورهای القایی، موتورهای رلوتکناسی سوئیچ شونده و موتورهای آهنربای دائم.

طراحی هم‌زمان موتور/ژنراتور و یاتاقان‌های مغناطیسی

به‌منظور ارتقای عملکرد کلی سیستم، طراحی موتور/ژنراتور و یاتاقان‌های مغناطیسی نیازمند اتخاذ یک رویکرد هم‌افزا و طراحی مشترک در سطوح ساختاری و کنترلی است.

رویکرد ساختاری: استفاده از طراحی یکپارچه ساختاری موجب کاهش حجم و وزن کلی سیستم و در نتیجه افزایش چگالی توان می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۲۵). برای مثال، یکپارچه‌سازی آهنرباهای الکتریکی یاتاقان مغناطیسی با سیم‌پیچ‌های استاتور موتور/ژنراتور می‌تواند ساختاری فشرده‌تر ایجاد نماید.

رویکرد کنترلی: عملکرد موتور/ژنراتور موجب ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی متغیر می‌شود که ممکن است بر دقت کنترل یاتاقان‌های مغناطیسی تأثیر منفی بگذارد. از سوی دیگر، میدان مغناطیسی ایجادشده توسط یاتاقان نیز می‌تواند موجب اختلال در عملکرد موتور/ژنراتور شود [۸۱]. بنابراین، اتخاذ راهکارهای مؤثر مقابله با تداخل، شامل آرایش بهینه موقعیت سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای الکتریکی، استفاده از محافظت الکترومغناطیسی و لحاظ کردن برهم‌کنش‌های دوطرفه در الگوریتم‌های کنترلی، ضروری است. این رویکرد کنترل مشارکتی، پایداری و عملکرد مطمئن سیستم را تضمین می‌کند.

فناوری مدیریت و دفع حرارت

با افزایش سرعت چرخش و چگالی توان در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل طی سال‌های اخیر، تلفات حرارتی موتور/ژنراتور نیز به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴). اجزای کلیدی مانند موتور/ژنراتور و یاتاقان‌های مغناطیسی در هنگام کارکرد، مقدار زیادی گرما تولید می‌کنند. عدم دفع به‌موقع این گرما موجب افزایش دمای کاری، افت عملکرد، کاهش عمر مفید اجزا و افزایش احتمال وقوع خرابی‌های حرارتی می‌شود. ازاین‌رو، فناوری مدیریت و دفع حرارت به‌عنوان حلقه‌ای حیاتی برای تضمین پایداری و قابلیت اطمینان سیستم شناخته می‌شود.

اجزای اصلی دفع حرارت و تحلیل منابع گرمایی

موتور/ژنراتور: منابع اصلی تولید گرما شامل تلفات مسی (گرمای ژولی) در سیم‌پیچ‌های استاتور، تلفات آهنی در هسته مغناطیسی و تلفات جریان‌های گردابی (فوکو) در روتور هستند.

در سرعت‌های بالا، این تلفات به‌شدت افزایش یافته و حجم قابل توجهی گرما تولید می‌کنند. ساختار شماییک موتور و مدار حرارتی معادل آن در شکل ۶ ارائه شده است.

یاتاقان‌های مغناطیسی: عبور جریان از سیم‌پیچ‌های آهنرباهای الکتریکی موجب ایجاد تلفات مسی شده و این اجزا را به یکی از منابع اصلی تولید گرما تبدیل می‌کند. علاوه بر این، تجهیزات قدرت موجود در مدار کنترل یاتاقان نیز گرمای اضافی تولید می‌کنند.

اگرچه تلفات استاتور بخش عمده‌ای از تولید حرارت را شامل می‌شود و فناوری خنک‌کاری پوسته آبی برای آن به بلوغ مناسبی رسیده است، اما روتور که در محفظه خلأ و با سرعت بالا در حال دوران است، فاقد مسیرهای مؤثر برای انتقال حرارت می‌باشد. این موضوع موجب انباشت قابل توجه گرما در روتور می‌شود (نادیم و همکاران، ۲۰۲۴). افزایش مداوم دمای روتور خطرات جدی به همراه دارد؛ از جمله کاهش غیرقابل برگشت خاصیت مغناطیسی (واگن مغناطیسی‌زدایی) آهنرباهای دائم که موجب تغییر شکل میدان مغناطیسی و افزایش نوسانات گشتاور می‌شود، همچنین ایجاد ترک‌های ریز و جدایش لایه‌ای در مواد کامپوزیتی الیاف کربنی به دلیل تنش‌های حرارتی چرخه‌ای ناشی از تفاوت ضرایب انبساط حرارتی (گائو و همکاران، ۲۰۲۴). این چالش‌های حرارتی به مانعی اساسی در مسیر توسعه فلابویل‌ها به سمت دستیابی به چگالی توان بالاتر تبدیل شده‌اند و رفع آن‌ها نیازمند توسعه روش‌های کارآمد و قابل اعتماد برای دفع حرارت روتور است. برای غلبه بر این چالش، تمرکز بر دو مسیر اصلی ضروری است: کاهش تولید گرما در منبع اولیه و پیش‌بینی دقیق توزیع دما. فلابویل‌ها معمولاً در محیط خلأ متوسط (۰/۱ تا ۱۰۰ پاسکال) کار می‌کنند تا تلفات ناشی از مقاومت هوا (بادزنی) به حداقل برسد. در این شرایط، انتقال حرارت از روتور عمدتاً از طریق تابش حرارتی و هدایت محدود به سمت استاتور انجام می‌شود که به دلیل شدت پایین تابش، موجب افزایش تدریجی دمای روتور می‌گردد (ما و لی، ۲۰۲۴).

روش‌های متداول دفع حرارت

به دلیل عملکرد سیستم‌های فلابویل در سرعت‌های بالا و اغلب در محیط خلأ، سازوکارهای دفع حرارت در آن‌ها با موتورهای الکتریکی متداول تفاوت دارد. روش‌های اصلی عبارت‌اند از:

آزمایشگاهی برای ارزیابی خنک‌کاری جریان داخلی شافت توخالی طراحی و ساخته شد و اثر پارامترهایی مانند نرخ جریان سیال خنک‌کننده، سرعت دوران و میزان تولید حرارت روتور به‌صورت کمی بررسی گردید. این طرح موجب اختلال در پایداری محیط خلأ نمی‌شود و از قابلیت کاربرد صنعتی بالایی برخوردار است (شکل ۶).

خنک‌کاری با لوله حرارتی: این فناوری با بهره‌گیری از انتقال حرارت ناشی از تغییر فاز، شار حرارتی زیاد در نواحی داغ را به‌سرعت منتقل می‌کند و معمولاً به‌عنوان راهکار مکمل در کنار خنک‌کاری هوایی یا مایع برای بهبود یکنواختی توزیع دما مورد استفاده قرار می‌گیرد.

