تعیین ظرفیت و مکان بهینه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده در خط ۵ متروی تهران–کرج

مقاله علمی – پژوهشی

علی جاندوست، گروه مهندسی مکانیک، واحد 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: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵
صفحه ۲۷۰–۲۵۳

چکیده

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل (FESS) به دلیل پاسخ دینامیکی سریع و عمر چرخه‌ای طولانی، راهکاری مؤثر برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی هستند؛ با این حال، کارایی این سامانه‌ها وابستگی مستقیمی به عملکرد ماشین الکتریکی یکپارچه با روتور دارد. هدف این پژوهش، ارزیابی تطبیقی دو توپولوژی ماشین الکتریکی آهنربای دائم با شار محوری (AFPM)، شامل ساختار «با هسته استاتور» و «بدون هسته استاتور»، جهت تعیین پیکربندی بهینه برای کاربردهای پرسرعت ذخیره‌سازی انرژی است. در این مطالعه تحلیلی-شبیه‌سازی، دو نمونه ماشین مدولار با مشخصات نامی یکسان (توان ۱۷٫۵ اسب بخار و محدوده سرعت ۲۵،۰۰۰ تا ۵۰،۰۰۰ دور بر دقیقه) با استفاده از روش اجزای محدود (FEA) مدل‌سازی و از منظر توان ویژه، بازده و تلفات حالت مدار باز مقایسه شدند. یافته‌ها نشان داد که توپولوژی بدون هسته، مستقل از تعداد قطب‌ها، به توان ویژه بالاتری در حدود ۶ کیلووات بر کیلوگرم دست می‌یابد، در حالی که ساختار با هسته به دلیل جرم بالای هسته فرومغناطیسی، توان ویژه پایین‌تری ارائه می‌دهد. همچنین مشخص شد که در سرعت‌های بسیار بالا (۵۰،۰۰۰ rpm)، افزایش تعداد قطب‌ها در ساختار بدون هسته منجر به افت شدید بازده ناشی از تلفات جریان‌های گردابی می‌شود که نیازمند استفاده از هادی‌های چندرشته‌ای (سیم لیتز) است. در مقابل، ساختار با هسته به دلیل محدودیت تلفات هسته در فرکانس‌های بالا، ناچار به استفاده از تعداد قطب‌های کمتر است. نتیجه‌گیری می‌شود که ماشین‌های AFPM بدون هسته به دلیل حذف تلفات هسته و چگالی توان بالاتر، پتانسیل بیشتری برای یکپارچه‌سازی فشرده با دیسک فلایویل دارند، مشروط بر اینکه مدیریت حرارتی و تلفات رسانا با فناوری‌های پیشرفته سیم‌پیچی کنترل شود. این یافته‌ها چارچوب فنی لازم برای انتخاب ماشین الکتریکی بهینه در پروژه‌های آتی بازیابی انرژی مترو را فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، ظرفیت‌یابی بهینه، مکان‌یابی بهینه؛ ترمز احیاکننده، بازیابی انرژی؛ خط ۵ متروی تهران–کرج، ماشین مغناطیس دائم با شار محوری

۱–مقدمه

تحولات اخیر در پارادایم انرژی جهانی، منجر به رشد چشمگیر سهم منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، در سبد تأمین برق شده است. با این حال، ماهیت متناوب و غیرقابل‌پیش‌بینی این منابع، چالش‌های جدی را در زمینه پایداری سامانه، قابلیت اطمینان شبکه و کیفیت توان ایجاد کرده است. در پاسخ به این چالش‌ها، به‌کارگیری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای جداسازی نسبی فرآیند تولید از تقاضا و مدیریت نوسانات ناشی از نفوذ منابع تجدیدپذیر

مطرح شده است (آندریولو و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌زمان با افزایش سهم انرژی‌های پاک، توجه پژوهشگران و صنعت به توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی با بازدهی بالا، عمر طولانی و پاسخ‌دهی سریع، فزونی یافته است. در میان فناوری‌های متنوع ذخیره‌سازی انرژی، شامل ابرخازن‌ها، باتری‌های الکتروشیمیایی، سامانه‌های برق‌آبی پمپی و هوای فشرده، سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل جایگاه ویژه‌ای دارد. مطالعات تطبیقی جامع نشان می‌دهند که سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در مقایسه با سایر روش‌های رایج، از مزایای متمایزی نظیر چگالی توان بسیار بالاتر، عمر چرخه‌ای طولانی‌تر و بازدهی کلی قابل‌قبول برخوردار است؛ هرچند چگالی انرژی آن نسبتاً پایین‌تر ارزیابی می‌شود. این ویژگی‌های فنی، سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی کوتاه‌مدت که نیازمند پاسخ‌دهی دینامیکی سریع هستند، تبدیل کرده است (بلابیرگ و ایونل، ۲۰۲۲). طیف کاربردهای این فناوری گسترده بوده و شامل تأمین توان در منابع تغذیه بدون وقفه، بازیابی انرژی ترمز در خودروهای مسابقه‌ای و وسایل نقلیه عمومی، استفاده در ماشین‌آلات سنگین خارج از جاده، جرثقیل‌های کانتینری و حامل‌های عرضی، تثبیت شبکه‌های برق و حتی تأمین توان پالسی برای سامانه‌های پرتاب الکترومغناطیسی می‌شود. جدول ۱ نیز فهرستی از تولیدکنندگان عمده این سامانه‌ها را با تمرکز بر کاربردهای تأمین توان بدون وقفه، بازیابی انرژی ترمز و پشتیبانی از شبکه ارائه می‌دهد (بویچئا، ۲۰۱۹). با وجود گستردگی کاربردها، یکی از حوزه‌های حیاتی که بهره‌وری انرژی در آن از اهمیت بالایی برخوردار است، سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری، به‌ویژه مترو، می‌باشد. قطارهای مترو به دلیل چرخه‌های مکرر شتاب‌گیری و ترمزگیری، مقدار قابل‌توجهی انرژی الکتریکی را در فاز ترمز احیاکننده تولید می‌کنند. در صورت عدم جذب این انرژی توسط قطارهای دیگر در حال شتاب‌گیری یا شبکه کشش، این انرژی معمولاً به صورت حرارت در مقاومت‌های ترمز ریوستاتیک تلف می‌شود. در این راستا، ادبیات پژوهشی موجود، سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل را از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار داده است؛ از جمله مطالعات در سطح سامانه، تحلیل‌های مکانیکی و دینامیکی روتور و بررسی‌های متمرکز بر کاربردهای خاص. روند اخیر پیشرفت‌های فناورانه در این حوزه بر کاهش نرخ خودتخلیه و گسترش دامنه خدمات جانبی قابل ارائه توسط سامانه‌های فلایویل متمرکز بوده است. این خدمات شامل تنظیم فرکانس، پشتیبانی ولتاژ، تسهیل یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش پیک توان الکتریکی است که همگی ضرورت و امکان‌پذیری به‌کارگیری گسترده‌تر سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل را در کاربردهای شبکه‌ای و به‌ویژه حمل‌ونقل ریلی تأیید می‌کنند (کاواتینو و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در خطوط مترو، مستلزم غلبه بر چالش‌های خاصی است که مستقیماً به شرایط بهره‌برداری خط بستگی دارد. دو پارامتر کلیدی ظرفیت ذخیره‌سازی و مکان نصب سامانه، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر میزان بازیابی انرژی، پروفیل ولتاژ شبکه و اقتصاد پروژه دارند. انتخاب ظرفیت نامناسب می‌تواند منجر به اشباع زودرس سامانه یا عدم بهره‌برداری کامل از پتانسیل انرژی ترمز احیاکننده شود و انتخاب مکان نادرست نیز می‌تواند تلفات انتقال را افزایش داده و اثرات مثبت را کاهش دهد. بنابراین، تعیین هم‌زمان و بهینه این دو پارامتر برای هر خط مترو، با توجه به مشخصات منحصربه‌فرد آن، یک مسئله پژوهشی حیاتی محسوب می‌شود (کانوور و همکاران، ۲۰۲۰). خط ۵ متروی تهران—کرج، به‌عنوان یکی از شریان‌های اصلی حمل‌ونقل ریلی منطقه کلان‌شهری تهران، با ویژگی‌های بهره‌برداری خاص خود، پتانسیل قابل‌توجهی برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده دارد. علی‌رغم مطالعات انجام‌شده در زمینه کلیات سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، شکاف پژوهشی آشکاری در زمینه بهینه‌سازی توأم ظرفیت و مکان‌یابی این سامانه‌ها با در نظر گرفتن دقیق مدل دینامیکی قطار و شبکه کشش خط ۵ متروی تهران—کرج وجود دارد. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به دنبال تعیین ظرفیت و مکان بهینه نصب سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل برای حداکثرسازی بازیابی انرژی ترمز احیاکننده در این خط است. این رویکرد نه‌تنها به کاهش اتلاف انرژی و بهبود بهره‌وری کمک می‌کند، بلکه با کاهش پیک توان درخواستی از شبکه، به پایداری بیشتر سیستم برق‌رسانی مترو نیز یاری می‌رساند.

