مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۲۳، صفحات ۳–۱۳

دسته‌بندی، معرفی و مقایسه انواع موتورهای الکتریکی

بهرام سلطان محمد[۱]، احسان سوایی[۲ و *]

[۱] استادیار پژوهشکده مکانیک و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
*مسئول مکاتبات: ehsansavaee@gmail.com

◄ چکیده

موتور الکتریکی یک دستگاه الکترومکانیکی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. موتور های الکتریکی عموماً حرکت چرخشی تولید می کنند و در صنایع و کاربردهای گوناگونی مورد استفاده قرار می گیرند و به همین جهت، انواع متفاوتی از این موتورها با تکنولوژی ها، اصول کارکرد و خصوصیات مختلف و متنوعی طراحی و توسعه یافته و بهره برداری شده اند. استفاده صحیح از هر یک از انواع موتورهای الکتریکی، مستلزم شناخت صحیح و توانایی مقایسه این موتورها از جوانب مختلف است. در این مقاله پس از تشریح اجزای اصلی موتورهای الکتریکی شامل روتور، استاتور و مکانیزم کموتاسیون و نقش هر یک آنها در عملکرد صحیح موتور، به دسته بندی و بررسی انواع موتورهای الکتریکی از جهات مختلف مانند ولتاژ ورودی، نوع کموتاسیون و... پرداخته شده و مبنای کار هریک توضیح داده شده است و مقایسه کاملی بین خصوصیات انواع موتورهای مطرح و پرکاربرد، صورت گرفته است.

◄ واژگان کلیدی

ماشین‌های الکتریکی
موتور الکتریکی
انواع موتورهای الکتریکی

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۷/۰۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

۱ مقدمه

موتور الکتریکی یک دستگاه الکترومکانیکی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. بیشتر موتورهای الکتریکی برای تولید نیرو از تعامل بین میدان‌های مغناطیسی و جریان درون رساناها استفاده می‌کنند. فرآیند برعکس شامل تولید انرژی الکتریکی از انرژی مکانیکی می‌شود که به وسیله ژنراتورهایی مانند دینام‌ها انجام می‌شود. برخی از موتورهای الکتریکی را می‌توان به عنوان ژنراتور مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال یک موتور کشنده یک وسیله نقلیه می‌تواند این دو وظیفه را انجام دهد. به موتورهای الکتریکی و ژنراتورها معمولا «ماشین‌های الکتریکی» می‌گویند.

موتورهای الکتریکی عموماً حرکت چرخشی تولید می‌کنند و در صنایع و کاربردهای گوناگونی همچون فن‌های صنعتی، دمنده‌ها، ابزارهای برقی، وسایل خانگی، ابزارهای قدرت و دیسک درایوها مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای الکتریکی می‌توانند به وسیله جریان مستقیم تغذیه شوند، مانند دستگاه پرتابل باتری‌خور و یا موتور وسایل نقلیه و یا به وسیله برق متناوب از شبکه توزیع برق و یا اینورتر . کوچک‌ترین موتورها را می‌توان در ساعت‌های مچی الکتریکی یافت.

موتورهای عمومی دارای ابعاد و عملکرد استاندارد شده‌ای هستند که در مصارف صنعتی توان مکانیکی را فراهم می‌کنند. موتورهای الکتریکی بسیار بزرگ در پیش‌رانی کشتی‌ها، کمپرسورهای خطوط لوله و پمپ‌های آب موجود هستند و دارای اندازه‌های نامی تا ۱۰۰ مگاوات می‌باشند. موتورهای الکتریکی را می‌توان برحسب منبع تغذیه، ساختمان داخلی، کاربرد و یا نوع حرکتی که تولید می‌کنند دسته‌بندی کرد. نمونه هایی از موتورهای الکتریکی در ابعاد مختلف در مقایسه با یک باتری کتابی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

شکل ۱: تصویری انواع موتورهای الکتریکی

۲ اجزای موتور الکتریکی

موتورهای الکتریکی به طور معمول از اجزای اصلی مشخصی تشکیل می‌شوند که در ادامه به معرفی آنها پرداخته شده است.