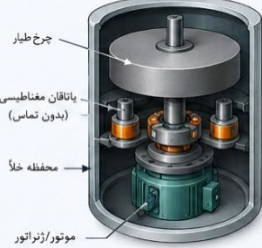
هر یک از این روش‌ها بر اساس سطح توان، محدودیت‌های اقتصادی و نیازهای دفع حرارتی سیستم انتخاب می‌شوند؛ خنک‌کاری هوایی برای سامانه‌های کم‌توان، خنک‌کاری مایع برای کاربردهای پرتوان و لوله حرارتی برای مدیریت موضعی نقاط داغ مناسب است. انتخاب بهینه و ترکیب مناسب این فناوری‌ها می‌تواند پایداری حرارتی و عمر کاری سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

خنک‌کاری هوایی: این روش برای سیستم‌های کم‌توان و سرعت متوسط که در شرایط خلأ پایین یا فشار اتمسفری کار می‌کنند، مناسب است و با استفاده از فن یا جریان هوای ایجادشده توسط روتور اجرا می‌شود (شکل ۷). سادگی ساختار و هزینه پایین از مزایای این روش، و ظرفیت محدود دفع حرارت از معایب آن محسوب می‌شود.

نک‌کاری مایع: این روش به‌عنوان راهکار غالب برای سیستم‌های پرتوان و پرسرعت، شامل خنک‌کاری با پوسته آبی، خنک‌کاری روغنی و خنک‌کاری از طریق جریان داخلی شافت توخالی است. پوسته آبی معمولاً در بخش خارجی استاتور نصب می‌شود. برای خنک‌کاری روتور در محیط خلأ، استفاده از جریان داخلی در شافت توخالی راهکاری مؤثر است که انتقال مستقیم حرارت را فراهم کرده و افزایش دما را در سرعت‌های بالا کنترل می‌کند. برای مدیریت حرارتی روتور، اتخاذ یک رویکرد دوگانه شامل بهینه‌سازی طراحی برای کاهش تلفات و افزایش هدایت حرارتی داخلی، همراه با توسعه سامانه‌های خنک‌کاری اختصاصی، ضروری است (چی و همکاران، ۲۰۲۵). تحقیق یائو و همکاران (۲۰۲۵) سامانه خنک‌کاری چندکاناله یکپارچه با شافت توخالی را توسعه دادند. در این پژوهش، سکوی

مزایای کاربرد، باتاقان‌های مغناطیسی در ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار

باتاقان‌های مغناطیسی با حذف تماس مکانیکی، عملکرد پایدار در سرعت‌های بالا، کاهش تلفات، افزایش بازدهی، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش طول عمر را فراهم می‌کنند. همچنین با سرعت پاسخ سریع، پایداری سیستم را و در فرایندهای شارژ و دشارژ تضمین می‌نمایند.



- حذف اصطکاک مکانیکی**
کاهش تلفات و افزایش بازدهی انرژی
- عدم سایش مکانیکی**
کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش طول عمر سیستم
- سرعت پاسخ سریع**
سازگاری سریع با تغییرات سرعت و تضمین پایداری در شارژ و دشارژ

3.3. فناوری موتور/ژنراتور

موتور/ژنراتور هسته تبدیل انرژی در سیستم چرخ‌طیار است. در ذخیره‌سازی به‌صورت موتور عمل کرده و انرژی الکتریکی را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و در زمان آزادسازی، به‌صورت ژنراتور عمل کرده و انرژی جنبشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. عملکرد آن مستقیماً بر بازده تبدیل انرژی و سرعت پاسخ سیستم تأثیر می‌گذارد.

3.3.1. انواع و ویژگی‌های موتور/ژنراتورها

موتور القایی	موتور رلوکلانسی سولینچ‌شونده	موتور آهنربای دائمی
• هزینه پایین • عدم نیاز به جسگر موقعیت • حد سرعت نسبتاً بالا • محدوده تنظیم سرعت محدود • ویژگی گشتاور نامطلوب • نامناسب برای استارت-استاپ مکرر	• محدوده تنظیم سرعت نسبتاً وسیع • کنترل لغزش‌پذیر • مناسب برای شرایط استارت-استاپ مکرر • ریبیل گشتاور زیاد • سادگی عملیاتی زیاد • محدودیت در کاربرد در چرخ‌طیار خودرو	• وزن سبک • اتلاف کم • بازدهی بالا • چگالی گشتاور بالا • گزینه مناسب برای کاربردهای خودرویی

3.3.2. طراحی هماهنگ موتور/ژنراتور و باتاقان‌های مغناطیسی

طراحی ساختاری
طراحی یکپارچه برای کاهش حجم و وزن سیستم و افزایش بهره‌وری فضا (مثلاً، ادغام الکترومغناطیس باتاقان مغناطیسی و سیم‌پیچ استاتور موتور/ژنراتور)

هماهنگی کنترلی
موتور/ژنراتور و باتاقان مغناطیسی ممکن است باعث تداخلات الکترومغناطیسی با یکدیگر شوند.



راهکارهای مقابله با تداخل

- چیدمان مناسب سیم‌پیچ‌ها و الکترومغناطیس‌ها
- استفاده از فناوری سبیلدینگ (پوشش محافظ)
- در نظر گرفتن تعامل دو سیستم در الگوریتم کنترل
- تحقق کنترل هماهنگ و تضمین عملکرد پایدار سیستم

3.4. فناوری مدیریت دفع حرارت

در سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار، اجزایی مانند موتور/ژنراتور و باتاقان مغناطیسی مقدار زیادی حرارت تولید می‌کنند. مدیریت مناسب حرارت برای حفظ عملکرد، افزایش طول عمر و جلوگیری از خرابی‌ها ضروری است.

3.4.1. اجزای اصلی اتلاف حرارت و تحلیل منابع حرارتی



در حین عملکرد، حرارت از تلفات زیر به‌نسبتی سبب می‌شود:

- تلفات مسی (سیم‌پیچ استاتور)
- تلفات آهنی (هسته آهنی)
- تلفات جریان کوبی (روتور)
- تلفات حرارت از طریق خروج حرارت از طریق خنک‌کننده (هوا/مایع)

مسیر حرارتی اصلی: خروج حرارت

مسیر حرارتی ثانویه: انتقال حرارت به محیط

شکل 6. شماتیک ساختار موتور و مدار حرارتی داخلی

تصویر ۶. فناوری های کلیدی در سیستم ذخیره ساز انرژی فلابویل

یکپارچه‌سازی و کنترل هوشمند سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل: از راهبردهای شارژ/دشارژ تا کنترل مشارکتی یاتاقان‌های مغناطیسی و موتور/ژنراتور

موتور/ژنراتور، مدیریت بهینه جریان توان و بهینه‌سازی راندمان تبدیل دوسویه انرژی الکتریکی و انرژی جنبشی است. از این رو، طراحی راهبردهای کنترلی کارآمد نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات و بهبود عملکرد دینامیکی سامانه ایفا می‌کند. در مرحله شارژ، سامانه کنترل با تنظیم تطبیقی توان ورودی متناسب با تغییرات ولتاژ و فرکانس شبکه، شرایط لازم را برای شتاب‌گیری بهینه فلابویل فراهم کرده و از بروز تلفات غیرضروری جلوگیری می‌کند. در این مرحله، الگوریتم ردیابی نقطه بهینه توان با حفظ موتور/ژنراتور در ناحیه عملکردی دارای بیشترین راندمان، بهره‌وری فرایند ذخیره‌سازی انرژی را افزایش می‌دهد. در مرحله دشارژ نیز نرخ کاهش سرعت روتور به صورت پیوسته و متناسب با تقاضای بار تنظیم می‌شود تا ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور در محدوده مجاز باقی بمانند. این هدف معمولاً از طریق ساختارهای کنترل حلقه‌بسته محقق می‌شود؛ به گونه‌ای که انحرافات ولتاژ و فرکانس به صورت بلادرنگ پایش شده و پارامترهای کنترلی با حداقل تأخیر اصلاح می‌شوند تا کیفیت توان خروجی در شرایط گذرا و ماندگار حفظ شود.

