

کاربردهای نوین فناوری موتورهای سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا

ارسلان حکمتی، ایمان صادقی محلی

پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

Ahekmati@nri.ac.ir, Isadeghi@nri.ac.ir

سرعت-بالا مستقیماً به محور ماشین الکتریکی وصل شده و نیازی به استفاده از گیربکس به عنوان افزایش دهنده سرعت نخواهد بود. در حقیقت، هم توان و هم سرعت از طریق مبدل فرکانس کنترل می شوند.

در سالهای اخیر، تمایل به بکارگیری موتورهای آهنربای دائم در کاربردهای سرعت بالا افزایش یافته است. این موتورها از چگالی توان و بازده بالاتری نسبت به موتورهای القایی برخوردار هستند. در انواع کاربردهای سرعت بالا با سرعت بیشتر و توان مورد نیاز کمتر، تمایل بیشتری به استفاده از این موتورها وجود دارد. ساختار پیچیده روتور و محدودیت های حرارتی و مکانیکی ناشی از آن، مهم ترین عامل استفاده از موتورهای آهنربای دائم در کاربردهای با توان کمتر نسبت به موتورهای القایی است [1-2].

ماشین های سنکرون آهنربای دائم را بر اساس پیکربندی و شیوه نصب آهنربا به دو گروه تقسیم می کنند: در ماشین های سنکرون آهنربای سطحی¹ (SPM)، قطعات آهنربا بر روی سطح روتور نصب می شود. گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده در این ماشین تنها به شار پیوندی آهنربا وابسته است. با توجه به اهمیت بالای استحکام مکانیکی روتور در کاربردهای سرعت بالا، سطح روتور توسط یک حلقه محافظ² پوشانده می شود. اما در ماشین های سنکرون آهنربای داخلی³ (IPM)، قطعات آهنربا درون روتور قرار دارند. [21]. قرارگیری آهنربا در روتور برای موتورهای SPM و IPM در شکل 1 نشان داده شده است. طراحی ماشین های سنکرون آهنربای دائم سرعت بالا به صورتی انجام می شود که اندازه چگالی شار بهینه ماشین نسبت به چگالی شار بهینه در ماشین های مشابه با سرعت سنکرون، کاهش یابد. این کار با هدف پیاده سازی استراتژی تضعیف شار برای کنترل سرعت موتور انجام می گیرد. این مسئله، به طراحی ماشین با فاصله هوایی مؤثر بزرگتر و چگالی توان کمتر منجر می شود. برای جلوگیری از افت چگالی توان، می توان از استاتور بدون شیار استفاده کرد. در ساختار این استاتور، دندانه های استاتور با هادی ها جایگزین شده اند. با استفاده از استاتور بدون شیار، جریان نامی موتور افزایش می یابد و کاهش چگالی توان ناشی از افت شار جبران می شود [2]. سطح مقطع و شیوه قرار گرفتن هادی ها در استاتور عادی و استاتور بدون شیار در شکل 2 نمایش داده شده است.

چکیده – سرعت سنکرون در انواع ماشین های جریان متناوب به فرکانس شبکه قدرت وابسته است و عملکرد در سرعت های بالاتر در شرایط ماندگار نیازمند تغذیه ماشین با فرکانس های بالاتر است. توسعه فناوری دریوهای کنترل سرعت در دهه های اخیر، سبب توجه دوباره به موتورهای سرعت بالا شده است. از مزایای مهم بکارگیری موتورهای الکتریکی سرعت بالا می توان به چگالی توان بیشتر (و ابعاد کوچکتر) و توانایی تولید گشتاور بیشتر اشاره کرد. همچنین، استفاده از این موتورها امکان حذف جعبه دنده و سیستم روغن کاری را فراهم می کند که سبب کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری می شود. در این مقاله ابتدا تفاوت های اساسی در پیکربندی های موتورهای عادی و سرعت بالای مغناطیس دائم بیان می شوند سپس در مورد نمونه های ساخته شده و ویژگی های آنها بررسی صورت می پذیرد و در نهایت کاربردهای مدرن موتورهای مغناطیس دائم سرعت بالا مورد بحث قرار گرفته و تولیدکنندگان مطرح این موتورها در دنیا و مشخصات محصولاتشان معرفی می گردند.