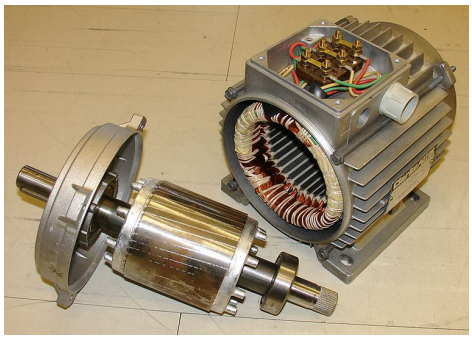
۱.۲ روتور

در یک موتور الکتریکی، روتور[۱] بخش در حال حرکت است که با چرخاندن شافت، توان مکانیکی را تحویل می‌دهد. روتور معمولاً دارای رساناهایی است که دارای جریان الکتریکی هستند و تحت تاثیر میدان مغناطیسی استاتور، تولید نیروی لازم برای چرخش شفت را انجام می‌دهند. البته برخی از روتورها دارای آهن‌رباهای دایمی هستند و رسانای حامل جریان در استاتور قرار می‌گیرد.

[1] Rotor

۲.۲ استاتور

بخش ثابت موتور، استاتور[1] است که معمولا دارای سیم‌پیچ یا آهن‌ربای دایمی می‌باشد. در بین روتور و استاتور فاصله هوایی[2] وجود دارد. شکاف هوایی دارای تاثیر مهمی است و معمولا تا حد ممکن کوچک می‌باشد، زیرا یک شکاف بزرگ اثر منفی زیادی بر عملکرد یک موتور الکتریکی می‌گذارد. شکل ۲ نمونه ای از استاتور و روتور یک موتور را در حالت دمونتاژ شده نشان می‌دهد. در حالت خاص روتور می‌تواند ثابت و استاتور چرخان باشد.



شکل ۲: استاتور و روتور یک موتور

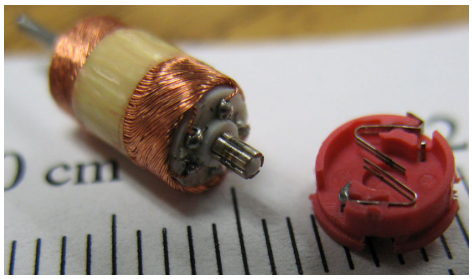
همانطور که ذکر گردید روتور و استاتور می‌توانند مغناطیس دایم و یا مغناطیس الکتریکی باشند. در حالت مغناطیس الکتریکی، سیم‌پیچی[3] آنها از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. سیم‌پیچ‌ها سیم‌هایی هستند که عموماً به صورت کلاف بافته شده‌اند و معمولاً در اطراف یک هسته مغناطیسی[4] چندلایه از جنس آهن نرم پیچیده شده‌اند، به طوری که در اثر جریان الکتریکی انرژی تشکیل قطب مغناطیسی می‌دهند.

برخی موتورها به جای سیم‌پیچ دارای رساناهایی هستند که از فلز ضخیم‌تری مانند میله یا ورق فلزی از جنس مس و گاهی آلومینیوم تشکیل شده‌اند و معمولاً به وسیله القای الکترومغناطیسی کار می‌کنند.