به دلیل برخورداری از چگالی توان بالا، راندمان زیاد، پاسخ دینامیکی سریع و نسبت مناسب گشتاور به اینرسی، موتورهای سنکرون آهنربای دائم به گزینه غالب برای تبادل انرژی در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلابویل تبدیل شده‌اند (سون و همکاران، ۲۰۲۵). راهبردهای کنترل این ماشین‌ها عمدتاً شامل کنترل برداری میدان (FOC)، کنترل گشتاور مستقیم (DTC)، کنترل پیش‌بین مدل (MPC) و روش‌های کنترل هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی هستند (فانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در میان این روش‌ها، کنترل پیش‌بین مدل به دلیل توانایی مدیریت هم‌زمان سامانه‌های غیرخطی چندمتغیره، اعمال مستقیم قیود کنترلی و ارائه پاسخ دینامیکی سریع، عملکرد کنترلی مطلوب‌تری نسبت به بسیاری از روش‌های متداول ارائه می‌دهد. با این حال، پیچیدگی محاسبات، فرکانس سوئیچینگ متغیر و حساسیت نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سامانه، همچنان از مهم‌ترین محدودیت‌های این راهبرد کنترلی محسوب می‌شوند (هو و همکاران، ۲۰۲۴).

در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلابویل، فناوری یکپارچه‌سازی و کنترل، زیربنای دستیابی به عملکرد پایدار، راندمان بالا، قابلیت اطمینان عملیاتی و بهره‌برداری ایمن از سامانه محسوب می‌شود. عملکرد مطلوب این سامانه‌ها تنها زمانی حاصل می‌شود که تمامی زیرسامانه‌های اصلی، شامل روتور فلابویل، موتور/ژنراتور، یاتاقان‌های مغناطیسی، مبدل‌های الکترونیک قدرت و سامانه کنترل، به صورت یک مجموعه یکپارچه، هماهنگ و بهینه طراحی و بهره‌برداری شوند. از این رو، یکپارچه‌سازی سامانه صرفاً به اتصال فیزیکی یا مکانیکی اجزا محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم هم‌طراحی الکترومغناطیسی، مکانیکی، حرارتی و کنترلی است تا ضمن کاهش تلفات انرژی، ارتعاشات، کوپلینگ‌های ناخواسته و حجم سامانه، بیشترین چگالی توان، بیشترین بازده و بالاترین سطح قابلیت اطمینان حاصل شود. در این چارچوب، نحوه اتصال روتور به موتور/ژنراتور، آرایش فضایی یاتاقان‌های مغناطیسی، معماری مبدل‌های قدرت و ساختار سامانه کنترل، تأثیر مستقیمی بر راندمان تبدیل انرژی، پایداری دینامیکی، قابلیت اطمینان و طول عمر سامانه دارند.

راهبردهای کنترل شارژ و دشارژ

سامانه کنترل در ذخیره‌سازی انرژی فلابویل وظیفه مدیریت، پایش و تنظیم بلادرنگ تمامی متغیرهای کلیدی، از جمله سرعت زاویه‌ای روتور، وضعیت تعلیق یاتاقان‌های مغناطیسی، گشتاور و سرعت موتور/ژنراتور، جریان، ولتاژ و تبادل توان با شبکه را بر عهده دارد. هدف اصلی این سامانه، تضمین انتقال پایدار انرژی میان شبکه و فلابویل، حفظ کیفیت توان الکتریکی و جلوگیری از بروز ناپایداری‌های دینامیکی در شرایط بهره‌برداری متغیر است. دستیابی به این اهداف مستلزم به‌کارگیری راهبردهای کنترلی پیشرفته‌ای است که علاوه بر برخورداری از پاسخ‌گذاری سریع و دقت بالا، در برابر عدم قطعیت پارامترها، اغتشاشات خارجی و تغییرات ناگهانی بار نیز از استحکام و پایداری کافی برخوردار باشند. راندمان بالای تبدیل انرژی و حداقل‌سازی توان مصرفی داخلی، دو شاخص بنیادین در ارزیابی عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلابویل به شمار می‌آیند. تحقق هم‌زمان این دو شاخص مستلزم کنترل دقیق سرعت

به منظور رفع این محدودیت‌ها، شو و فانگ (۲۰۱۹) با تلفیق کنترل پیش‌بین بدون خطا مشاهده‌گر مد لغزشی و مشاهده‌گر اغتشاش، امکان انتخاب سریع و دقیق بردار ولتاژ بهینه را فراهم کرده و در نتیجه، استحکام سامانه را در برابر اغتشاشات و تغییرات پارامتری افزایش داده است؛ هرچند پیچیدگی طراحی و هزینه محاسباتی این روش همچنان قابل توجه است. همچنین، یوننه (۲۰۱۰) با ساده‌سازی راهبرد کنترل جریان پیش‌بین مجموعه کنترل متناهی و ارائه روش موقعیت‌یابی بردار ولتاژ مبتنی بر کنترل دیدبیت در دو سیکل کنترلی، زمان محاسبات، تعداد عملیات سوئیچینگ و بار محاسباتی کنترل‌کننده را کاهش داده و در نتیجه، عملکرد دینامیکی و بازده راهبرد کنترل پیش‌بین را بهبود بخشیده است.

در حوزه مدیریت انرژی، ماکسنس و همکاران (۲۰۲۰) راهبردی مبتنی بر کنترل بهینه برای سامانه هیبریدی ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل در خودروهای الکتریکی ارائه کردند. این راهبرد با بهینه‌سازی هم‌زمان توزیع جریان و گشتاور در فرایند بازیابی انرژی ترمز، علاوه بر افزایش راندمان بازیابی انرژی، موجب کاهش تنش‌های الکتروشیمیایی باتری، افزایش طول عمر آن و بهبود عملکرد اقتصادی سامانه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت هماهنگ منابع ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای بازده کلی سامانه و افزایش قابلیت اطمینان آن ایفا کند.

راهبرد کنترل مشارکتی یاتاقان‌های مغناطیسی و موتور/ژنراتور
با افزایش سرعت دورانی و چگالی توان در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلاپویل، کنترل مستقل یاتاقان‌های مغناطیسی و موتور/ژنراتور دیگر پاسخگوی الزامات عملکردی این سامانه‌ها نیست. برهم‌کنش‌های پیچیده الکترومغناطیسی، مکانیکی، دینامیکی و کنترلی میان این دو زیرسامانه، به‌طور مستقیم بر پایداری موتور، راندمان تبدیل انرژی، کیفیت توان و قابلیت اطمینان کل سامانه اثر می‌گذارند. ازاین‌رو، توسعه راهبردهای کنترل مشارکتی مبتنی بر مدل‌های کوپل‌شده چندفیزیکی به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر در حوزه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل تبدیل شده است (کومار و همکاران، ۲۰۱۹).

در این رویکرد، موتور/ژنراتور و یاتاقان‌های مغناطیسی به‌عنوان دو زیرسامانه مستقل در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه به‌صورت یک

سامانه یکپارچه با رفتارهای دینامیکی متقابل مدل‌سازی و کنترل می‌شوند. این نگرش امکان تحلیل دقیق اثرات متقابل میدان‌های الکترومغناطیسی، نیروهای تعلیق، ارتعاشات روتور و پاسخ دینامیکی موتور/ژنراتور را فراهم می‌سازد و زمینه را برای طراحی راهبردهای کنترلی هماهنگ و بهینه مهیا می‌کند.