واژه های کلیدی- موتور سنکرون؛ آهنربای دائم؛ سرعت بالا

1. مقدمه

در دهه های اخیر ماشین های الکتریکی سرعت - بالا با توجه به داشتن مزیت هایی مانند چگالی توان، قابلیت اطمینان بالا و نیز اندازه کوچک در مقایسه با ماشین های الکتریکی رایج بطور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته اند. رایج ترین انواع موتورهای الکتریکی در کاربردهای سرعت- بالا موتورهای القایی هستند. سرعت های بالای موتورهای القایی با استفاده از رتور یکپارچه که از فولاد نرم ساخته شده است (به جای رتور قفسه سنجابی) قابل دستیابی است. تحقیقات در زمینه ماشین های القایی با رتور یکپارچه فرومغناطیسی از حدود سال 1920 آغاز شد و در خلال سال های 1950 تا اوایل دهه 1970 تحقیقات گسترده ای در این خصوص صورت گرفت. اما علی رغم تحقیقات گسترده دانشگاهی در خصوص موتورهای القایی با رتور یکپارچه، این موتور بین سالهای 1950 و 1980 مورد توجه صنایع مختلف قرار نداشت تا اینکه در دهه 1990 در کاربردهای سرعت- بالا مورد توجه قرار گرفت. این موتورها در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند: کمپرسورها، پمپ های خلاء، و سیستم های چرخ طیار مورد استفاده قرار می گیرند. در تمامی این کاربردها، واحد

¹ Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine (SPM)

² Sleeve Ring

³ Interior Permanent Magnet Synchronous Machine (IPM)

بیشینه در موتورهای IPM با تضعیف شار فلز آهنربا و تلفات مسی در استاتور همراه است [3].

پرمصرف‌ترین ماده در ساخت موتورهای IPM، فولاد است. اما در موتورهای SPM از مس بیشتری استفاده می‌شود. همچنین، موتورهای IPM در مقایسه با موتورهای SPM مشابه به فلز آهنربای کمتری نیاز دارند. در سطح توان برابر، یک موتور IPM همواره وزن کمتری دارد. لازم به ذکر است که یک موتور IPM سرعت بالا، باید از آلیاژهای پر قدرت ساخته شود که هزینه زیادی دارند و فرایند تولید آن‌ها از مواد خام دشوار است. بنابراین، هزینه تهیه و پردازش مواد اولیه در موتورهای IPM نسبت به موتورهای SPM در سطح پایین‌تری قرار دارد.

اطلاعات مربوط به ویژگی‌های برخی از موتورهای آهنربای دائم سرعت بالا در جدول 1 آورده شده است. این اطلاعات بر اساس سرعت موتور مرتب شده‌اند [1].

2. نمونه موتور PMSM سرعت بالای 250 کیلو وات و 20000 دور در دقیقه

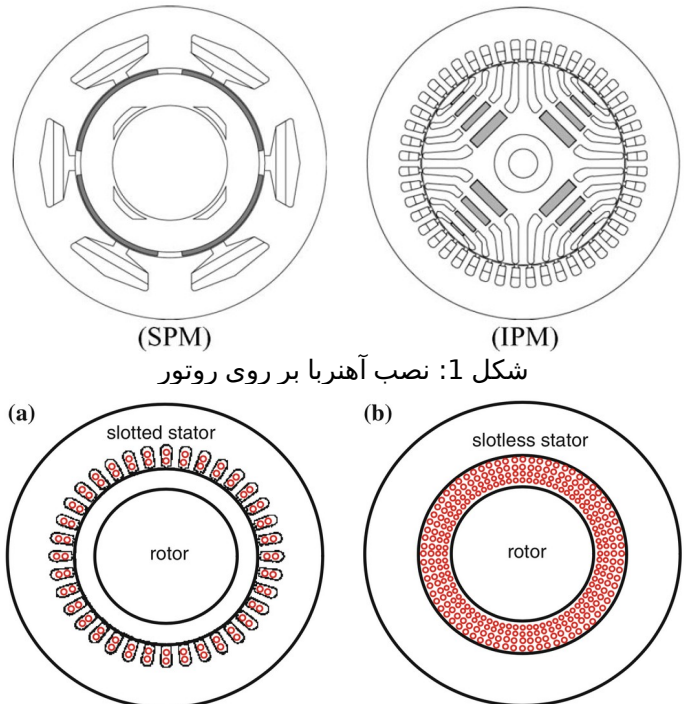
شرکت MEIDENSHA CORPORATION⁴ که سازنده بزرگ تجهیزات قدرت نظیر کلیدها، رله‌ها، مبدل‌های الکترونیک قدرت و تجهیزات ریلو توریبها و منابع تغذیه در ژاپن می‌باشد.