۳.۲ مکانیزم کموتاسیون

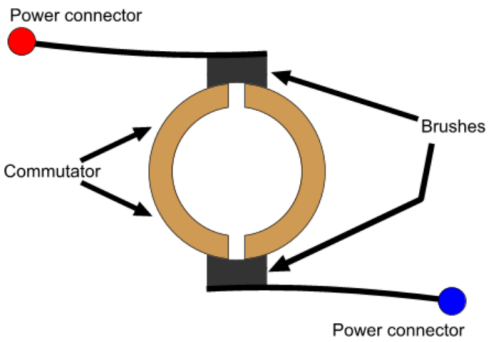
عمل کموتاسیون یکی از فرآیندهای کاری اصلی موتورهای الکتریکی مغناطیسی است. در برخی از انواع موتور جهت انجام کموتاسیون[5] از کموتاتورهای مکانیکی استفاده می‌شود. این نوع کموتاتور[6] مکانیزمی است که برای تغییر ورودی ماشین‌های AC و DC به کار می‌رود و شامل قطاع‌های رینگ‌های لغزشی[7] هستند که از یکدیگر و از شفت موتور الکتریکی عایق شده‌اند. جریان روتور از طریق جاروبک[8] های ثابت در تماس با کموتاتور دوار تامین می‌شود که باعث معکوس شدن جریان مورد نیاز و اعمال توان بهینه به ماشین در زمان چرخش روتور از یک قطب تا قطب دیگر می‌شود. در غیاب این معکوس‌سازی جریان، موتور تا توقف کامل ترمز می‌کند. کموتاتور یک موتور کوچک در شکل ۳ و آرایش کموتاتور و جاروبک در شکل ۴ نشان داده شده است.

در سایه پیشرفت‌های قابل توجه چند دهه گذشته به دلیل بهبود تکنولوژی کنترلر الکترونیکی، موتورهای با کموتاسیون مکانیکی به صورت گسترده در حال جایگزینی به وسیله موتورهای کموتاسیون الکترونیکی هستند.



شکل ۳: کموتاتور یک موتور کوچک

کمونانور یک موتور کوچک



آرایش کمونانور و جاروبک موتور

شکل ۴: آرایش کموتاتور و جاروبک

۳ اختصارات رایج در موتورهای الکتریکی

برخی از اصلاحات و اختصارت رایج در حوزه موتورهای الکتریکی به شرح جدول ۱ می‌باشند:

جدول ۱: اصلاحات و اختصارت رایج در حوزه موتورهای الکتریکی

اختصارات	توضیح
BLAC	موتور AC بدون جاروبک (Brushless AC)
BLDC	موتور DC بدون جاروبک (Brushless DC)
BLDM	موتور DC بدون جاروبک (Brushless DC motor)
EC	کموتاتور الکترونیکی (Electronic Commutator)
PM	آهن‌ربای دایم (Permanent Magnet)
IPMSM	موتور سنکرون با آهن‌ربای دایمی داخلی (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)
PMSM	موتور سنکرون با آهن‌ربای دایمی (Permanent Magnet Synchronous Motor)
SPMSM	موتور سنکرون با آهن‌ربای دایمی سطحی (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)
SCIM	موتور القایی قفس سنجابی (Squirrel-Cage Induction)
SRM	موتور رلوکتانسی قطع و وصلی (Switched Reluctance)
SyRM	موتور رلوکتانسی سنکرون (Synchronous Reluctance)
VFD	درایو فرکانس متغیر (Variable-Frequency Drive)
WRIM	موتور القایی با روتور سیم‌پیچی (Wound-Rotor Induction Motor)
WRSM	موتور سنکرون با روتور سیم‌پیچی (Wound-Rotor Synchronous Motor)

[1]Stator [2]Air Gap [3]Winding [4]Magnetic Core [5]commutation [6]Commutator [7]Slip Ring [8]Brush

۴ انواع موتور الکتریکی

موتورهای الکتریکی بر اساس سه اصل فیزیکی مختلف کار می‌کنند، مغناطیس، الکترواستاتیک و پیزو الکتریک[1] که تاکنون متداول‌ترین آن‌ها، نوع مغناطیسی بوده است.

در موتورهای مغناطیسی، میدان مغناطیسی در روتور و استاتور تشکیل می‌شود. ضرب برداری این دو میدان یک نیرو و در نتیجه یک گشتاور بر روی محور روتور ایجاد می‌کند. یکی یا هر دو این میدان‌ها را باید با چرخش روتور تغییر داد. این کار با روشن و خاموش کردن قطب‌ها در زمان مناسب و یا تغییر قدرت قطب انجام می‌شود.