تغییرات بار اعمال‌شده به موتور/ژنراتور موجب تغییر گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه تغییر سرعت زاویه‌ای روتور می‌شود. این تغییرات، نیروهای تعلیق تولیدشده توسط یاتاقان‌های مغناطیسی را نیز تحت تأثیر قرار داده و در صورت عدم جبران مناسب، می‌تواند موجب افزایش ارتعاشات، خروج روتور از موقعیت تعادل، افزایش تلفات و حتی ناپایداری سامانه شود. بنابراین، سامانه کنترل باید با تنظیم هم‌زمان جریان سیم‌پیچ‌های موتور/ژنراتور و یاتاقان‌های مغناطیسی، ضمن حفظ موقعیت تعادلی روتور، اثرات متقابل میدان‌های مغناطیسی، ارتعاشات و تلفات انرژی را به حداقل برساند.

در سامانه‌های پیشرفته، راهبردهای کنترل مشارکتی علاوه بر حفظ پایداری تعلیق، اهداف دیگری نظیر کاهش مصرف انرژی یاتاقان‌های مغناطیسی، افزایش راندمان تبدیل انرژی، کاهش بار حرارتی تجهیزات، محدودسازی ارتعاشات بحرانی و افزایش عمر مفید اجزای دوار را نیز دنبال می‌کنند. تحقق هم‌زمان این اهداف مستلزم توسعه الگوریتم‌های کنترل مقاوم، تطبیقی، پیش‌بین و هوشمند است که بتوانند رفتار غیرخطی، کوپلینگ‌های چندفیزیکی، تغییرات پارامتری و اغتشاشات خارجی را به‌صورت هم‌زمان مدیریت کنند.

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های دیجیتال دوقلو الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری تقویتی، کنترل پیش‌بین مدل و روش‌های کنترل مقاوم در طراحی کنترل‌کننده‌های مشارکتی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این رویکردها امکان پیش‌بینی رفتار سامانه، تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی و افزایش قابلیت اطمینان عملکرد را فراهم می‌کنند. انتظار می‌رود توسعه این فناوری‌ها، زمینه را برای طراحی نسل جدید سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل با سرعت فوق‌بالا، راندمان بیشتر، پایداری دینامیکی بالاتر و هزینه بهره‌برداری کمتر فراهم سازد.

وضعیت پژوهش و چالش‌های آینده

پیشرفت‌های حاصل‌شده طی دو دهه گذشته نشان می‌دهد که فناوری ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلاپویل از مرحله پژوهش‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های اولیه عبور کرده و به‌تدریج وارد مرحله توسعه صنعتی و تجاری شده است. این پیشرفت‌ها حاصل توسعه هم‌زمان فناوری‌های مواد، طراحی مکانیکی، یاتاقان‌های مغناطیسی، ماشین‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت و سامانه‌های کنترل بوده و موجب افزایش چشمگیر عملکرد، قابلیت اطمینان و اقتصادی‌بودن این سامانه‌ها شده است.

در بخش روتور، توسعه کامپوزیت‌های پیشرفته تقویت‌شده با الیاف کربن، امکان دستیابی هم‌زمان به سرعت محیطی بیشتر، چگالی انرژی بالاتر، مقاومت مکانیکی بیشتر و ضریب ایمنی مناسب‌تر را فراهم کرده است. علاوه بر این، پیشرفت در روش‌های طراحی بهینه، تحلیل اجزای محدود و مدل‌سازی دینامیکی، منجر به بهبود توزیع تنش، کاهش جرم روتور و افزایش پایداری آن در سرعت‌های بسیار بالا شده است.

در حوزه یاتاقان‌های مغناطیسی نیز پیشرفت‌های قابل توجهی در طراحی ساختار، توسعه مواد مغناطیسی، فناوری حسگرها و الگوریتم‌های کنترل حاصل شده است. این پیشرفت‌ها موجب افزایش ظرفیت باربری، بهبود دقت موقعیت‌یابی، کاهش مصرف انرژی و افزایش قابلیت اطمینان سامانه شده و زمینه استفاده گسترده‌تر از یاتاقان‌های فعال، هیبریدی و بدون حسگر را در سامانه‌های پرسرعت فراهم کرده است.

به‌موازات این پیشرفت‌ها، توسعه موتور/ژنراتورهای سنکرون آهنربای دائم، بهینه‌سازی طراحی الکترومغناطیسی و پیشرفت فناوری مبدل‌های الکترونیک قدرت، افزایش قابل توجه چگالی توان، راندمان تبدیل انرژی و کیفیت کنترل را به همراه داشته است. در نتیجه، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلاپویل امروزه قادرند در محدوده وسیعی از توان و سرعت، عملکردی پایدار، سریع و قابل اطمینان ارائه دهند.

این دستاوردهای فناورانه، زمینه توسعه کاربردهای متنوع سامانه‌های فلاپویل را فراهم کرده است. امروزه این سامانه‌ها در منابع تغذیه بدون وقفه، تنظیم فرکانس و پایداری شبکه‌های قدرت، هموارسازی نوسانات ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر، بازیابی انرژی ترمز در سامانه‌های حمل‌ونقل، مراکز داده، صنایع حساس و سامانه‌های فضایی به‌کار گرفته می‌شوند. ویژگی‌هایی

نظیر زمان پاسخ در حد میلی‌ثانیه، قابلیت شارژ و دشارژ مکرر، طول عمر سیکلی بسیار زیاد، راندمان بالا و نیاز اندک به تعمیر و نگهداری، این فناوری را به یکی از گزینه‌های راهبردی برای ذخیره‌سازی توان بالا و مدیریت پویای انرژی تبدیل کرده است.

چالش‌ها و مسیرهای آینده

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، توسعه و تجاری‌سازی گسترده سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلاپویل همچنان با چالش‌های علمی، فناورانه و اقتصادی متعددی روبه‌رو است. رفع این چالش‌ها مستلزم پیشرفت هم‌زمان در حوزه‌های مواد، طراحی مکانیکی، یاتاقان‌های مغناطیسی، ماشین‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت و سامانه‌های کنترل است.

در حوزه مواد، هزینه بالای کامپوزیت‌های پیشرفته، پیچیدگی فرایند ساخت، محدودیت‌های کنترل کیفیت و دشواری پیش‌بینی رفتار شکست، همچنان از مهم‌ترین موانع توسعه این فناوری محسوب می‌شوند. علاوه بر این، دستیابی هم‌زمان به استحکام ویژه بالا، چقرمگی شکست مناسب، مقاومت خستگی مطلوب، پایداری حرارتی و دوام بلندمدت، همچنان یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش‌های آینده به شمار می‌رود.

در حوزه یاتاقان‌های مغناطیسی، اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه دقت کنترل، ظرفیت باربری و قابلیت اطمینان حاصل شده است، اما تضمین پایداری دینامیکی در سرعت‌های فوق‌بالا، افزایش مقاومت در برابر اغتشاشات، کاهش مصرف انرژی، حذف حسگرهای موقعیت، کاهش هزینه ساخت و افزایش تحمل خطا همچنان از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو محسوب می‌شوند. از این‌رو، توسعه مواد مغناطیسی کم‌هزینه، طراحی ساختارهای هیبریدی نوین، الگوریتم‌های کنترل مقاوم و تطبیقی، کنترل بدون حسگر، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و مدل‌سازی دقیق کوپلینگ‌های چندفیزیکی از مهم‌ترین محورهای پژوهشی سال‌های آینده خواهند بود.