جدول ۱. تولیدکنندگان عمده سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل و حوزه‌های کاربرد آن‌ها (منبع: آندریولو و همکاران، ۲۰۲۳)

ردیف	شرکت / تولیدکننده	کشور	فناوری / نوع سامانه فلایویل	کاربرد اصلی	حوزه کاربرد مرتبط با پژوهش
۱	Beacon Power	ایالات متحده آمریکا	سامانه فلایویل پرسرعت	ذخیره‌سازی انرژی و خدمات جانبی شبکه	پشتیبانی شبکه، تنظیم فرکانس، کاهش پیک توان
۲	Piller Power Systems	آلمان	سامانه فلایویل یکپارچه با تأمین توان	تأمین توان بدون وقفه	تأمین توان بدون وقفه، پشتیبانی شبکه
۳	Vycon	ایالات متحده آمریکا	سامانه فلایویل پرقدرت	بازیابی انرژی و تأمین توان کوتاه‌مدت	بازیابی انرژی ترمز، حمل‌ونقل ریلی
٤	Temporal Power	کانادا	سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل	ذخیره‌سازی و پشتیبانی شبکه	تنظیم فرکانس و پشتیبانی شبکه
٥	Stornetic	آلمان	سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل	ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت توان	حمل‌ونقل ریلی، بازیابی انرژی ترمز، شبکه
٦	Amber Kinetics	ایالات متحده آمریکا	فلایویل با زمان تخلیه طولانی	ذخیره‌سازی انرژی شبکه‌ای	پشتیبانی شبکه و مدیریت انرژی
۷	Active Power	ایالات متحده آمریکا	سیستم فلایویل یکپارچه	تأمین توان بدون وقفه	تأمین توان بدون وقفه و پشتیبان توان
۸	Ricardo / Torotrak	بریتانیا	سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار	بازیابی انرژی خودرو	بازیابی انرژی ترمز در وسایل نقلیه
۹	Calnetix Technologies	ایالات متحده آمریکا	فلایویل پرسرعت با یاتاقان مغناطیسی	ذخیره‌سازی انرژی و کاربردهای توان بالا	بازیابی انرژی و پشتیبانی توان
۱۰	Kinetic Traction Systems (KTS)	ایالات متحده آمریکا	سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل	بازیابی انرژی ترمز ریلی	حمل‌ونقل ریلی و کاهش مصرف انرژی

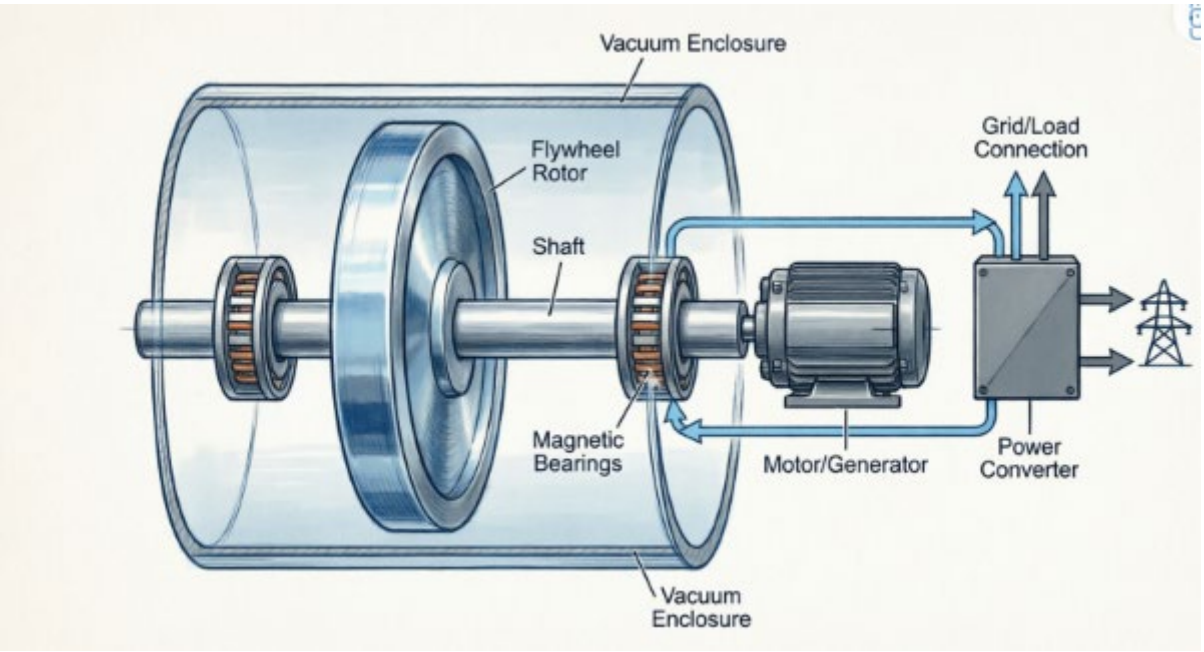
۲- مبانی نظری و مدل‌سازی سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل (FESS)

در راستای تعیین ظرفیت و مکان بهینه سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل برای بازیابی انرژی ترمز احیاکننده در خط ۵ متروی تهران–کرج، شناخت دقیق ساختار، رفتار دینامیکی و محدودیت‌های فنی این سامانه ضروری است. در این بخش، پیکربندی و اصول عملکرد سامانه، روابط حاکم بر تعیین ظرفیت روتور، محدودیت‌های مکانیکی و معیارهای انتخاب ماده، مشخصات فنی نمونه‌های تجاری و شاخص‌های کلیدی عملکرد بررسی می‌شوند. این مبانی، چارچوب لازم برای مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی سامانه و در نهایت تعیین هم‌زمان ظرفیت و مکان بهینه نصب آن در شبکه کشش خط ۵ متروی تهران–کرج را فراهم می‌کنند.

الف) پیکربندی و اصول عملکرد سامانه

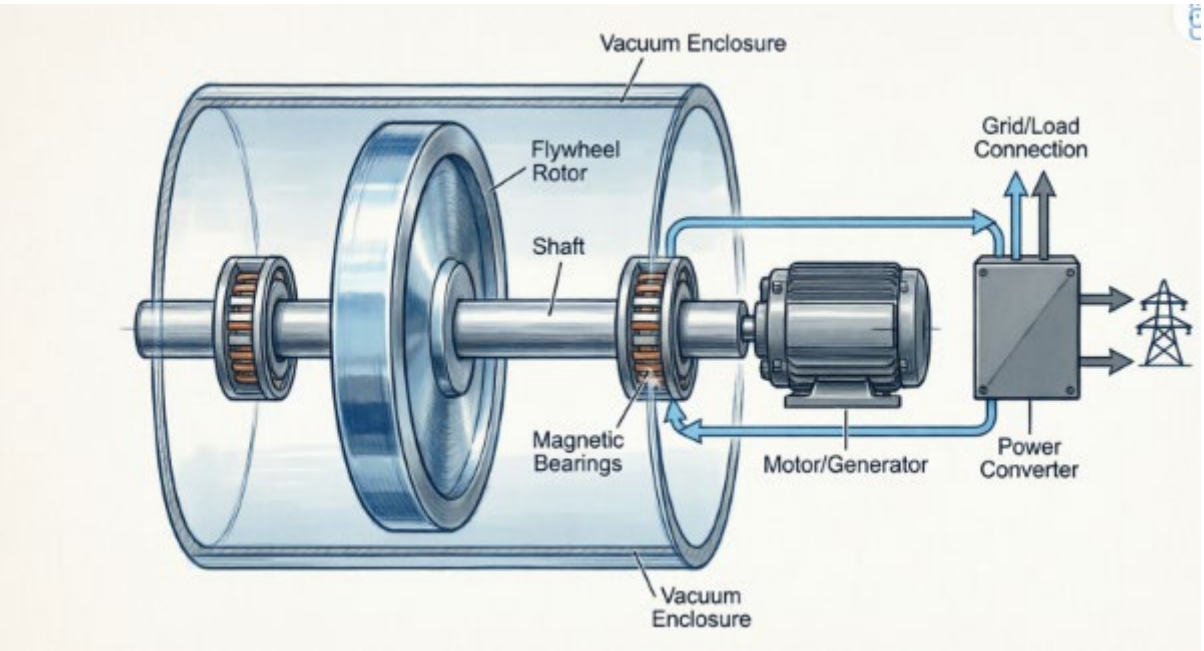
فلایویل، ماشین الکتریکی با عملکرد دوگانه موتور/ژنراتور به همراه مبدل توان (درایو)، سامانه یاتاقان و محفظه نگهدارنده (محفظه خلأ) تشکیل می‌شود. در کاربردهای مترویی، این سامانه

برای مدیریت نوسانات سریع توان ناشی از ترمزگیری و شتاب‌گیری قطارها به کار گرفته می‌شود. روتور فلایویل به‌عنوان عنصر ذخیره‌ساز، انرژی الکتریکی مازاد حاصل از ترمز احیاکننده قطار را دریافت کرده و آن را به انرژی جنبشی دورانی تبدیل و در خود ذخیره می‌کند (دراگونی، ۲۰۲۴).



شکل ۱. ساختار و اجزای اصلی سامانه متعارف ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در کاربردهای مترویی

یک سامانه متعارف ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، از چهار جزء اصلی شامل روتور فرآیند تبدیل و مدیریت انرژی توسط ماشین الکتریکی و سامانه درایو در سه وضعیت عملیاتی «شارژ»، «دشارژ» و «آماده‌به‌کار» انجام می‌شود که این تعامل در شکل ۲ نیز نشان داده شده است. در حالت شارژ، هنگام ترمزگیری قطار، ماشین الکتریکی در نقش موتور عمل کرده و با اعمال گشتاور مثبت به روتور، سرعت چرخش آن را افزایش می‌دهد. در این وضعیت، انرژی الکتریکی بازیافت‌شده از شبکه کشش به انرژی جنبشی تبدیل شده و در روتور ذخیره می‌شود. در حالت دشارژ، هنگام شتاب‌گیری قطار یا افت ولتاژ شبکه، ماشین الکتریکی در نقش ژنراتور فعالیت می‌کند. با کاهش سرعت روتور، انرژی جنبشی ذخیره‌شده مجدداً به انرژی الکتریکی تبدیل شده و به شبکه تزریق می‌شود تا بار الکتریکی قطار یا سایر مصرف‌کنندگان را تأمین کند. در حالت آماده‌به‌کار، در فاصله میان رویدادهای ترمز و شتاب، روتور با سرعت ثابت یا با نرخ کاهش بسیار اندک به چرخش ادامه می‌دهد. در این وضعیت، سامانه باید حداقل تلفات ممکن را داشته باشد تا انرژی ذخیره‌شده برای رویداد بعدی حفظ شود (سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌فلایویل برای کاربردهای سیستم‌های قدرت، ۲۰۲۱).