یک نمونه موتور PMSM سرعت بالای 250 کیلو وات و 20000 دور در دقیقه با سیستم برینگ مغناطیسی ایجاد کرده‌اند [4]. با استفاده از این موتور در این کاربردها، با جابجایی سیستم‌های سنتی دارای جعبه دنده‌های افزایش سرعت، با سیستم‌های درایو مستقیم با حذف جعبه دنده، اندازه سیستم کاهش می‌یابد، بازده سیستم افزایش و زمان تعمیرات و نگهداری نیز کاهش می‌یابد (بدلیل حذف روغن). لرزشها و نویز نیز کاهش پیدا می‌کند. بازده ماشین در نقطه نامی برابر 6/96 درصد و بازده بیشینه در کل گستره عملکردی موتور برابر 5/97 درصد بدست آمده است. مشخصات این موتور در جدول 2 ذکر گردیده است.

جدول 1: ویژگی‌های نمونه‌های واقعی موتورهای سنکرون آهنربای دائم سرعت بالا

ردیف	سرعت (دور بر دقیقه)	توان (کیلووات)	جنس حلقه محافظ روتور	پیکربندی	کاربرد
1	500.000	1	تیتانیوم	SPM	میکروتور، بین
2	500.000	1/0	تیتانیوم	SPM	میکروتور، بین
3	240.000	5	اینکونل	SPM	-
4	220.000	2	الیاف کربن	SPM	توربو شارژر
5	200.000	2	تیتانیوم	SPM	-
6	200.000	2	تیتانیوم	SPM	-
7	150.000	5/1	الیاف	SPM	اسپیندل

⁴ (<http://www.meidensha.com>)



شکل 1: نصب آهنربا بر روی روتور

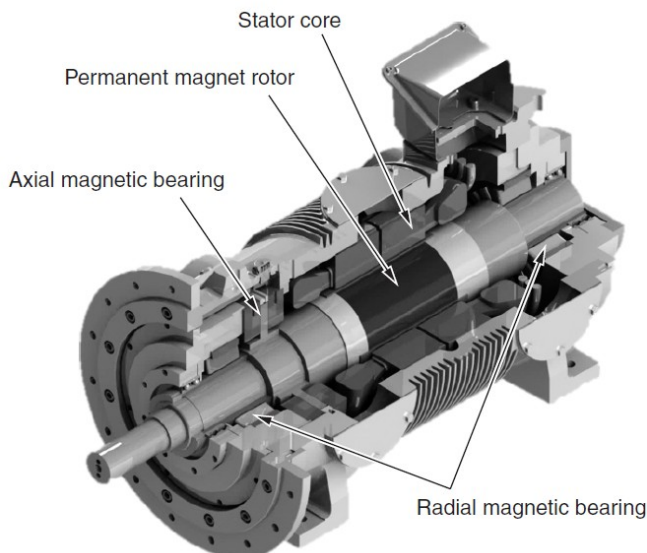
شکل 2: قرار گرفتن هادی‌ها در استاتور: دارای شیار (a) استاتور فاقد شیار (b)

در ادامه، موتورهای IPM و SPM سرعت بالا با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه با در نظر گرفتن عملکرد مکانیکی و الکترومغناطیسی، وزن و هزینه آن‌ها انجام شده است [3].

عنصر اصلی تحمل‌کننده فشار مکانیکی در موتورهای SPM، حلقه محافظ روتور است. اما در موتورهای IPM، ورقه‌های روتور و شفت ماشین به صورت مشترک تحت فشار قرار دارند. واضح است که با افزایش سرعت، فشار بیشتری به حلقه محافظ در موتورهای SPM وارد می‌شود. اما افزایش دما به عنوان عامل محدودکننده این فشار عمل می‌کند، زیرا سبب انبساط حلقه محافظ می‌شود. افزایش سرعت و دمای عملکرد، سبب افزایش فشار بر ورقه‌های روتور در موتورهای IPM می‌شوند. البته، افزایش دما با کاهش فشار وارد شده به شفت ماشین همراه است. در شرایط کار برابر، موتورهای IPM نسبت به موتورهای SPM، تحت فشار بیشتری قرار دارند. این مسئله، احتمال وقوع خرابی‌های ناشی از فرسودگی ماشین را افزایش می‌دهد.