در بخش موتور/ژنراتور نیز افزایش راندمان تبدیل انرژی در گستره وسیعی از سرعت، کاهش تلفات آهن، تلفات مسی و تلفات سوئیچینگ، بهبود مدیریت حرارتی، افزایش چگالی توان، کاهش ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی و ارتقای قابلیت اطمینان بلندمدت همچنان در کانون توجه پژوهشگران قرار دارند. هم‌زمان، توسعه نیمه‌رساناهای توان مبتنی بر کاربید سیلیسیم (SiC) و نیتريد گالیم (GaN) فرصت‌های جدیدی را

این، راهبردهای پیشرفته مدیریت حرارتی، پایداری عملکرد سامانه را تضمین می‌کند و الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته، بهره‌برداری با بازده بالا و حداقل اتلاف انرژی را در شرایط عملیاتی گوناگون فراهم می‌آورند.

در آینده، توسعه فناوری ذخیره‌سازی انرژی فلابویل بر افزایش چگالی انرژی، بهبود بازده چرخه کامل و کاهش هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری و نگهداری متمرکز خواهد بود. در حوزه مواد، انتظار می‌رود کامپوزیت‌های پیشرفته با استحکام مکانیکی بیشتر، چگالی کمتر و هزینه تولید پایین‌تر توسعه یابند تا دستیابی به سرعت‌های دورانی بالاتر و در نتیجه افزایش چگالی ذخیره‌سازی انرژی امکان‌پذیر شود. در زمینه یاتاقان‌های مغناطیسی، تمرکز پژوهش‌ها بر افزایش دقت و پایداری کنترل، کاهش مصرف انرژی، توسعه مواد مغناطیسی مقرون‌به‌صرفه، طراحی الگوریتم‌های پیشرفته برای سرکوب ارتعاشات و ارتقای مقاومت سامانه در برابر اغتشاش‌ها و تداخلات محیطی در شرایط کاری پیچیده خواهد بود. همچنین، در بخش موتور/ژنراتور، افزایش بازده تبدیل انرژی، ارتقای چگالی توان و طراحی ماشین‌های الکتریکی اختصاصی متناسب با الزامات سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل، از مهم‌ترین محورهای توسعه آینده به‌شمار می‌روند.

از منظر کاربردی، فناوری ذخیره‌سازی انرژی فلابویل نقش پررنگ‌تری در یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه برق، توسعه شبکه‌های هوشمند و سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی ایفا خواهد کرد. این فناوری، با تکمیل سایر روش‌های ذخیره‌سازی انرژی، زمینه توسعه سامانه‌های انرژی کارآمد، پایدار و سازگار با محیط زیست را فراهم می‌سازد. در نهایت، با بلوغ تدریجی فناوری، پیشرفت در فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، انتظار می‌رود کاربرد تجاری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل به‌طور چشمگیری گسترش یابد و این فناوری به یکی از اجزای کلیدی زیرساخت‌های آینده انرژی تبدیل شود.

برای افزایش راندمان مبدل‌های قدرت، کاهش ابعاد سامانه و بهبود عملکرد در فرکانس‌های سوئیچینگ بالا فراهم کرده است. در سطح سامانه نیز انتظار می‌رود تمرکز پژوهش‌های آینده بیش از گذشته بر طراحی یکپارچه، هم‌بهنه‌سازی تمامی زیرسامانه‌ها، توسعه کنترل هوشمند، استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، تشخیص هوشمند خطا و مدیریت انرژی مبتنی بر داده متمرکز شود. چنین رویکردی می‌تواند ضمن کاهش هزینه چرخه عمر، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود بهره‌وری انرژی، جایگاه فناوری ذخیره‌سازی انرژی فلابویل را در سامانه‌های انرژی آینده، ریزشبکه‌ها، شبکه‌های هوشمند و صنایع پرمصرف به‌طور چشمگیری تقویت کند.

در مجموع، یاتاقان‌های مغناطیسی به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی سامانه‌های دوار پرسرعت، نقشی فراتر از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل یافته‌اند و امروزه در صنایع هوافضا، تجهیزات پزشکی، کمپرسورهای پرسرعت، توربو ماشین‌ها، سامانه‌های خلأ، صنایع نیمه‌رسانا و شبکه‌های قدرت هوشمند نیز به‌کار گرفته می‌شوند. استمرار پیشرفت در طراحی، مواد، کنترل و یکپارچه‌سازی این فناوری، یکی از عوامل تعیین‌کننده در توسعه نسل آینده سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی با چگالی توان بالا، راندمان بیشتر، قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه چرخه عمر کمتر خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

فناوری ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر فلابویل (چرخ‌طیار)، به‌عنوان یک راهکار فیزیکی، کارآمد، سازگار با محیط زیست و برخوردار از عمر مفید طولانی، از ظرفیت‌های کاربردی گسترده‌ای در سامانه‌های نوین انرژی برخوردار است. پیشرفت مستمر در عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلابویل حاصل پژوهش، توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های کلیدی، شامل روتور فلابویل، یاتاقان‌های مغناطیسی، واحدهای موتور/ژنراتور، سامانه‌های مدیریت حرارتی و فناوری‌های یکپارچه‌سازی و کنترل بوده است. به‌کارگیری یاتاقان‌های مغناطیسی با حذف تماس و اصطکاک مکانیکی، بازده و طول عمر سامانه را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. همچنین، تبدیل انرژی الکترومکانیکی با راندمان بالا در واحد موتور/ژنراتور، فرآیندهای شارژ و دشارژ را با کارایی مطلوب امکان‌پذیر می‌سازد. افزون بر