شکل ۲. حالات عملیاتی و فرآیند تبدیل و مدیریت انرژی در سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در کاربردهای مترویی

یاتاقان‌ها نقش مهمی در عملکرد و کارایی سامانه دارند؛ زیرا وظیفه نگه‌داشتن روتور در موقعیت محوری و شعاعی با حداقل اصطکاک را بر عهده دارند. بسته به معماری سامانه، یاتاقان‌ها می‌توانند از نوع مکانیکی، مغناطیسی (اعم از فعال یا غیرفعال) و یا هیبریدی باشند. در سامانه‌های پیشرفته مورد استفاده در کاربردهای ترانزیتی، یاتاقان‌های مغناطیسی به دلیل حذف تماس مکانیکی می‌توانند موجب افزایش طول عمر، کاهش چشمگیر تلفات اصطکاکی و کاهش نیازهای تعمیر و نگهداری شوند (فلین و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، فناوری‌های نوین مانند یاتاقان‌های مبتنی بر ابررسانایی دمای بالا (HTS) برای معلق‌سازی روتور پیشنهاد شده‌اند (گارسیا–گراسیا و همکاران، ۲۰۱۸). یاتاقان‌های مکانیکی نیز معمولاً به‌عنوان یاتاقان‌های کمکی یا اضطراری، برای نگهداری روتور در سرعت‌های پایین (از جمله هنگام توقف کامل) یا در شرایط بروز خطا در سامانه مغناطیسی، به کار گرفته می‌شوند.

محفظه نگهدارنده، علاوه بر ایجاد محیط خلأ با هدف کاهش پسای آیرودینامیکی که یکی از عوامل اصلی تلفات در سرعت‌های بالا است، وظیفه تأمین ایمنی سامانه را نیز بر عهده دارد. این محفظه باید در برابر تنش‌های ناشی از احتمال گسیختگی روتور مقاومت کافی داشته باشد و از پرتاب قطعات به محیط پیرامون جلوگیری کند. ازاین‌رو، طراحی محفظه باید میان الزامات کاهش تلفات آیرودینامیکی از طریق ایجاد خلأ بالا و الزامات سخت‌گیرانه ایمنی مکانیکی، تعادل مناسبی برقرار سازد (هانسن و اوکین، ۲۰۱۹).

ب) مدل‌سازی ریاضی و تعیین ظرفیت روتور

برای تعیین ظرفیت بهینه سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در خط ۵ متروی تهران–کرج، ابتدا باید رابطه میان پارامترهای هندسی، خواص مواد و انرژی قابل ذخیره‌سازی تبیین شود. روتورهای فلایویل معمولاً به‌صورت استوانه‌های توپر یا توخالی طراحی می‌شوند. انرژی جنبشی ذخیره‌شده (E_k) تابعی از ممان اینرسی (J) و سرعت زاویه‌ای (ω) روتور است:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \qquad (۱)$$

ممان اینرسی (J) به توزیع جرم و هندسه روتور وابسته است. برای یک روتور استوانه‌ای توخالی با جرم (m)، چگالی (ρ)، شعاع خارجی (r_o)، شعاع داخلی (r_i) و ضخامت (h)، ممان اینرسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J = \frac{1}{2} m\left(r_o^2 + r_i^2\right) = \frac{1}{2} \rho \pi h \left(r_o^4 - r_i^4\right) \qquad (۲)$$

در کاربردهای واقعی مترو، فلایویل نمی‌تواند تمام انرژی ذخیره‌شده خود را تخلیه کند؛ زیرا سرعت آن نباید از حد مشخصی کمتر شود تا بتواند گشتاور لازم را تأمین کند و از نظر پایداری کنترل نیز در محدوده عملکردی مناسب باقی بماند (هدلوند و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، انرژی قابل استفاده

($E_{k,eff}$) در محدوده سرعت بین ω_{min} و ω_{max} به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E_{k,eff} = 0.5 \cdot J \cdot \left(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2\right) = 0.5 \cdot J \cdot \omega_{max}^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega_{min}}{\omega_{max}}\right)^2\right] \quad (۳)$$

نسبت $\omega_{min}/\omega_{max}$ یکی از پارامترهای کلیدی طراحی است که به الزامات مبدل توان و محدودیت‌های گشتاور ماشین الکتریکی وابسته است. با کاهش سرعت روتور، برای تأمین توان ثابت خروجی، گشتاور موردنیاز افزایش می‌یابد. ازآنجاکه گشتاور ماشین الکتریکی محدود است، بیشینه گشتاور در پایین‌ترین سرعت عملیاتی، یعنی ω_{min}، رخ می‌دهد. در بسیاری از طراحی‌های متداول، نسبت $\omega_{min}/\omega_{max} = 0.5$ در نظر گرفته می‌شود که مطابق رابطه (۳)، امکان بهره‌برداری از ۷۵ درصد کل انرژی جنبشی ذخیره‌شده را فراهم می‌کند. انتخاب این محدوده سرعت تأثیر مستقیمی بر تعداد چرخه‌های کاری و عمر مفید سامانه دارد (هولم، ۲۰۱۳).

محدودیت‌های مکانیکی و انتخاب ماده

حداکثر سرعت چرخش روتور (ω_{max}) و ابعاد آن به استحکام مکانیکی ماده سازنده محدود می‌شود. تنش‌های شعاعی و مماسی ایجادشده در دیسک چرخان نباید از تنش تسلیم ماده فراتر روند. حداکثر شعاع خارجی مجاز، تحت تأثیر تنش تسلیم (σ_y)، تنش ناشی از اتصال انقباضی شفت (σ_{sh})، نسبت پواسون (ν) و چگالی ماده (ρ) قرار دارد. رابطه تقریبی حاکم بر محدودیت شعاع به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$r_o^2 < \frac{4\times(\sigma_y - \sigma_{sh})}{\rho\omega_{\max}^2(3+\nu)} \cdot C_g \left(\frac{r_i}{r_o}\right) \quad (٤)$$

در این رابطه، C_g ضریبی هندسی است که به نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی وابسته است. پس از تعیین شعاع، ضخامت روتور (h) برای دستیابی به انرژی موردنیاز از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$h = \frac{4E_k}{\rho\pi\omega_{\max}^2(r_o^4 - r_i^4)} \quad (۵)$$

یکی از مهم‌ترین معیارهای انتخاب ماده برای فلایویل‌های مترویی، «انرژی ویژه» (E_k/m) است؛ زیرا وزن و حجم سامانه در فضاهای محدود ایستگاه‌های مترو از اهمیت زیادی برخوردار است. انرژی ویژه حداکثری از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{E_k}{m} = K\left(\frac{\sigma_y}{\rho}\right) \quad (٦)$$

در این رابطه، K ضریب شکل است که کارایی هندسی روتور را نشان می‌دهد و برای روتورهای استوانه‌ای توخالی همسانگرد به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$K = \frac{(1-\nu)\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 + (3+\nu)\left[1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{sh}}\right]}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 + 1} \quad (۷)$$

رابطه (۷) نشان می‌دهد که افزایش انرژی ویژه مستلزم استفاده از موادی با نسبت استحکام به چگالی (σ/ρ) بالا است. این ویژگی موجب می‌شود کامپوزیت‌های الیافی، مانند فیبر کربن، در مقایسه با فلزات سنتی مزیت بیشتری داشته باشند، هرچند هزینه بالاتری دارند. مشخصات مواد متداول در جدول II ارائه شده است. در کاربردهای چرخه‌ای مانند مترو، که فلایویل هزاران بار شارژ و دشارژ می‌شود، استفاده از استحکام خستگی (σ_f) به جای تنش تسلیم در محاسبات انرژی ویژه، واقع‌بینانه‌تر است. مقادیر ضریب شکل (K) معمولاً حدود ۰/۳۰۵ برای فلزات و ۰/۵۰۰ برای کامپوزیت‌های الیافی در نظر گرفته می‌شود (ایتو و همکاران، ۲۰۲۲).

تفکیک میان «ظرفیت انرژی»، که به روتور و ماده سازنده آن وابسته است، و «توان نامی»، که به ماشین الکتریکی و مبدل توان وابسته است، یکی از مزایای کلیدی سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل محسوب می‌شود.

این ویژگی امکان می‌دهد در خط ۵ متروی تهران–کرج، ظرفیت انرژی متناسب با میزان انرژی ترمز قابل بازیابی و توان نامی متناسب با پیک توان ترمزگیری قطارها، به‌صورت مستقل بهینه‌سازی شوند.