دامنه هارمونیک‌ها در شکل موج چگالی شار در موتورهای IPM نسبت به موتورهای SPM بزرگتر است. زیرا: فرورفتگی‌های بیشتری در ساختار روتور وجود دارد. فاصله‌هوایی در موتورهای IPM نسبت به موتورهای SPM با توان مشابه، کمتر است.

بیشترین گشتاور الکترومغناطیسی در موتورهای SPM در زمانی تولید می‌شود که بردار میدان استاتور نسبت بردار میدان روتور، 90 درجه پیش‌فاز باشد. در این وضعیت، بردارهای شار و جریان استاتور هم‌راستا هستند و تلفات مسی به حداقل خود می‌رسد. در موتورهای IPM، بیشترین گشتاور زمانی تولید می‌شود که بردار جریان دارای دو مؤلفه متعامد و مخالف صفر باشد. در نتیجه، تولید گشتاور



شکل 3: نمای برش یافته موتور PMSM
چرخ گردان، یکی از پرکاربردترین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است. سیستم‌های ذخیره‌کننده مبتنی بر چرخ گردان، انرژی را در قالب انرژی جنبشی، در چرخ در حال دوران ذخیره می‌کنند. در این فناوری، انرژی ذخیره شده با مجذور سرعت دوران چرخ، متناسب است.

اسپیندل موتورهای، یکی از پرکاربردترین نمونه‌های موتورهای الکتریکی سرعت بالا در انواع ماشین‌آلات صنعتی می‌باشند. دقت و سرعت بسیار بالا، لرزش بسیار کم و چگالی توان بالا از مزایای اسپیندل موتورهای سرعت بالا به شمار می‌آیند. در این بخش کاربردهای اصلی که موتور مغناطیس دائم سنکرون سرعت بالا استفاده گردیده است، به‌مراه مهمترین سازندگان این موتورها ارائه شده و برخی نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفته اند.

3.1. کمپرسورها و دمنده‌های هوا

در سال‌های اخیر، نیاز به هوای خشک و پاکیزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی افزایش یافته است. تمایل به افزایش امنیت خط تولید در کنار بهبود بهره‌وری انرژی، سبب شده است تا حذف سیستم روغن‌کاری در کمپرسورها و دمنده‌های هوا در دستورکار بسیاری از تولیدکنندگان قرار گیرد. بنابراین، موتورهای القایی و باتاقان‌های مکانیکی به ترتیب با موتورهای سنکرون آهنربای دائم سرعت بالا و باتاقان‌های هوایی یا مغناطیسی جایگزین شده‌اند. در کنار حذف سیستم روغن‌کاری و به حداقل رساندن احتمال نشت روغن یا رطوبت، این عمل سبب افزایش بازده محرکه و کاهش فضای اشغال شده توسط محرکه می‌شود. بهبود بهره‌وری انرژی، یک برتری مهم دیگر برای این موتورها به شمار می‌آید. برای نمونه، استفاده از دمنده‌های مبتنی بر موتورهای سرعت بالا در برخی تصفیه‌خانه‌ها، مصرف انرژی را تا 35 درصد کاهش داده است [5].

اطلاعات مربوط به تولیدکنندگان اصلی محرکه‌های الکتریکی سرعت بالا در کمپرسورها و دمنده‌های هوا در جدول 3 ارائه شده است. یک نمونه کمپرسور هوا محصول شرکت K-Turbo در شکل 4 نشان داده شده است. در این

موتور	کرین				
سوپر شارژر	الیاف شیشه	5/1	150.000	8	SPM
-	تیتانیوم	22	120.000	9	SPM
-	اینکونل	5	120.000	10	SPM
-	الیاف کرین	5/0	60.000	11	SPM
اسپیندل موتور	SiFe	11	50.000	12	IPM
-	الیاف کرین	40	40.000	13	SPM
-	الیاف کرین	40	40.000	14	SPM
-	SiFe	-	40.000	15	IPM
-	ندارد	1	40.000	16	SPM
توربو کمپرسور	اینکونل	1	28.000	18	SPM

3. کاربردها و تولید کنندگان موتور PMSM سرعت بالا

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های بکارگیری محرکه‌های الکتریکی سرعت بالا، ارتقاء یا جایگزین کردن محرکه‌های گازی در صنایع گوناگون است. یک توربین گازی به عنوان عنصر اصلی در محرکه‌های گازی مطرح می‌باشد و کمپرسورهای گازی به عنوان پرکاربردترین تجهیز صنعتی مبتنی بر توربین گازی است.