۶- مراجع

- Choi, H. S., Lee, S. H., & Park, I. H. (2005). General formulation of equivalent magnetic charge method for force density distribution on interface of different materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 1420–1423.
- Chong, Y. C., Staton, D., Gai, Y. H., Adam, H., & Popescu, M. (2024). Review of advanced cooling systems of modern electric machines for EMobility application. In *The 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, *IEEE*, 149–154.
- Dellinger, S. J., Smith, A. O., & Stmat, K. J. (2005). Field and force calculations for use in passive magnetic bearing systems employing rare earth magnets. Paper No. 6. In *Proceedings of the 8th International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications*, 153–164.
- Derkouche, D., Kouzi, K., Beddi, A., Birame, M., Hamidat, M., & Abdesselam, B. (2025). Synergetic control of multiphase induction wind generator associated with flywheel energy storage system controlled by smooth sliding mode. In *Proceedings of the 2025 6th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, Ghardaia, Algeria, 1–6.
- Dumont, C., Kluyskens, V., & Dehez, B. (2020). Null-flux radial electrodynamic bearing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50, 8102212.
- Espenhahn, T., & Hühne, R. (2026). Levitation characteristics of a fully superconducting magnetic bearing. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 36, 3601105.
- Fang, J. C., Sun, J. J., Xu, Y. L., & Wang, X. (2009). A new structure for permanent-magnet-biased axial hybrid magnetic bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45, 5319–5325.
- Fang, S. H., Lv, Z. T., & Chao, G. (2024). Methods of increasing the energy storage density of superconducting flywheel. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31, 5700705.
- Fu, X. D., Cao, G. Z., Huang, S. D., & Wu, C. (2020). Fuzzy PID control of the planar switched reluctance motor for precision positioning. In *Proceedings of the 2020 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications—Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*, Hong Kong, China, 1–4.
- Azukizawa, T., Yamamoto, S., & Matsuo, N. (2018). Feasibility study of a passive magnetic bearing using the ring shaped permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44, 4277–4280.
- Bianchini, C., Torreggiani, A., David, D., & Bellini, A. (2025). Design of motor/generator for flywheel batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68, 9675–9684.
- Blumenstock, K., & Brown, G. (2011). Novel integrated radial and axial magnetic bearing. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings, International Center for Magnetic Bearings, Zurich, Switzerland*, 467–471.
- Chen, B., Fan, L. Y., Zhang, J. W., Wang, D. L., & Kang, J. T. (2018). Research on joint frequency modulation control of grid-connected system of doubly-fed wind turbine based on flywheel energy storage device. *Electrotech. Technology*, 2018, 71–73, 76–77.
- Chen, D., & Feng, M. (2015). Influence of electromagnetic structure on eddy current loss of rotor of high speed permanent magnet motor. *Micromotor*, 48, 11–15.
- Chen, H. S., Li, H., Xu, Y. J., Xu, H. D., Wang, L., Zhou, X. Z., Chen, M., Hu, D. H., Yan, J. W., & Li, X. F. (2025). Research progress of energy storage technologies in China in 2023. *Energy Storage Science and Technology*, 13, 1359–1397.
- Chen, L., Wang, L., Lin, X. P., Chen, H. S., & Dai, J. X. (2019). Analysis on research status of thermal management of flywheel energy storage system. *Sino Global Energy*, 24, 84–91.
- Chen, Y. H., Jiang, D., Shuai, Y. X., Ding, J. F., Zhou, M. Q., & Liu, Z. C. (2026). Fault diagnosis and fault-tolerant method for current sensors in active magnetic bearings utilizing multi-current sensor information. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. Epub ahead of print.
- Chen, Y. L., Du, L., Sun, Q., Bai, J., Li, H. T., & Shi, Y. Y. (2024). Self-calibration method of displacement sensor in AMB-rotor system based on magnetic bearing current control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71, 5148–5156.

- Ingale, N. M., & Mankar, V. M. (2020). Design of energy storage system with flywheel and electrical drives. In Proceedings of the 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), *IEEE*. 2074–2077.
- Jia, Y., Wu, Z. K., Zhang, J. H., Yang, P. H., & Zhang, Z. L. (2026). Control strategy of flywheel energy storage system based on primary frequency modulation of wind power. *Energies*, 15, 1850.
- Jiang, K. J., Zhu, C. S., & Chen, L. L. (2020). Unbalance compensation by recursive seeking unbalance mass position in active magnetic bearing-rotor system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 5655–5664.
- Jiao, Y. Y., Dai, X. J., Wang, Y. F., Wei, L., Zhang, H. L., & Chen, H. S. (2025). Case study on flywheel energy storage systems: LPTN-based transient thermal analysis. *Journal of Energy Storage*, 120, 116319.
- Jiao, Y. Y., Wang, Y. F., Dai, X. J., Wei, L., Zhang, H. L., & Chen, H. S. (2023). Overview of the motor generator rotor cooling system in a flywheel energy storage system. *Energy Storage Science and Technology*, 12, 3131–3144.
- Kulkarni, D. P., Rupertus, G., & Chen, E. (2018). Experimental investigation of contact resistance for water cooled jacket for electric motors and generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27, 204–210.
- Kumar, S., Lipo, T. A., & Kwon, B.-I. (2019). A 32,000 r/min axial flux permanent magnet machine for energy storage with mechanical stress analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52, 8205004.
- Kushwaha, A., Endla, N., & Fernandes, B. G. (2024). Motor integrated rotating permanent magnet based electrodynamic suspension device: Part II—Investigation of coupled topology. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 38, 1715–1726.
- Lee, K. H., Cha, H. R., & Kim, Y. B. (2020). Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 95, 348–356.
- Li, J. Q., & Zhu, H. Q. (2026). Rotor displacement self-sensing technology of six-pole radial active magnetic bearing based on KalmanNet. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 14, 738–747.
- Gao, C. H., Liu, C. H., Zheng, B. W., & Jing, L. L. (2024). Application research of flywheel energy storage system in wind power frequency regulation. *Technology Innovation and Application*, 12, 161–164.
- García, P., Guerrero, J. M., Briz, F., & Reigosa, D. (2017). Sensorless control of three-pole active magnetic bearings using saliency-tracking based methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46, 1476–1484.
- Gronwald, P. O., & Kern, T. A. (2025). Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7, 2892–2913.
- He, Q., Wang, J. W., Li, K. S., Wang, X. S., Xu, Z. H., & Zhang, Y. B. (2025). Thermal analysis and thermal management of high power density electric motors for aircraft electrification. *Applied Thermal Engineering*, 260, 125006.
- Hoai, H. K., Chen, S., & Than, H. (2024). Realization of the sensorless permanent magnet synchronous motor drive control system with an intelligent controller. *Electronics*, 9, 365.
- Hu, D. X., Dai, X. J., Niu, Z. H., Xu, Y., & Chen, H. S. (2024). Unbalance response analysis on the high speed flywheel motor supported by active magnetic bearings. In *Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Wuhan, China, 3745–3748.
- Hu, J. C., Wu, H. C., Fang, K. P., & Li, Q. (2023). Overview on structure of permanent magnetic bearings. *Bearing*, 7, 1–7.
- Hu, Y. S., Chen, B., & Gong, G. (2023). Structural analysis of the eddy current displacement sensor for magnetic levitation centrifugal compressors. In *Proceedings of the 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Zhuhai, China. 3012–3016.
- Hu, Y., Taha, O. W., & Yang, K. (2026). Fault detection in active magnetic bearings using digital twin technology. *Applied Sciences*, 14, 1384.
- Huang, Z. Y., Fang, J. C., Liu, X. Q., & Han, B. C. (2020). Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 2027–2035.