جدول ۲. تولیدکنندگان عمده سامانه‌های FESS و مشخصات فنی مرتبط با کاربردهای ترانزیتی و شبکه

تولید کننده	محدوده سرعت و توان نامی	کاربردها
ABB	۱٬۸۰۰–۳٬۶۰۰ دور در دقیقه، ۱۰۰–۱٬۵۰۰ کیلووات	پایدارسازی میکروشبکه‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر
Active Power	حداکثر ۱۰٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۲۲۵ کیلووات	منبع تغذیه بدون وقفه (UPS)
Beacon Power, LLC	حداکثر ۱۶٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۰۰ کیلووات	تنظیم فرکانس شبکه برق سراسری
Calnetix Technologies, LLC	۲۵٬۰۰۰–۳۵٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۲۵ کیلووات	منبع تغذیه بدون وقفه (UPS)
Williams Hybrid Power	حداکثر ۳۶٬۰۰۰–۴۵٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵۰–۱۸۰ کیلووات	بازیابی انرژی ترمز وسایل نقلیه عمومی
Kinetic Traction Systems	حداکثر ۳۶٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۲۵۰–۴۰۰ کیلوولت‌آمپر	بازیابی انرژی ترمز مترو و اتوبوس
PowerThru	—	منبع تغذیه بدون وقفه (UPS)
PUNCH Flybrid	حداکثر ۶۰٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۶۰ کیلووات	بازیابی انرژی ترمز وسایل نقلیه سبک
Ricardo PLC	حداکثر ۴۴٬۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۰۰ کیلووات	بازیابی انرژی ترمز وسایل نقلیه
Temporal Power	—	تنظیم فرکانس شبکه برق سراسری

جدول ۳. مقایسه خواص مواد سازنده روتور فلایویل

ماده	چگالی (kg/m^3)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام خستگی (MPa)	چگالی انرژی (kWh/m^3)	انرژی ویژه (Wh/kg)
فولاد نوردکاری‌شده	۷٬۸۰۰	۹۵۰	۵۵۰	۴۶/۶	۶/۰
فولاد مارایجینگ	۸٬۰۰۰	۲٬۳۳۷	۷۶۵	۶۴/۸	۸/۱
تیتانیوم	۴٬۵۰۰	۱٬۱۸۶	۶۶۲	۵۶/۱	۱۲/۴
فایبرگلاس	۲٬۰۰۰	۱٬۱۰۰	۲۲۰	۳۰/۰	۱۵/۰
فیبر آرامید	۱٬۴۰۰	۱٬۴۰۰	۷۰۰	۹۷/۰	۶۹/۰
فیبر کربن	۱٬۵۵۰	۲٬۰۰۰	۱٬۶۰۰	۲۲۲/۰	۱۴۳/۰

ج) شاخص‌های کلیدی عملکرد در ارزیابی سامانه

برای ارزیابی کمی اثرات نصب سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل در خط ۵ متروی تهران–کرج و مقایسه سناریوهای مختلف ظرفیت و مکان، از شاخص‌های استاندارد تعریف‌شده توسط آزمایشگاه‌های ملی PNNL و SNL استفاده می‌شود. این شاخص‌ها چارچوبی عینی برای سنجش کارایی فنی و اقتصادی سامانه فراهم می‌کنند.

مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

عمق دشارژ: این شاخص بیانگر درصدی از ظرفیت نامی انرژی فلایویل است که در هر چرخه عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کاربردهای مترو، عمق دشارژ به‌شدت تحت تأثیر الگوی حرکت قطارها و فاصله زمانی میان ترمزگیری و شتاب‌گیری قرار دارد. عمق دشارژ عملیاتی نه‌تنها به ظرفیت انرژی روتور، بلکه به حداکثر توان قابل تبادل توسط مبدل نیز وابسته است (لیو همکاران، ۲۰۲۴).

بازده رفت‌وبرگشت: این شاخص نسبت انرژی الکتریکی خروجی مفید به انرژی الکتریکی ورودی طی یک چرخه کامل

شارژ و دشارژ است. بازده بالای FESS، که معمولاً ۸۰ تا ۹۵ درصد گزارش شده است (موسوی و همکاران، ۲۰۲۰)، یکی از دلایل اصلی ترجیح این فناوری در مقایسه با سایر فناوری‌ها برای کاربردهای دارای چرخه‌های کوتاه و مکرر، مانند مترو، محسوب می‌شود. تلفات اصلی شامل تلفات آیرودینامیکی، تلفات اصطکاکی یاتاقان‌ها و تلفات الکتریکی در سیم‌پیچ‌ها و ادوات نیمه‌هادی مبدل است.

تلفات توان در حالت آماده‌به‌کار: این شاخص نرخ کاهش انرژی ذخیره‌شده در شرایطی را نشان می‌دهد که قطاری در حال ترمزگیری یا شتاب‌گیری نیست. تلفات آماده‌به‌کار مستقیماً بر اقتصاد پروژه تأثیر می‌گذارد، زیرا انرژی تلف‌شده باید از شبکه تأمین شود. استفاده از محفظه خلأ و یاتاقان‌های مغناطیسی می‌تواند این تلفات را به مقادیر بسیار پایین، یعنی کمتر از ۲۵ وات بر کیلووات‌ساعت یا ۱–۲ درصد توان نامی، کاهش دهد (نگوین و همکاران، ۲۰۱۹).

-عمر چرخه‌ای و تقویمی: با توجه به تردد بالای قطارها در خط ۵ مترو، عمر چرخه‌ای، یعنی تعداد چرخه‌های شارژ و دشارژ، پارامتری حیاتی است. سامانه‌های FESS به دلیل عدم وجود واکنش‌های شیمیایی، عمر چرخه‌ای بسیار بالایی، در محدوده ۱۰٬۰۰۰ تا ۱۰۰٬۰۰۰ سیکل، و عمر تقویمی طولانی، در محدوده ۱۵–۲۰ سال، دارند که آن‌ها را از نظر هزینه چرخه عمر (LCC) رقابتی می‌سازد. مبانی نظری و پارامترهای فنی ارائه‌شده، ورودی‌های اصلی مدل بهینه‌سازی پژوهش را تشکیل می‌دهند. این پارامترها در فصل‌های بعدی برای تعیین هم‌زمان مکان بهینه نصب، بر اساس پروفیل ولتاژ و توان شبکه کشش خط ۵ متروی تهران–کرج، و ظرفیت بهینه، بر اساس بیشینه‌سازی بازیابی انرژی و کمینه‌سازی هزینه، به کار گرفته خواهند شد. بدین‌ترتیب، ارتباط میان ویژگی‌های فنی سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، الگوی انرژی ترمز احیاکننده قطارها و الزامات شبکه کشش، مستقیماً در ساختار مدل بهینه‌سازی لحاظ می‌شود.

جدول ٤. دامنه تغییرات شاخص‌های عملکردی سامانه‌های FESS تجاری

شاخص عملکرد	دامنه گزارش‌شده	اهمیت در پژوهش حاضر
توان نامی (MW)	۰٫۰۰۱–۱۰	تعیین اندازه مبدل و ماشین الکتریکی متناسب با توان پیک ترمز قطارهای خط ۵
انرژی ویژه (Wh/kg)	۵–۲۰۰	تأثیر بر وزن و ابعاد سامانه نصب‌شده در ایستگاه‌ها
توان ویژه (W/kg)	٤۰۰–۳۰٬۰۰۰	قابلیت پاسخ سریع به نوسانات لحظه‌ای شبکه
چگالی انرژی (kWh/m^3)	۰٫۲۵–٤۲٤	محدودیت فضای نصب در ایستگاه‌های زیرزمینی یا سطحی
بازده رفت‌وبرگشت (٪)	۷۰–۹٦	محاسبه دقیق میزان صرفه‌جویی انرژی خالص
عمر چرخه‌ای (سیکل)	۱۰٬۰۰۰– ۱۰۰٬۰۰۰	ارزیابی دوام سامانه در برابر تردد روزانه قطارها
نرخ خوددشارژی (٪/روز)	۲٤–۱۰۰	برآورد تلفات انرژی در ساعات کم‌باری شبکه

۳- ماشین‌های الکتریکی در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل (FESS)

انتخاب توپولوژی مناسب برای ماشین‌های الکتریکی، نقشی تعیین‌کننده در عملکرد کلی سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل (FESS) ایفا می‌کند. از آنجا که این سامانه‌ها باید قابلیت پاسخگویی سریع به نوسانات توان ناشی از ترمز احیاکننده و شتاب‌گیری قطارها را داشته باشند، ویژگی‌هایی از جمله چگالی توان بالا، بازده رفت‌وبرگشت مطلوب و تلفات حالت آماده‌به‌کار پایین، از معیارهای کلیدی در طراحی ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در شبکه‌های مترو محسوب می‌شوند.

در ادامه، توپولوژی‌های رایج، روندهای توسعه و انواع خاص ماشین‌های الکتریکی مناسب برای FESS مورد بررسی قرار می‌گیرند.

الف) توپولوژی‌های رایج ماشین‌های الکتریکی

ماشین‌های براشلس با آهنربای دائم و ماشین‌های القایی قفس سنجابی از نوع شار شعاعی، به‌عنوان توپولوژی‌های متداول و بلوغ‌یافته در سامانه‌های FESS شناخته می‌شوند. این ماشین‌ها

به دلیل ساختار استاندارد و قابلیت اطمینان بالا، کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، طی دو دهه اخیر، توجه پژوهشگران به سمت ماشین‌های القایی هم‌قطب با شار شعاعی و شار عرضی معطوف شده است (صبیح‌الدین و همکاران، ۲۰۱۹). مزیت اصلی این نوع ماشین‌ها، تلفات بسیار پایین در حالت آماده‌به‌کار و سهولت یکپارچه‌سازی مکانیکی روتور ماشین با جرم دوار فلایویل است. یکپارچه‌سازی مستقیم روتور و فلایویل، نه‌تنها پیچیدگی ساختار مکانیکی را کاهش می‌دهد، بلکه تلفات اصطکاکی ناشی از کوپلینگ‌های واسط را نیز حذف می‌کند. با وجود این مزایا، چگالی گشتاور و توان ماشین‌های القایی هم‌قطب در مقایسه با ماشین‌های القایی متعارف و ماشین‌های براشلس با آهنربای دائم، پایین‌تر گزارش شده است (سندرز و همکاران، ۲۰۲۰).