جدول 2: مشخصات موتور 250 کیلو وات و 20000 دور در دقیقه شرکت MEIDENSHA CORPORATION

Item	Specifications
No. of poles	2
Rated output	250kW
Rated rotational speed	20,000min ⁻¹
Frequency	333.3Hz
Rated torque	119.4N·m
Cooling system	Forced air cooling
Bearings	Magnetic levitation type

نمای برش یافته این موتور نیز در شکل 3 نشان داده شده است.

سرعت بالا و درایو، امکان کنترل دقیق سرعت و گشتاور را فراهم می‌کند و سبب کاهش تعداد ابزارها می‌شود [9]. اطلاعات مربوط به برخی از سازندگان اسپیندل موتور در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4: سازندگان اسپیندل موتور مبتنی بر موتورهای الکتریکی سرعت بالا

ردیف	عنوان	نوع موتور	توان (کیلووات)	سرعت (دور بر دقیقه)
3	Servax	سنکرون آهنربای دائم	53	30.000
4	Siemens	سنکرون آهنربای دائم	5/18	24.000

3.3. رانش کشتی‌ها

در جدول 5 مشخصات اساسی موتورهای مختلف برای کاربرد رانش کشتی مقایسه گردیده است.

جدول 5: مقایسه مشخصات اساسی موتورهای مختلف برای کاربرد رانش کشتی

نوع موتور	مزایا	معایب
القایی قفسی	بادوام، نسبتاً ارزان و ساده	بازده پایین، چگالی توان پایین
القایی روتور سیم پیچی	نسبت به القایی قفسی مقاومت در برابر شوک‌ها بدلیل شکاف هوایی بزرگتر، بازده و ضربه توان بالاتر	نیاز به تحرک سیم پیچی مستقل، جاروبک و رینگ لغزشی باعث پیچیدگی بیشتر و هزینه‌های تعمیرات می‌گردند.
PMSM	چگالی توان بالا، نویز پایین، گشتاور بیشینه در سرعت صفر	از نظر حرارتی حساس است، عملکرد سرعت بالا نیاز به محفظه روتور دارد.
HTSC	چگالی توان و بازده انرژی خیلی بالا	نیاز به تجهیزات خنک‌سازی، تکنولوژی نابالغ

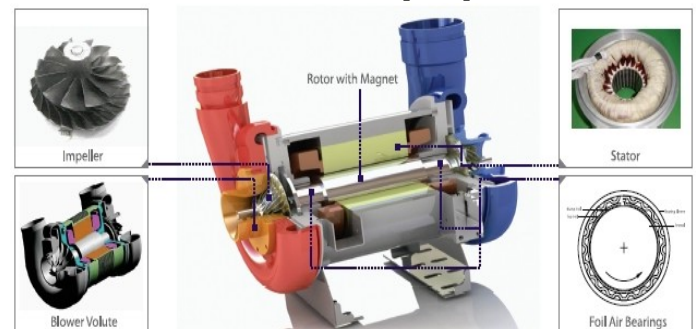
پیشرفتهای مشاهده شده در تکنولوژی PMSM در کنار مزایای دراز مدت این ماشینها، سبب شده این موتورها در سیستم رانش کشتی مورد مطالعه و تحقیق قرار گیرند. در این موتورها در سرعت‌های بالا، نسبت به انواع موتورهای متداول بازده بالاست و جرم ماشین بمراتب کمتر است. در مرجع [10] یک موتور 20 مگاوات با سرعت 10000 دور در دقیقه برای کاربرد رانش کشتی طراحی گردیده است. بزرگترین و قدرتمندترین موتور PMSM دنیا را کمپانی JEUMONT Electric به نیروی دریایی برزیل برای سیستم رانش کشتی تحویل داده است که 6 متر طول، 3 متر پهنا و 5/4 متر ارتفاع دارد. وزن آن نیز 72 تن می‌باشد، شکل 5. جزییات این پروژه منتشر نگردیده است لیکن بطور قطع موتوری با توان چندین مگا وات می‌باشد.

کمپرسور از یک موتور سنکرون آهنربای دائم با نصب سطحی استفاده شده است.