- optimized by improved mind evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 41, 1841–1852.
- Masuzawa, T., Kojima, J., Onuma, H., Okada, Y., Nishida, M., & Yamane, T. (2018). Micro magnetic bearing for an axial flow artificial heart. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Magnetic Bearings*, 89–94. University of Kentucky, Lexington, KY, USA.
- Maxence, B. V., Virginie, K., & Bruno, D. (2020). Optimal sizing and comparison of permanent magnet thrust bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53, 8300110.
- Mizuno, T., Araki, K., & Bleuler, H. (2006). Stability analysis of self-sensing magnetic bearing controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4, 572–579.
- Nadeem, F., Hussain, S. M. S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K., & Ustun, T. S. (2024). Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems. *IEEE Access*, 7, 4555–4585.
- Nazari, A., & Keypour, R. (2023). A two-stage stochastic model for energy storage planning in a microgrid incorporating bilateral contracts and demand response program. *Journal of Energy Storage*, 21, 281–294.
- Petkar, S. G., & Thippiripati, V. K. (2023). A novel duty-controlled DTC of a surface PMSM drive with reduced torque and flux ripples. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70, 3373–3383.
- Qi, Z. N., Zhang, Y., Yu, S. Y., & Fu, Z. J. (2025). Design and analysis of the multilayer sleeve structure for the rotor eddy current loss reduction of a high-speed permanent magnet motor for flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 11, 11398–11409.
- Satrustegui, M. (2021). Thermal and hydraulic design of water-based cooling systems for electrical machines [Master's thesis, Universidad de Navarra, Pamplona, Spain].
- Shi, H., Chen, Q., Liao, J. H., Zhou, Y. N., Xu, G. H., & Liu, G. H. (2025). Design and optimization of dual-air duct cooling system for rotor permanent magnet flux-switching motor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 11, 7029–7039.
- Sun, M. X., Xu, Y. L., & Zhang, W. J. (2023). Multiphysics analysis of flywheel energy storage system based on cup winding permanent magnet synchronous machine. *IEEE*
- Li, J., Xia, Y. Q., Qi, X. H., & Gao, Z. Q. (2017). On the necessity, scheme, and basis of the linear–nonlinear switching in active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 1425–1435.
- Li, T., Sun, X., Lei, G., Guo, Y., Yang, Z., & Zhu, J. (2022). Finite control set model predictive control of permanent magnet synchronous motor drive systems—An overview. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9, 2087–2105.
- Li, T., Sun, X., Yao, M., Guo, D., & Sun, Y. P. (2024). Improved finite control set model predictive current control for permanent magnet synchronous motor with sliding mode observer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10, 699–710.
- Li, W. X., Yang, T. H., & Xin, Y. (2024). Principle, modeling and experiment of a new axial-type superconducting magnetic bearing with superconducting coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34, 3601705.
- Li, X. J., Anvari, B., Palazzolo, A., Wang, Z. Y., & Toliyat, H. (2021). A utility-scale flywheel energy storage system with a shaftless, hubless, high-strength steel rotor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 6667–6675.
- Li, Y., Fan, T., Sun, W., Li, Q., & Wen, X. H. (2017). Experimental research on the oil cooling of the end winding of the motor. In *The 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE. 1–4.
- Lim, J., Lee, C. Y., Oh, Y. J., & Choi, S. Y. (2024). Performance evaluation of superconducting electrodynamic suspension for hyperloop using static experiments. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34, 3601906.
- Liu, K., Yin, M., Hua, W., Ma, Z. Q., Lin, M. Y., & Kong, Y. (2024). Design and optimization of an external rotor ironless BLDCM used in a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54, 8109105.
- Ma, X. Y., & Li, W. Y. (2024). Comparison and finite-element analysis of energy-storage characteristics of flywheel rotors with different materials. *Journal of Machine Design*, 41, 21–27.
- Ma, Z. H., & Zhu, H. Q. (2026). Decoupling control of six-pole radial active magnetic bearings based on BP neural network inverse

- magnetic pull. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 31, 1324–1333.
- Wang, K., Wang, D., Lin, H. Y., Shen, Y., Zhang, X. B., & Yang, H. (2014). Analytical modeling of permanent magnet biased axial magnetic bearing with multiple air gaps. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50, 8002004.
- Wang, W., Li, Y., Shi, M., & Song, Y. L. (2021). Optimization and control of battery-flywheel compound energy storage system during an electric vehicle braking. *Energy*, 226, 120404.
- Wang, X., Zhou, J., & Qin, B. (2025). Coordinated power smoothing control strategy of multi-wind turbines and energy storage systems in wind farm based on MADRL. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 15, 368–380.
- Wei, L., & Zhu, C. S. (2026). Air-friction loss characteristics and thermal analysis of MW-class permanent magnet synchronous motor with active magnetic bearings. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. Epub ahead of print.
- Wu, M. Y., Zhu, H. Q., Zhang, H., & Zhang, W. Y. (2026). Modeling and multilevel design optimization of an AC–DC three-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70, 233–242.
- Xiao, L., Yao, Y. X., Li, Y. C., Chen, W. J., Sun, Y. H., & Yang, B. S. (2026). Cascaded displacement–flux density control of the thrust magnetic bearings based on an effective inductance-based eddy current compensation model. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. Epub ahead of print.
- Xie, Y. Y., Chen, L. K., Wang, X. D., Zhang, J. L., Leonardi, F., Sung, B. M., Munoz, A. R., & Degner, M. W. (2025). In-slot direct cooling design and optimization for electric machines. *In The 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, IEEE. 1–8.
- Xu, D. H. (2016). Design of motor and shaft system for flywheel energy storage system [Master's thesis, Zhejiang University, Hangzhou, China].
- Xu, F., Dai, X. J., Wang, Y. L., Hu, D. X., Zhang, H. L., & Chen, H. S. (2024). Research progress on permanent magnet machines for flywheel energy storage. *Energy Storage Science and Technology*, 13, 3423–3441.
- Transactions on Energy Conversion*, 38, 2684–2694.
- Sun, X. Y., Zeng, Y. S., Han, R. Z., & Shang, R. Y. (2025). Design and performance evaluation of solid rotor induction machine for inertia flywheel energy storage system. *In Proceedings of the 2025 IEEE 8th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Changsha, China. 2216–2221.
- Sun, Y. H., Ho, Y. S., & Lie, Y. (2009). Dynamic stiffnesses of active magnetic thrust bearing including eddy-current effects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45, 139–149.
- Supreeth, D. K., Siddappa, I. B., & Shivamurthy, R. C. (2025). An overview on electrodynamic bearings. *IEEE Access*, 10, 57437–57451.
- Tang, S. Q. (2024). Research on theory of magnetic suspension supporting system and application for flywheel battery [PhD thesis, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China].
- Tang, Y., Sun, Y. L., Guo, Z. J., Shi, W. Z., Yuan, W., Heng, T., & Liang, F. (2023). Development status and perspective trend of motor cooling systems. *China Mechanical Engineering*, 32, 1135–1150.
- Voß, A., Storey, J. G., Porteous, L., Scheunemann, P., & Badcock, R. A. (2026). Stroboscopic imaging system for studying the dynamics of superconducting levitation bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 36, 3601305.
- Wang, C., Zhang, Z. R., & Liu, Y. (2021). Optimization of rotor eddy-current loss and heat dissipation for high torque density hybrid excitation synchronous motor with magnetic shunting rotor. *Proceedings of the CSEE*, 41, 7476–7486.
- Wang, D. Y., & Zhang, G. M. (2026). Study on levitation force characteristics of superconducting magnetic levitation bearings: Experimental and simulation analysis. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 36, 3600908.
- Wang, H. Z., Liu, K., Wei, J. B., & Hu, H. J. (2023). Analytical modeling of air gap magnetic fields and bearing force of a novel hybrid magnetic thrust bearing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57, 4900107.
- Wang, K., Ge, Y. C., Zhou, J. X., Zheng, S. Q., Dong, B. T., & Wang, C. (2025). High-precision field dynamic balancing for high-speed AMB-rotor considering unbalanced