علاوه بر موارد فوق، توپولوژی‌های دیگری نظیر ماشین‌های رلوکتانسی سنکرون و نسخه‌های بدون یاتاقان ماشین‌های براشلس با آهنربای دائم و ماشین‌های القایی نیز پیشنهاد شده‌اند. حذف یاتاقان‌های مکانیکی سنتی در ساختارهای بدون یاتاقان، پتانسیل بالایی برای افزایش عمر مفید و کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری ایجاد می‌کند. با این حال، شواهد آزمایشگاهی و نمونه‌های عملیاتی موفق از پیاده‌سازی این ساختارها در مقیاس صنعتی همچنان محدود است و چالش‌های فنی در کنترل و پایداری آن‌ها وجود دارد.

ب) روندهای تحقیق و توسعه: تمرکز بر کاهش تلفات و مدیریت حرارتی

محور اصلی پژوهش‌های اخیر در حوزه ماشین‌های الکتریکی برای FESS، کاهش تلفات توان در حالت آماده‌به‌کار است. از آنجا که فلایویل‌ها ممکن است برای مدت‌زمان‌های طولانی در حالت انتظار باقی بمانند تا انرژی ترمز احیاکننده قطار بعدی را جذب کنند، هرگونه تلفات در این حالت منجر به کاهش بازده کلی سیستم و تخلیه تدریجی انرژی ذخیره‌شده می‌شود. برای دستیابی به این هدف، راهکارهای متعددی توسعه یافته‌اند:

-یاتاقان‌های پیشرفته: استفاده از یاتاقان‌های مغناطیسی (فعال یا غیرفعال) و یاتاقان‌های ابررسانای دمای بالا (HTS) جایگزین یاتاقان‌های مکانیکی شده است. این فناوری‌ها با حذف تماس فیزیکی، تلفات اصطکاکی را به حداقل رسانده و امکان عملکرد بدون نیاز به تعمیر و نگهداری را فراهم می‌آورند.

- محفظه‌های کم‌فشار: نصب مجموعه دوار فلایویل و ماشین الکتریکی در محفظه‌های خلأ یا کم‌فشار، تلفات آیرودینامیکی (سایش هوا) را به‌شدت کاهش می‌دهد.

-طراحی‌های ساختاری خاص: پیکربندی‌هایی با فاصله هوایی قابل تنظیم و ساختارهای بدون شیار یا بدون هسته نیز برای کاهش تلفات ادی و هیسترزیس در حالت آماده‌به‌کار به کار گرفته شده‌اند. در این طرح‌ها، با افزایش فاصله هوایی در زمان‌های بیکاری، کوپلینگ مغناطیسی و در نتیجه تلفات کاهش می‌یابد (سونرسون و همکاران، ۲۰۱۹).

با این حال، قرارگیری ماشین الکتریکی در محیط کم‌فشار یا خلأ، چالش جدیدی را در زمینه مدیریت حرارتی ایجاد می‌کند. در غیاب هوا، انتقال حرارت از طریق جابجایی تقریباً حذف می‌شود و تنها مسیرهای هدایت حرارتی و تشعشع باقی می‌مانند. بنابراین، تحلیل دقیق حرارتی و طراحی مسیرهای مؤثر برای دفع گرمای تولیدشده در سیم‌پیچ‌ها و هسته ماشین، به‌ویژه در هنگام سیکل‌های سریع شارژ و دشارژ با توان بالا، از الزامات حیاتی طراحی ماشین‌های الکتریکی در FESS محسوب می‌شود.

ج) ماشین‌های شار محوری با آهنربای دائم (AFPM)

ماشین‌های براشلس با شار محوری و آهنربای دائم (AFPM) به‌دلیل نسبت قطر به طول مناسب و چگالی گشتاور بالا، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای FESS هستند. این ماشین‌ها امکان یکپارچه‌سازی فشرده‌تری با دیسک فلایویل را فراهم می‌کنند. استراسیک و همکاران (۲۰۱۷)، یک توپولوژی نوین از ماشین AFPM با آرایش عمودی شامل دو استاتور ثابت و یک روتور مرکزی دوار ارائه شده است. در این طراحی، از نیروهای مغناطیسی محوری بین روتور و استاتورها برای خنثی‌سازی وزن روتور استفاده شده است. این رویکرد هوشمندانه، نیاز به یاتاقان‌های فعال یا غیرفعال پیچیده را کاهش داده و با بهره‌گیری کامل از نیروهای محوری، بازده رفت‌وبرگشت سیستم را بهبود بخشیده است. در این سامانه یکپارچه، روتور مرکزی هم‌زمان نقش بخش دوار ماشین الکتریکی و جرم ذخیره‌کننده انرژی (فلایویل) را ایفا می‌کند.

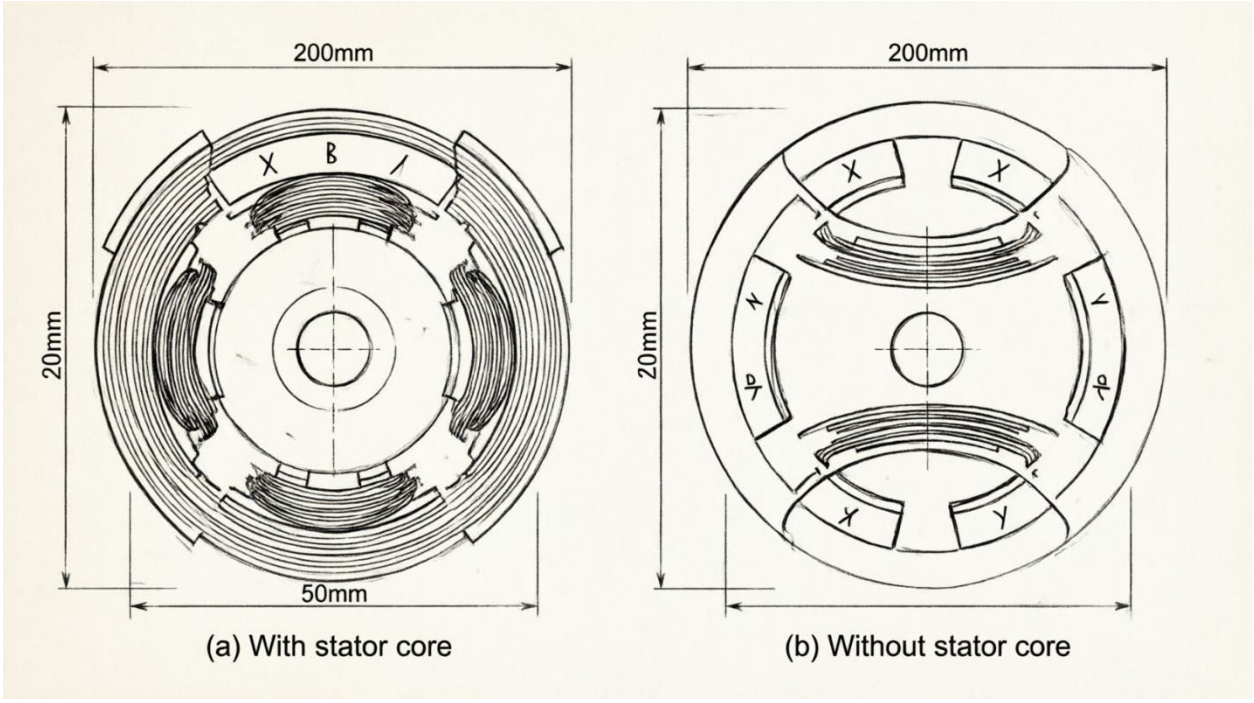
همچنین، راهکار دیگری مبتنی بر ماشین AFPM با فاصله هوایی متغیر پیشنهاد شده است (تسائو و همکاران، ۲۰۱۳). در این سامانه، فاصله هوایی میان استاتور و روتور در دوران‌های بیکاری به‌صورت پویا افزایش می‌یابد تا تلفات توان در حالت آماده‌به‌کار به حداقل برسد. این ویژگی انطباق‌پذیری، امکان

بهینه‌سازی مصرف انرژی داخلی سامانه ذخیره‌سازی را فراهم می‌آورد. در مطالعه‌ای دیگر واسکوئز و همکاران (۲۰۲۰)، یک نمونه آزمایشگاهی از سامانه ذخیره‌سازی انرژی میکرو–فلایویل مجهز به ماشین AFPM و یاتاقان HTS ساخته و تست شده است. در این پروتوتایپ، از یک روتور دیسکی شکل آلومینیومی با ممان اینرسی بالا به‌عنوان فلایویل استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این سامانه قادر است به سرعت چرخش ۵۱٬۰۰۰ دور در دقیقه دست یابد. اگرچه این مطالعه در مقیاس کوچک انجام شده است، اما اثبات می‌کند که ترکیب ماشین‌های شار محوری، یاتاقان‌های ابررسانا و روتورهای پرسرعت، پتانسیل بالایی برای توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل با چگالی انرژی و توان بالا دارد. این یافته‌ها می‌توانند در انتخاب و طراحی ماشین الکتریکی بهینه برای استقرار در ایستگاه‌های خط ۵ متروی تهران–کرج، جهت بازیابی مؤثر انرژی ترمز احیاکننده، راهنمای فنی مناسبی باشند.