3.2. اسپیندل موتورها

اسپیندل موتورها، یکی از پرکاربردترین نمونه‌های موتورهای الکتریکی سرعت بالا در انواع ماشین‌آلات صنعتی می‌باشند. از آن‌ها در انواع کاربردهای تراشکاری، فرزکاری، حفاری ظریف، دستگاه‌های CNC، دندانبزشی و چاپ مدار استفاده می‌شود. همچنین، اسپیندل موتورها از مهم‌ترین اجزای بکار رفته در دیسک سخت رایانه‌ها هستند. دقت و سرعت بسیار بالا، لرزش بسیار کم و چگالی توان بالا از مزایای اسپیندل موتورهای سرعت بالا به شمار می‌آیند. سرعت و توان نامی در نمونه‌های تجاری اسپیندل موتورها، از تنوع بالایی برخوردار است. این موتورها در بازه سرعت 6 تا 300 هزار دور بر دقیقه و توان 24 کیلووات تا 200 وات مورد استفاده قرار می‌گیرند [6].

از جدیدترین کاربردهای اسپیندل موتورهای سرعت بالا می‌توان به ابزارآلات مورد استفاده در چاپ مدارهای الکترونیکی اشاره کرد. استفاده از موتورهای الکتریکی با سرعت و چگالی توان بالاتر در این کاربرد، به سرعت در حال گسترش است و برای سوراخ‌کاری مدارهای چاپی⁵، اسپیندل موتور با سرعت یک میلیون دور بر دقیقه نیز ساخته شده است [7-8].



شکل 4: کمپرسور هوا محصول شرکت K-Turbo

جدول 3: تولیدکنندگان محرکه‌های الکتریکی سرعت بالا برای کمپرسورها و دمنده‌های هوا

ردیف	نام	نوع موتور	توان (کیلووات)	سرعت (دور بر دقیقه)
1	K-Turbo	سنکرون آهنربای دائم	400	65.000
2	SKF	سنکرون آهنربای دائم	300	30.000
3	Suzler	سنکرون آهنربای دائم	-	50.000
4	Corac	سنکرون آهنربای دائم	150	45.000

یک زمینه جدید دیگر در بکارگیری اسپیندل موتورهای سرعت بالا، ابزار جراحی دندان توسط دندانبزشکان است. برای مدت طولانی، توربین‌های بسیار کوچک هوا (تغذیه شده توسط هوای تحت فشار) در ساختار ابزار جراحی دندان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نتیجه، هر کدام از ابزارها تنها امکان عملکرد در یک سرعت معین را داشت. جایگزین کردن توربین‌های هوا با موتورهای الکتریکی

⁵ PCB Drilling

در جدول 6، ویژگی‌های اساسی دو گروه با یکدیگر مقایسه شده است. محدودیت اساسی در ذخیره‌سازهای مبتنی بر چرخ گردان، چگالی انرژی پایین (با وجود چگالی توان بالا) در آنها است. بنابراین، استفاده از آنها در مواردی که توان خروجی سیستم در بازه‌های زمانی کوتاه، نوسان زیادی را تجربه کند، بکار می‌رود. استفاده از موتورهای الکتریکی سرعت بالا در ساختار ذخیره‌ساز مزایای فراوانی دارد. جایگزین کردن ذخیره‌سازهای مبتنی بر باتری با این فناوری:

- (1) ابعاد فیزیکی سیستم را کاهش می‌دهد.
- (2) بازده و عمر مفید سیستم را افزایش می‌دهد.
- (3) امکان عملکرد در بازه دمایی گسترده‌تر را فراهم می‌کند.



شکل 5: بزرگترین و قدرتمندترین موتور PMSM دنیا برای سیستم رانش کشتی

3.4. ذخیره‌سازهای انرژی مبتنی بر چرخ گردان

باتری الکترومکانیکی یا چرخ گردان، یکی از پرکاربردترین فناوری‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است. چرخ گردان در واقع یک چرخ در حال دوران (روتور) با جرم زیاد است که توسط یاتاقان‌های مغناطیسی بر روی یک جایگاه ثابت (استاتور) شناور نگه داشته شده است. چرخ ممکن است به شکل یک دیسک یا استوانه ساخته شود. سیستم‌های ذخیره‌کننده مبتنی بر چرخ گردان، انرژی را در چرخ در حال دوران ذخیره می‌کنند. در این سیستم‌ها، انرژی الکتریکی توسط یک موتور که وظیفه چرخاندن چرخ را بر عهده دارد، در قالب انرژی جنبشی ذخیره می‌شود. در شرایط نیاز به تزریق توان، موتور الکتریکی سرعت دوران را کاهش می‌دهد. در نتیجه، بخشی از انرژی مکانیکی دوباره به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

در ذخیره‌سازهای مبتنی بر چرخ گردان، از یک مبدل الکترونیک قدرت به عنوان واسطه برای برقراری اتصال میان بخش‌های الکتریکی و مکانیکی استفاده می‌شود. بازده انرژی در یک ذخیره‌ساز مبتنی بر چرخ گردان متصل به شبکه، در حدود 90 تا 95 درصد است. امروزه، این ذخیره‌سازها در بازه توان تا 50 مگاوات ساخته می‌شوند [11].