- Zhang, D. J., Xiong, W. L., Lv, L., & Deng, Z. H. (2017). An analysis of rotor eddy current losses in high-speed and high-power PMSM. *Computer Simulation*, 34, 236–240, 279.
- Zhang, W. Y., & Guo, F. (2025). Research on sensorless technology of a magnetic suspension flywheel battery based on a genetic BP neural network. *Actuators*, 14, 174.
- Zhang, W. Y., & Xu, A. J. (2025). Accurate suspension force modeling and its control system design based on the consideration of degree-of-freedom interaction. *Actuators*, 14, 61.
- Zhang, W. Y., & Zhou, W. J. (2025). Prediction model of flywheel motor and eccentric characteristics analysis of vehicle emergency braking conditions. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 11, 9072–9083.
- Zhang, W. Y., & Zhu, H. Q. (2012). Modeling of radial suspension force in AC magnetic bearings based on Maxwell tensor method. *Chinese Science Bulletin*, 57, 976–986.
- Zhang, W. Y., & Zhu, H. Q. (2012). The influence of eddy current effect on parameter design of magnetic levitation bearings and optimization design. *Journal of Electrical Machines and Control*, 16, 67–77.
- Zhang, W. Y., & Zhu, H. Q. (2013). Improved model and experiment for AC-DC three-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49, 5554–5565.
- Zhang, W. Y., & Zhu, H. Q. (2015). Control system design for a five-degree-of-freedom electrospindle supported with AC hybrid magnetic bearings. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20, 2525–2537.
- Zhang, W. Y., & Zhu, H. Q. (2017). Radial magnetic bearings: An overview. *Results in Physics*, 7, 3756–3766.
- Zhang, W. Y., Neng, H. R., Zheng, S. Q., & Zhu, H. Q. (2026). Fault detection for displacement sensors in vehicle-mounted flywheel battery based on dynamic self-adjusting LMS optimized by deep learning. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. Epub ahead of print.
- Zhang, W. Y., Wang, J. P., Zhu, P. F., & Yu, J. X. (2024). A novel vehicle-mounted magnetic suspension flywheel battery with a virtual inertia spindle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69, 5973–5983.
- Xu, S. L., & Fang, J. C. (2019). A novel conical active magnetic bearing with claw structure. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50, 8101108.
- Xu, S. L., Sun, J. J., & Ren, H. L. (2025). An active magnetic bearing with controllable permanent-magnet bias field. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27, 3474–3481.
- Xu, Z. Y., Xu, Y. M., Gai, Y. H., & Liu, W. H. (2023). Thermal management of drive motor for transportation: Analysis methods, key factors in thermal analysis, and cooling methods—A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9, 4751–4774.
- Yang, J. T., Liu, P., Ye, C. Y., Wang, L., & Zhang, X. F. (2025). Multidisciplinary design of high-speed solid rotor homopolar inductor machine for flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7, 485–496.
- Yang, S. M., & Tao, W. Q. (2006). Heat Transfer (4th ed.). Higher Education Press.
- Yao, J. Y., Wang, H. J., Zhang, Y., Zhang, H., & Zhang, F. G. (2025). Magnetic properties analysis of novel composite magnetic materials for HSPMSMs. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58, 8104310.
- Yonnet, J. P. (1981). Analytical calculation of magnetic bearings. In Proceedings of the 5th International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications, Paper No. 3.199–216.
- Yonnet, J. P. (1981). Permanent magnet bearing and couplings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 17, 1169–1173.
- Yonnet, J. P. (2010). Passive magnetic bearings with permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 803–805.
- Yoo, S. Y., Kim, W. Y., Kim, S. J., Lee, W. R., Bae, Y. C., & Noh, M. (2016). Optimal design of non-contact thrust bearing using permanent magnet rings. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 1009–1014.
- Yu, M. H., Zhang, Y. Q., Qiao, Z. Z., Zhang, B., & Zheng, J. H. (2015). Research on loss separation method of permanent magnet synchronous motor. *Small Special Electrical Machines*, 43, 14–18.
- Zerdali, E., Rivera, M., & Wheeler, P. (2024). A review on weighting factor design of finite control set model predictive control strategies for AC electric drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39, 9967–9981.

- Zhang, W. Y., Zhu, H. Q., Yang, Z. B., Sun, X. D., & Yuan, Y. (2016). Nonlinear model analysis and “switching model” of AC–DC three degree-of-freedom hybrid magnetic bearing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21, 1102–1115.
- Zhang, X., & Yang, J. (2017). A robust flywheel energy storage system discharge strategy for wide speed range operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 7862–7873.
- Zheng, J. Y., Lyu, Q. C., Lyu, D. Y., & Li, X. M. (2024). Stability test analysis and design of high-load magnetic bearing assembly for the rotor of flywheel energy storage system. In *Proceedings of the 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, hanghai, China. 577–582.S
- Zheng, X. C. (2024). Research on high-reliability operation control strategy of flywheel energy storage motor [Master’s thesis, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China].
- Zhang, W. Y., Wang, J. W., Li, A., & Xiang, Q. W. (2024). Multiphysics fields analysis and optimization design of a novel saucer-shaped magnetic suspension flywheel battery. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10, 5473–5483.
- Zhang, W. Y., Yang, H. K., Cheng, L., & Zhu, H. Q. (2020). Modeling based on exact segmentation of magnetic field for a centripetal force type magnetic bearing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 7691–7701.
- Zhang, W. Y., Zhang, L. D., & Yu, Y. J. (2024). Review on key technologies for stable operation of magnetic levitation support-flywheel system. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 57, 627–639.
- Zhang, W. Y., Zhang, X. X., Yu, J. X., & Wang, Z. (2023). Accurate modeling of a flywheel motor considering vehicle start-up driving conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70, 6057–6067.

Research on the Design, Modeling, and Performance Optimization of a Flywheel Energy Storage System with Magnetic Bearings for Regenerative Braking Energy Recovery, Power Support, and Energy Efficiency Enhancement in Urban Rail Transit Systems

Ali Jandoust, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Shahram Etemadi Haghighi, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.

Pejman Salehi, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: setemadi@srbiau.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

With the expansion of urban rail transit systems and the growing importance of reducing energy consumption and environmental emissions, regenerative braking energy recovery has become a key component in improving the energy efficiency of railway networks. In this context, flywheel energy storage systems equipped with magnetic bearings have emerged as a promising option for energy storage in metro systems due to their high-power density, rapid charging and discharging capability, favorable round-trip efficiency, long service life, and low maintenance requirements. The present study aims to develop an integrated framework for the design, modeling, and performance optimization of a flywheel energy storage system with magnetic bearings for regenerative braking energy recovery, traction power support, and energy efficiency enhancement in urban rail transit systems. Within this framework, flywheel structural design, rotor material selection, magnetic bearing modeling, electromechanical coupling of the motor-generator, thermal management, and integration of the energy storage system with the traction power supply network are investigated. Furthermore, the effects of key parameters on rotor dynamic stability, vibration control, transient response, power-flow management, and system performance optimization strategies under different operating conditions are analyzed. In addition, technical and implementation challenges, including the high cost of advanced materials, the complexity of magnetic bearing control, thermal limitations, and reliability requirements, are evaluated, and potential solutions are proposed to improve system performance and facilitate the practical implementation of this technology. The findings of this study provide a scientific and engineering basis for the development of high-efficiency flywheel energy storage systems and demonstrate the potential of this technology to enhance regenerative braking energy recovery, provide power support, mitigate fluctuations in traction power networks, and improve energy efficiency in urban rail transit systems.

Keywords: Flywheel Energy Storage System with Magnetic Bearing, Regenerative Braking Energy Recovery, Traction Power Support, Multi-Objective Optimization of System Performance, Energy Management in Urban Rail Transportation, Integration of Storage System with Traction Network