٤- مطالعه طراحی ماشین‌های الکتریکی پرسرعت شار محوری (AFPM) برای سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل (FESS)

در این بخش، دو توپولوژی اصلی ماشین‌های مغناطیس دائم با شار محوری شامل ساختار متعارف تک‌طرفه مجهز به هسته‌های فرومغناطیسی در استاتور و روتور، و ساختار بدون هسته متشکل از دو روتور و یک استاتور مرکزی (شکل ۳)، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. تحلیل‌ها با بهره‌گیری از روش اجزای محدود انجام شده‌اند تا تناسب هر یک از این پیکربندی‌ها برای کاربرد در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل از منظر شاخص‌های کلیدی عملکرد، توان ویژه، بازده انرژی و تلفات حالت مدار باز، سنجیده شود. اگرچه امکان پیاده‌سازی سیم‌پیچی‌های سه‌فاز و دوفاز در هر دو توپولوژی وجود دارد، اما در نمونه طراحی بدون هسته، از آرایش سیم‌پیچی موجی دوفاز استفاده شده است.

این انتخاب با هدف بهره‌برداری از جداسازی مغناطیسی ذاتی میان فازها و در نتیجه ارتقای قابلیت تحمل خطا سیستم صورت گرفته است.

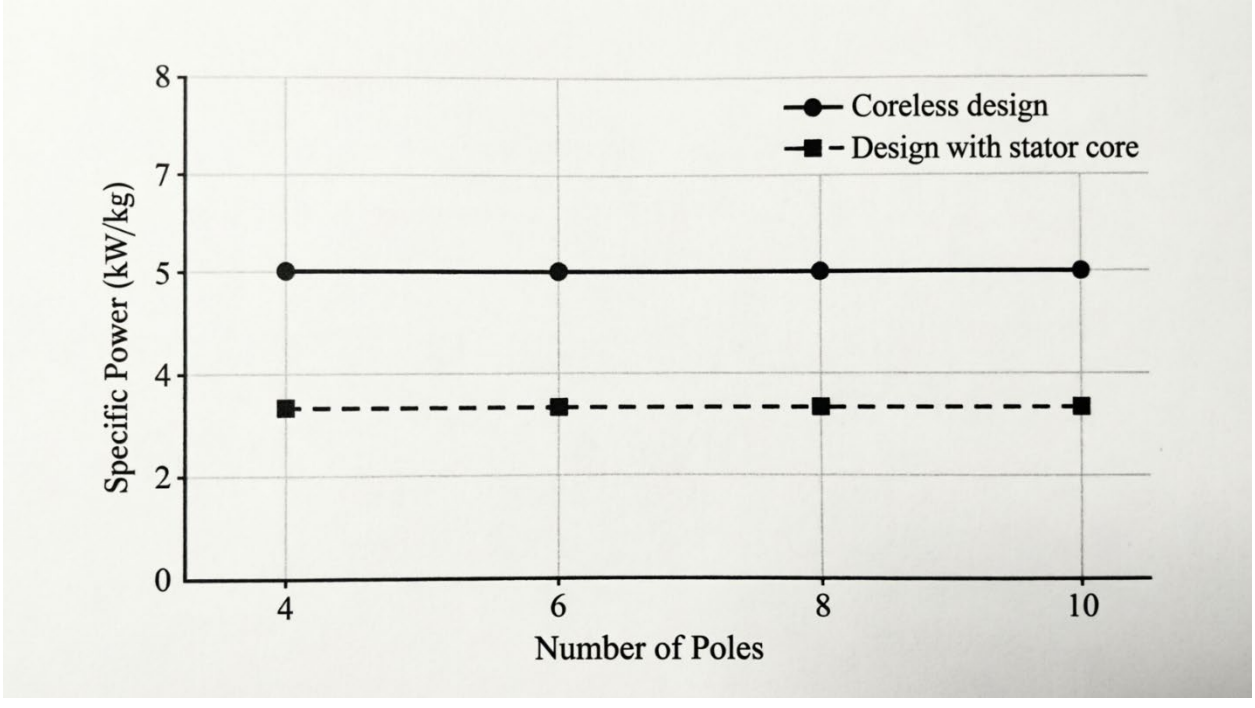


شکل ۳. دو توپولوژی متداول ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری: (الف) با هسته استاتور، (ب) بدون هسته استاتور

ماشین‌های الکتریکی پیشنهادی به عنوان واحدهای مدولار با توان پایین و سرعت چرخش بالا طراحی شده‌اند. هر دو پیکربندی دارای مشخصات نامی یکسانی هستند: توان خروجی ۱۷٫۵ اسب بخار (hp) و محدوده سرعت عملیاتی بین ۲۵،۰۰۰ تا ۵۰،۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm). این بازه سرعتی متناظر با عمق تخلیه حداکثر ۰٫۵ برای فلایویل است. جهت مقایسه عادلانه، ابعاد هندسی خارجی برای هر دو طراحی ثابت در نظر گرفته شده است، به طوری که قطر خارجی کل برابر با ۲۰۰ میلی‌متر و طول محوری کل معادل ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. مواد به کار رفته شامل آهنرباهای دائم NdFeB با گرید N30 و ورق‌های فولادی سیلیکونی لایه‌لایه M15-29G برای هسته استاتور (در طرح دارای هسته) است (یه و همکاران، ۲۰۲٤).

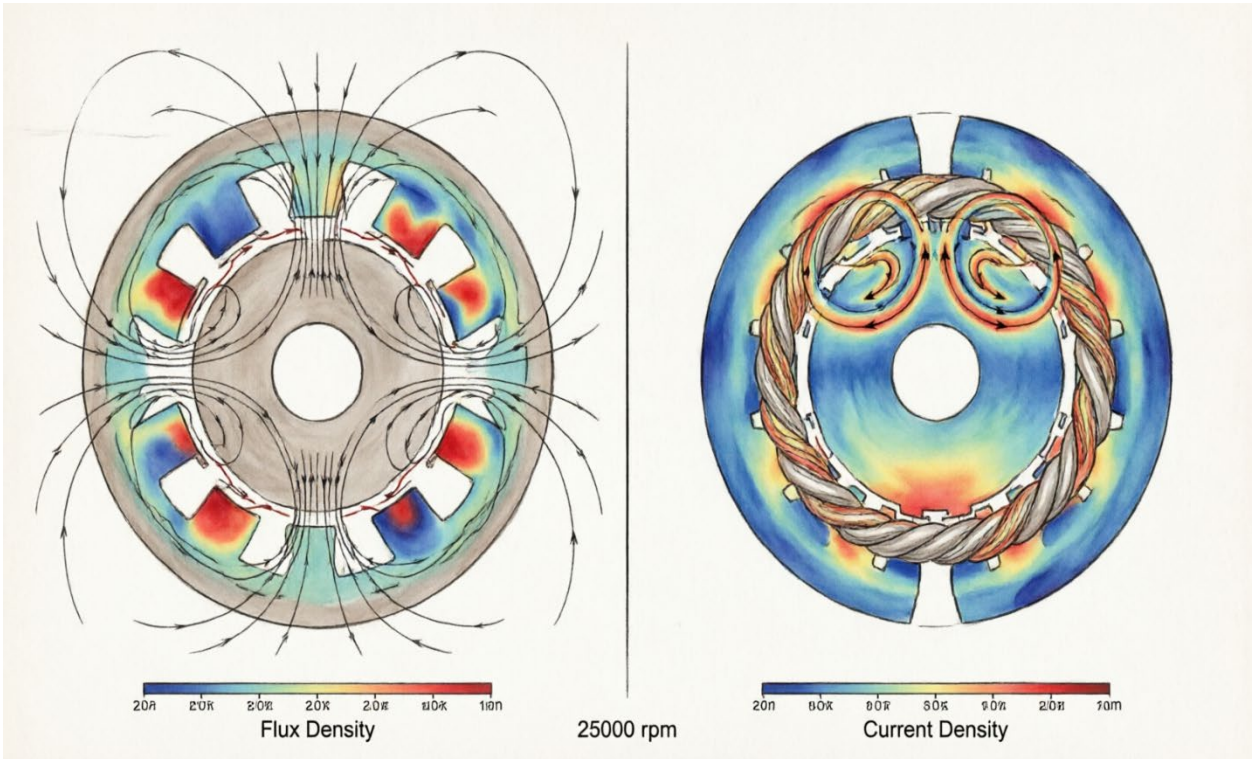
یکی از چالش‌های اصلی در ماشین‌های AFPM دارای هسته، محدودیت شدید فرکانس بنیادی و تعداد قطب‌ها در سرعت‌های بسیار بالا است؛ زیرا تلفات هسته تقریباً با مربع فرکانس بنیادی افزایش می‌یابد. حذف هسته استاتور در توپولوژی بدون هسته، این محدودیت را مرتفع ساخته و امکان افزایش تعداد قطب‌ها را فراهم می‌آورد. بدین منظور، یک مطالعه پارامتریک جهت بررسی تأثیر تعداد قطب‌ها بر عملکرد موتور/ژنراتور انجام شده است. در این فرآیند، چگالی جریان به گونه‌ای تنظیم گردیده که گشتاور هدف ۵ نیوتن‌متر (Nm) در سرعت پایه ۲۵،۰۰۰ rpm تأمین شود. شایان ذکر است که اگرچه ماشین قادر به کارکرد تا سرعت ۵۰،۰۰۰ rpm است، اما برای حفظ توان خروجی ثابت، گشتاور در این سرعت به ۲٫۵ Nm کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از شکل ٤ نشان می‌دهد که طراحی‌های بدون هسته، مستقل از تغییرات تعداد قطب‌ها در بازه ٤ تا ۱۰، به توان ویژه‌ای در حدود ٦ کیلووات بر کیلوگرم (kW/kg) دست می‌یابند. در مقابل، طراحی دارای هسته استاتور به دلیل جرم و حجم قابل توجه هسته فرومغناطیسی، توان ویژه بسیار پایین‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین، در ماشین‌های بدون هسته، با افزایش تعداد قطب‌ها، چگالی جریان اعمال‌شده کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از نسبت کوچک «طول محوری به قطر کل» و ظرفیت گشتاور پایین‌تر ماشین‌های با تعداد قطب کم در چنین ابعادی است (یی و همکاران، ۲۰۱۷).