ذخیره‌سازهای مبتنی بر چرخ گردان را بر اساس سرعت دوران می‌توان به دو گروه تقسیم کرد [11]:

(1) ذخیره‌سازهای سرعت پایین، با سرعت کمتر از 10 هزار دور بر دقیقه که در سطح شبکه سراسری (و ریزشبکه‌ها) و انواع کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این ذخیره‌سازها از یک دیسک فولادی با اینرسی بالا استفاده می‌شود.

(2) ذخیره‌سازهای سرعت بالا، با سرعت بیشتر از 10 هزار دور بر دقیقه که در انواع سیستم‌های متحرک مانند خودروهای الکتریکی و ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیسک یا سیلندر مورد استفاده در این ذخیره‌سازها اغلب از مواد کامپوزیت ساخته می‌شود.

جدول 6: ویژگی‌های ذخیره‌سازهای انرژی مبتنی بر چرخ گردان

ردیف	ویژگی	سرعت پایین	سرعت بالا
1	ماده سازنده دیسک	فولاد	کامپوزیت
2	ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده	سنکرون آهنربای دائم رلوکتانس متغیر	سنکرون آهنربای دائم رلوکتانس متغیر
3	یاتاقان	مکانیکی مغناطیسی	مغناطیسی
4	کاربرد	بهبود کیفیت توان	صنعت حمل‌ونقل صنعت هوافضا
5	هزینه	کم	زیاد

برای نمونه، نسل جدید این ذخیره‌سازها نسبت به باتری‌های نیکل-هیدرید فلزی مورد استفاده در خودروهای الکتریکی، از چگالی توان بیشتر (و چگالی انرژی کمتر) برخوردار هستند [1]. یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر چرخ گردان در شکل 6 نشان داده شده است. این ذخیره‌ساز توسط شرکت Williams Hybrid Power برای استفاده در خودروی مسابقه‌ای پورشه GT3R 911 توسعه یافته است. سرعت نامی این ذخیره‌ساز، 40 هزار دور بر دقیقه و توان نامی آن، 120 کیلووات است. این تجهیز به گونه‌ای طراحی شده است که امکان جذب یا تزریق توان را در ظرفیت نامی خود برای دفعات زیاد داشته باشد، تا شتاب‌گیری و ترمزهای متوالی خودرو در طول مسابقه، با مصرف سوخت کمتری همراه باشد. در نتیجه، از چگالی توان بالا (و چگالی انرژی کم) برخوردار می‌باشد و توانایی آن برای ذخیره‌سازی انرژی بسیار محدود است (8-6 ثانیه).



شکل 6: ذخیره‌ساز مبتنی بر چرخ گردان، طراحی و ساخت توسط Williams Hybrid Power

3.5. میکروتوربین‌ها

به توربین‌های گازی با ابعاد فیزیکی کوچک و ظرفیت تقریبی 30 تا 330 کیلووات، میکروتوربین گفته می‌شود. نمونه‌های تجاری این فناوری در قالب بسته‌های با ظرفیت یک مگاوات و به همراه ژنراتورهای سرعت بالا (تا 120