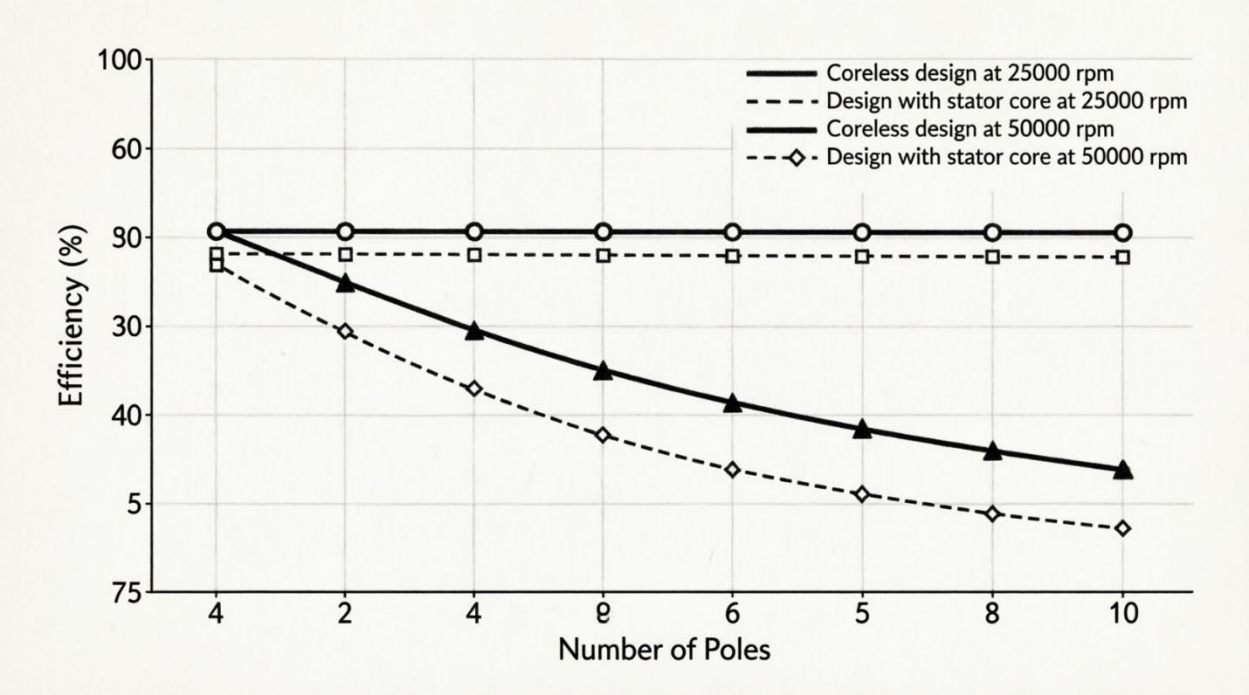
شکل ٤. توان ویژه طراحی‌های ماشین AFPM با و بدون هسته استاتور در بازه ٤ تا ۱۰ قطب

با وجود مزایای ذکر شده، ماشین‌های بدون هسته مستعد تلفات جریان متناوب بالا در رساناها هستند که عمدتاً ناشی از جریان‌های گردابی القایی توسط تغییرات زمانی میدان مغناطیسی شکاف هوایی می‌باشد. لذا، استفاده از هادی‌های چند رشته‌ای ظریف یا سیم‌های لیتز برای کاهش این تلفات ضروری است (الحسن و رحمان، ۲۰۲۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در نمونه طراحی با هادی‌های چند رشته‌ای، چگالی جریان لحظه‌ای القایی در سرعت ۲۵،۰۰۰ rpm بیش از دو برابر چگالی جریان اعمال‌شده است که لزوم بهینه‌سازی ساختار هادی‌ها (مانند استفاده از سیم لیتز) را تأیید می‌کند.



شکل ۵. توزیع چگالی شار و چگالی جریان لحظه‌ای برای طراحی ٤ قطب بدون هسته با هادی‌های چند رشته‌ای در سرعت ۲۵،۰۰۰ دور بر دقیقه

بررسی بازده ماشین‌های طراحی‌شده در مدهای شارژ و دشارژ (شکل ٦) حاکی از آن است که در سرعت ۲۵،۰۰۰ rpm، بازده سیستم حساسیت کمی به تغییرات تعداد قطب‌ها نشان می‌دهد. با این حال، در سرعت ۵۰،۰۰۰ rpm، افزایش تعداد قطب‌ها منجر به افت شدید بازده می‌شود. این یافته بیانگر آن است که برای عملکردهای با سرعت بسیار بالا، یا باید از تعداد قطب‌های کمتر استفاده کرد و یا راهکارهای پیشرفته‌ای نظیر سیم‌پیچی با سیم لیتز را به کار بست تا تلفات فرکانس بالا مدیریت شوند.



شکل ٦. بازده طراحی‌های ماشین AFPM با و بدون هسته استاتور در سرعت‌های ۲۵،۰۰ و ۵۰،۰۰۰ دور بر دقیقه

علاوه بر این، تحقق عملکرد مطلوب ماشین‌های AFPM با تعداد قطب‌های زیاد در سرعت‌های بالا، نیازمند بهره‌گیری از ادوات الکترونیک قدرت با شکاف باند عریض نظیر ترانزیستورهای MOSFET مبتنی بر سیلیکون کارباید (SiC) یا گالیوم نیترید (GaN) است. این ادوات امکان کلیدزنی در فرکانس‌های بنیادی بالاتر را فراهم آورده و بازده کلی سیستم تبدیل انرژی را بهبود می‌بخشند. استفاده از مبدل‌های تمام WBG یا مبدل‌های هیبریدی برای درایو این واحدهای پرسرعت توصیه می‌شود.

تحلیل‌های FEA همچنین نشان می‌دهند که از منظر تلفات حالت مدار باز طراحی‌های با تعداد قطب‌های کمتر ارجحیت دارند. با این حال، طراحی‌های با قطبیت بالاتر گشتاور بیشتری به ازای واحد جریان تولید می‌کنند. برای موازنه این دو ویژگی، می‌توان تلفات مدار باز را در حالت آماده‌به‌کار از طریق افزایش طول شکاف هوایی کنترل نمود (چن و همکاران، ۲۰۲٦).

بازده رفت‌وبرگشت تابعی از بازده دینامیکی (شارژ/دشارژ) و تلفات ایستایی (حالت آماده‌به‌کار) است. در کاربردهای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت، بازده دینامیکی نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا می‌کند. اما در سامانه‌های فلایویل با دوره‌های نگهداری انرژی طولانی‌مدت، تلفات حالت آماده‌به‌کار به مؤلفه غالب در اتلاف انرژی کل چرخه تبدیل می‌شود (گوپتا و سینگ، ۲۰۲۵).

به طور خلاصه، نتایج طراحی نشان می‌دهد که ماشین‌های AFPM دارای هسته استاتور به دلیل محدودیت‌های تلفات هسته در فرکانس‌های بالا، ناچار به استفاده از تعداد قطب‌های کم هستند که این امر تلفات مدار باز را کاهش می‌دهد. در مقابل، توپولوژی بدون هسته با حذف تلفات هسته، انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب تعداد قطب‌ها دارد؛ به طوری که تعداد قطب‌های بیشتر می‌تواند منجر به توان ویژه بالاتر و بازده بهتر در محدوده سرعت‌های طراحی‌شده شود، مشروط بر اینکه چالش تلفات رسانا در فرکانس بالا با استفاده از فناوری‌هایی نظیر سیم لیتز مدیریت گردد (کیم و همکاران، ۲۰۲٦). همچنین، مسائل مربوط به چگالی جریان و دفع حرارت در سیم‌پیچ‌های استاتور، از چالش‌های حیاتی در طراحی نهایی این ماشین‌های پرسرعت برای کاربردهای FESS محسوب می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی مبانی نظری و تحولات اخیر در فناوری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل انجام شده و بر قابلیت‌های این فناوری در ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی، به‌ویژه در کاربردهای مرتبط با شبکه‌های برق و ریزشبکه‌ها و تسهیل یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، تمرکز داشته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که دستیابی به چگالی انرژی و انرژی ویژه بالاتر، مستلزم توسعه روتورهایی با استحکام مکانیکی بالا و چگالی جرمی پایین است. ازاین‌رو، استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته با استحکام کششی بالا و چگالی جرمی پایین به‌عنوان یکی از روندهای روبه‌رشد در طراحی روتورهای فلایویل مطرح است. این رویکرد مهندسی امکان افزایش سرعت چرخش و ابعاد روتور را فراهم می‌کند و در نتیجه، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی سامانه را افزایش می‌دهد.

در حوزه ماشین‌های الکتریکی، ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری با سرعت بالا از نظر شاخص‌های کلیدی، شامل چگالی توان (توان ویژه)، بازده تبدیل انرژی و تلفات توان در حالت مدار باز و در شرایط سرعت چرخش بالا، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌ها نشان‌دهنده امکان‌پذیری فنی و مزیت نسبی استفاده از این ماشین‌ها در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل با نیاز به چگالی بالای انرژی و توان است. افزون بر این، نتایج نشان داد که قابلیت تنظیم طول شکاف هوایی در ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم می‌تواند به‌عنوان سازوکاری مؤثر برای کاهش نرخ خودتخلیه سامانه در حالت آماده‌به‌کار به کار گرفته شود. همچنین، با توجه به هندسه دیسکی‌شکل ذاتی ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم، ظرفیت قابل‌توجهی برای یکپارچه‌سازی ساختاری روتور موتور/ژنراتور با روتور مکانیکی فلایویل وجود دارد. این یکپارچه‌سازی می‌تواند به کاهش ابعاد سامانه، کاهش تعداد اجزای مکانیکی و در نتیجه، افزایش چگالی توان کلی سامانه منجر شود.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب روتورهای کامپوزیتی پیشرفته، ماشین‌های الکتریکی شار محوری با آهنربای دائم و راهکارهای مناسب برای کاهش تلفات در حالت آماده‌به‌کار، می‌تواند مسیر مؤثری برای توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فلایویل با عملکرد بالا فراهم کند. یافته‌های حاصل از مطالعه طراحی حاضر، چشم‌اندازهایی را برای توسعه و به‌کارگیری این فناوری در کاربردهای مرتبط با یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه‌های برق مدرن ترسیم می‌کند. بااین‌حال، در چارچوب مسئله اصلی پژوهش حاضر، اهمیت این یافته‌ها در آن است که ویژگی‌های فنی روتور و ماشین الکتریکی می‌توانند در طراحی و ارزیابی سامانه ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، از جمله در تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی و مکان نصب سامانه برای بازیابی انرژی حاصل از ترمز احیاکننده، مورد توجه قرار گیرند.

۶- مراجع

-Al-Hasan, M., & Rahman, S. (2025). Advanced composite materials for high-speed flywheel rotors: A review of carbon fiber reinforced polymers in 2024–2025. *Composite Structures,* 352, 118945.

doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.1185

-Andriollo, M., Bortot, F., & Tortella, A. (2023). Disc-type PM machine for the electromagnetic conversion/suspension of a flywheel system. *In 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 739–744. **doi.org/10.1109/ICRERA.2015.741844**

-Bitterly, J. G., & Bitterly, S. E. (2007). Flywheel based energy storage system (U.S. Patent No. 5,614,777). *U.S. Patent and Trademark Office.*

-Blaabjerg, F., & Ionel, D. M. (2022). Renewable energy devices and systems with simulations in MATLAB and ANSYS. *CRC Press.*

-Boicea, V. A. (2019). Energy storage technologies: The past and the present. *Proceedings of the IEEE,* 102(11), 1777–1794. **doi.org/10.1109/JPROC.2014.2359545**

-Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F., & Tenconi, A. (2015). A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 38(6), 1517–1524. **doi.org/10.1109/TIA.2002.804772**

-Goris, F., & Severson, E. L. (2023). A review of flywheel energy storage systems for grid application. *In IECON 2018- 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics* Society, 1633–1639.

doi.org/10.1109/IECON.2018.8591736

-Gupta, R., & Singh, P. (2025). Grid-forming capabilities of flywheel energy storage systems in weak grids: A case study. I*nternational Journal of Electrical Power & Energy Systems, 168,* 109876.

doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.109876

-Hansen, J. G. R., & O'Kain, D. U. (2019). An assessment of flywheel high power energy storage technology for hybrid vehicles (Technical Report ORNL/TM-2010/280). *Oak Ridge National Laboratory.*

-Hedlund, M., Lundin, J., De Santiago, J., Abrahamsson, J., & Bernhoff, H. (2020). Flywheel energy storage for automotive applications. *Energies,* 8(10), 10636–10663. **doi.org/10.3390/en81010636**

-Holm, S. R. (2013). Modeling and optimization of a permanent magnet machine in a flywheel [Doctoral dissertation, Technische Universiteit Delft].

-Itoh, J., Masuda, T., Sato, D., Nagano, T., Suzuki, T., & Yamada, N. (2022). Development of magnetic assist system in flywheel energy storage system for power load-leveling. *In 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA),* 198–203.
doi.org/10.1109/ICRERA.2016.788450

-Kim, J. H., Lee, S. W., & Park, K. (2026). Thermal management optimization in vacuum-enclosed flywheel systems using phase change materials. *Applied Thermal Engineering,* 245, 122890.
doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.122890

-Chen, Y., Liu, Z., & Wang, H. (2026). Sensorless control of high-speed permanent magnet motors for flywheel energy storage systems using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 73(2), 1120–1132.
doi.org/10.1109/TIE.2025.3489012

-Conover, D. R., Ferreira, S. R., Crawford, A. J., Schoenwald, D. A., Fuller, J., Gourisetti, D. M. R. S. N., et al. (2020). Protocol for uniformly measuring and expressing the performance (Technical Report PNNL-22010 Rev 2 / SAND2016-3078 R). *Pacific Northwest National Laboratory & Sandia National Laboratories.*

-Dragoni, E. (2024). Mechanical design of flywheels for energy storage: A review with state-of-the-art developments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: *Journal of Materials: Design and Applications,* 233(5), 995–1004.

doi.org/10.1177/1464420717697235

-Flynn, M. M., McMullen, P., & Solis, O. (2017). High-speed flywheel and motor drive operation for energy recovery in a mobile gantry crane. *In APEC 07- Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1151–1157. **doi.org/10.1109/APEC.2007.357638**

-Flywheel energy storage systems for power systems application. (2021). *In 2021 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP),* 492–501.

doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004815

-Garcia-Gracia, M., Cova, M. A., Villen, M. T., & Uson, A. (2018). Novel modular and retractable permanent magnet motor/generator for flywheel applications with reduced iron losses in stand-by mode. *IET Renewable Power Generation,* 8(5), 551–557.

doi.org/10.1049/iet-rpg.2013.0065

-Strasik, M., Hull, J. R., Mittleider, J. A., Gonder, J. F., Johnson, P. E., McCrary, K. E., et al. (2017). An overview of boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings. Superconductor Science and Technology, 23(3), 034021. **doi.org/10.1088/0953-2048/23/3/034021**

-Tsao, P., Senesky, M., & Sanders, S. R. (2013). An integrated flywheel energy storage system with homopolar inductor motor/generator and high frequency drive. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 39(6), 1710–1725. **doi.org/10.1109/TIA.2003.818989**

-Vazquez, S., Lukic, S. M., Galvan, E., Franquelo, L. G., & Carrasco, J. M. (2020). Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 57(12), 3881–3895. **doi.org/10.1109/TIE.2010.2076414**

-Ye, C., Yang, J., Xiong, F., & Zhu, Z. Q. (2024). Relationship between homopolar inductor machine and wound-field synchronous machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 67(6), 5080–5089.

doi.org/10.1109/TIE.2019.2898577

-Yi, J. eun, Lee, K. W., Kim, B., Ko, J., Jeong, S., Noh, M. D., et al. (2017). Micro-flywheel energy storage system with axial flux machine. *In 2017 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1–6. **doi.org/10.1109/AIM.2007.4412435**

-Li, X., Anvari, B., Palazzolo, A., Wang, Z., & Toliyat, H. (2024). A utility-scale flywheel energy storage system with a shaftless, hubless, high-strength steel rotor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 65(8), 6667–6675. **doi.org/10.1109/TIE.2017.2767542**

-Mousavi G, S., Faraji, F., Majazi, A., & Al-Haddad, K. (2020). A comprehensive review of flywheel energy storage system technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 67, 477–490.

doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.060

-Nguyen, T. D., Tseng, K., Zhang, S., & Nguyen, H. T. (2019). A novel axial flux permanent-magnet machine for flywheel energy storage system: Design and analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 58(9), 3784–3794.

doi.org/10.1109/TIE.2010.2089937

-Sabihuddin, S., Kiprakis, A., & Mueller, M. (2019). A numerical and graphical review of energy storage technologies. Energies, 8(1), 172–216.

doi.org/10.3390/en8010172

-Sanders, S., Senesky, M., He, M., & Chiao, E. (2020). Low-cost flywheel energy storage demonstration (Technical Report CEC-500-2015-089). *California Energy Commission.*

-Severson, E., Nilssen, R., Undeland, T., & Mohan, N. (2019). Magnetic equivalent circuit modeling of the ac homopolar machine for flywheel energy storage. *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 30(4), 1670–1678. **doi.org/10.1109/TEC.2015.2440991**

Determining the Capacity and Optimal Location of Flywheel Energy Storage for Regenerative Braking Energy Recovery on Line 5 of Tehran-Karaj Metro

Ali Jandoost, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.

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

Pejman Salehi, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.

E-mail: setemadi@srbiau.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Flywheel energy storage systems (FESS) offer fast dynamic response and long cycle life, making them effective for regenerative braking in rail transit. Their efficiency, however, depends heavily on the integrated electric machine. This study comparatively evaluates two axial-flux permanent magnet (AFPM) topologies—with and without stator cores—to determine the optimal configuration for high-speed storage applications. Two modular machines with identical ratings (17.5 hp, 25,000–50,000 rpm) were modeled using finite element analysis (FEA) and assessed for specific power, efficiency, and open-circuit losses. Results show that the coreless topology achieves higher specific power (~6 kW/kg), independent of pole count, whereas the cored design offers lower specific power due to its heavier ferromagnetic core. At very high speeds (50,000 rpm), increasing pole numbers in the coreless machine significantly reduces efficiency due to eddy-current losses, necessitating Litz wires. In contrast, the cored structure is constrained to fewer poles due to core losses at high frequencies. It is concluded that coreless AFPM machines, by eliminating core losses and offering higher power density, are more promising for compact integration with flywheel rotors, provided that thermal management and conductive losses are addressed through advanced winding technologies. These findings provide a technical framework for selecting optimal electric machines in future metro energy recovery projects.

Keywords: Flywheel, Axial-Flux Machine, Energy Recovery