- [1] Gerada, David, Abdeslam Mebarki, Neil L. Brown, Chris Gerada, Andrea Cavagnino, and Aldo Boglietti. "High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments." IEEE Transactions on Industrial Electronics 61, no. 6 (2014): 2946-2959.
- [2] Borisav Ijevic, A. "Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines, 2013 edition."
- [3] Dong, Jianning, Yunkai Huang, Long Jin, and Heyun Lin., "Comparative study of surface-mounted and interior permanent-magnet motors for high-speed applications." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 26, no. 4 (2016): 1-4.
- [4] Takashi Okitsu, et al., "Evaluation of a 250 kW- 20,000min-1 High Speed PM mototr", MEIDEN REVIEW, Series No. 172, 2018, No.1.
- [5] Bell, K. Y., and S. Abel. "Optimization of WWTP aeration process upgrades for energy efficiency." Water Practice and Technology 6, no. 2 (2011): wpt2011024.
- [6] Boglietti, A., A. Cavagnino, A. Tenconi, and S. Vaschetto. "Key design aspects of electrical machines for high-speed spindle applications." In IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1735-1740. IEEE, 2010.
- [7] Papini, Luca, David Gerada, and Chris Gerada. "Development and testing aspects of high speed induction machines." In Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on, pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [8] Zwyssig, Christof, Johann W. Kolar, and Simon D. Round. "Megaspeed drive systems: Pushing beyond 1 million r/min.", IEEE/ASME Transactions on mechatronics 14, no. 5 (2009): 564-574.
- [9] Zwyssig, C., M. Duerr, D. Hassler, and Johann W. Kolar. "An ultra-high-speed, 500000 rpm, 1 kW electrical drive system." In Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07, pp. 1577-1583. IEEE, 2007.
- [10] M.D. Bogomolov, "Concept study of 20 MW highspeed permanent magnet synchronous motor for marine propulsion", Msc Thesis, The department of Electrical Engineering of the Eindhoven University of Technology, 2013.
- [11] Faisal, Mohammad, M. A. Hannan, Pin Jern Ker, Aini Hussain, M. Mansur, and F. Blaabjerg. "Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges." IEEE Access (2018).
- [12] Goldstein, Larry, Bruce Hedman, Dave Knowles, Steven I. Freedman, Richard Woods, and Tom Schweizer. "Gas-fired distributed energy resource technology characterizations." National Renewable Energy Laboratory, Report No. NREL/TP-620-34783 (2003).
- [13] C. Zwyssig, et al., "Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 5, pp. 564-574, 2009.

هزار دور بر دقیقه) نیز ساخته شده است [7][1]. مشابه توربین‌های گازی بزرگ، اساس عملکرد میکروتوربین‌ها مبتنی بر چرخه ترمودینامیکی برایتون است. ابعاد کوچک و وزن کم، این فناوری را به یک گزینه مناسب برای انواع کاربردهای با محدودیت فضای اشغال شده تبدیل کرده است. میکروتوربین‌ها از تنوع سوخت بالایی برخوردار هستند و می‌توانند از انواع سوخت‌های مایع یا گاز مانند گاز طبیعی، پروپان، بوتان، دیزل، نفت سفید و زیست‌گاز استفاده کنند. از آن‌ها اغلب در سیستم‌های تولید همزمان حرارت و انرژی الکتریکی و در مکان‌هایی استفاده می‌شود که فضا برای نصب تجهیزات تولید توان محدود است [12]. بنابراین، چگالی توان بالا برای ژنراتور متصل به میکروتوربین ضروری است.

برای تامین توان مورد نیاز بدون افزایش قابل توجه ابعاد، استفاده از یک ماشین الکتریکی سرعت بالا به عنوان ژنراتور اجتناب‌ناپذیر است. در بیشتر نمونه‌های تجاری، از ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم سرعت بالا استفاده می‌شود. یک میکروتوربین ساخته شده توسط شرکت Bladon در شکل 7 نشان داده شده است. این میکروتوربین از ظرفیت 50 کیلووات برخوردار است و می‌تواند با سرعت 80 هزار دور بر دقیقه دوران کند. اطلاعات مربوط به چند سازنده مهم میکروتوربین در جدول Error7: Reference source not found ارائه شده است.

5. نتیجه گیری

بنظر میرسد تحقیقات آتی متمایل بر موتورهای سرعت بالای با ابعاد کوچک و رده توانی کوچک (حدود 100 وات) با چگالی توان بالا می باشد. نمونه‌هایی از این ماشین‌ها در شکل 9 نشان داده شده‌اند.

با این وجود بنظر می‌رسد در کشور ما جایگزینی درایوهای سرعت بالا نظیر توربین‌های گازی و بخاری برای چرخاندن ماشین‌های پروسه‌های صنعتی مختلف در صنایع نفت و گاز و نیز در کمپرسورهای سانتریفیوژی برای سردسازی، یا در پروسه‌های LNG تا 90 مگا وات با موتورهای سرعت بالا بدلیل مزایای اقتصادی و فنی عمده‌ای که فراهم می‌کند، مناسبترین و توجیه پذیرترین کاربرد باشد.

جدول 7: سازندگان میکروتوربین‌های گاز

ردیف	عنوان	توان (کیلووات)	سرعت (دور بر دقیقه)
1	Capstone	30	120.000
2	Ansaldo	100	70.000



شکل 7: میکروتوربین ساخته شده توسط شرکت Bladon

منابع