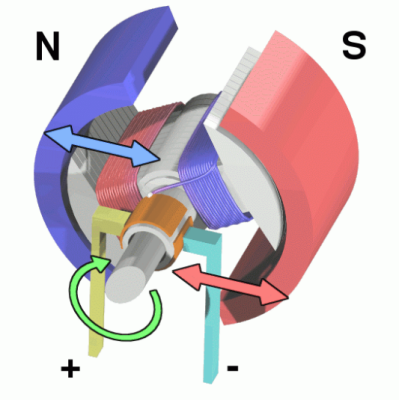
انواع اصلی موتورها از نظر نوع تغذیه ورودی شامل موتورهای DC و موتورهای AC می‌شود که نوع دوم تا حد زیادی جایگزین نوع اول شده است. موتورهای الکتریکی AC می‌توانند سنکرون[2] یا آسنکرون[3] باشند. زمانی که یک موتور سنکرون استارت می‌کند، نیاز به سنکرون شدن میدان مغناطیسی متغیر با همه گشتاورها می‌باشد. در ماشین‌های سنکرون میدان مغناطیسی باید با استفاده از وسیله‌ای غیر از القای اصلی همانند یک سیم‌پیچ با تحریک جداگانه و یا آهن‌رباهای دایمی تامین شود.

جدول ۲ یک دسته‌بندی ترکیبی را از انواع موتورهای الکترومغناطیسی بر اساس نوع کموتاسیون و نوع تغذیه ورودی ارائه نموده است.

در ادامه برخی از انواع موتورهای فوق که متداول‌تر بوده و کاربرد گسترده‌تری در صنعت دارند از لحاظ ساختمان داخلی و مزایا و معایب مورد بررسی قرار گرفته اند.

۱.۴ موتور DC جاروبکی

موتور DC جاروبک‌دار توسط یک دانشمند بریتانیایی به نام William Sturgeon در سال ۱۸۳۲ میلادی ثبت اختراع شد. بیش‌تر موتورهای DC از نوع مغناطیس دایم یا PM در ابعاد کوچک هستند که نمونه آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

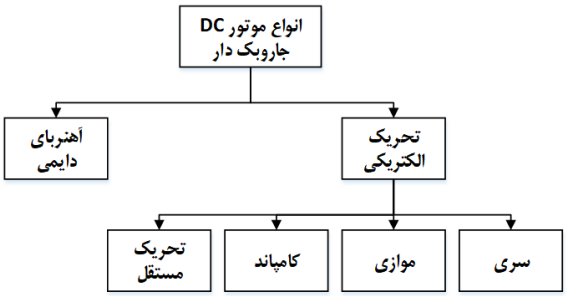


شکل ۵: کارکرد یک موتور DC جاروبکی

این موتورها دارای کموتاسیون مکانیکی برای برعکس کردن جریان سیم‌پیچ به صورت همزمان با چرخش هستند. در کل می‌توان مزایا و معایب زیر را برای همه انواع موتورهای DC جاروبک‌دار نام برد:

- قابلیت کنترل خوب
- منحنی جریان–گشتاور خطی
- ریپل گشتاور پایین
- قابلیت اطمینان پایین
- نیاز به تعمیر و نگهداری دوره ای
- جرقه زنی زمان عمل کموتاسیون

انواع مختلف این نوع موتور در نمودار شکل ۶ بیان شده و در ادامه توضیحاتی در خصوص هر نوع بیان شده است.



شکل ۶: موتور DC جاروبک‌دار با تحریک الکتریکی

موتور DC جاروبک‌دار با تحریک الکتریکی دارای مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌های دوار است که بر روی یک آرمیچر[4] نصب شده بر روی یک شفت دوار پیچیده شده‌اند. شافت، کموتاتور را نیز حمل می‌کند که شامل یک سوییچ الکتریکی دوار بلند است که با چرخش شفت به صورت دوره‌ای جریان سیم‌پیچ روتور را معکوس می‌کند. بنابراین، هر موتور DC جاروبکی دارای جریان AC درون سیم‌پیچ‌های دوار خود است. جریان از درون یک یا چند جاروبک که بر روی کموتاتور قرار دارند جریان می‌یابد. جاروبک‌ها یک منبع خارجی برق را به آرمیچر دوار اتصال می‌دهند.

آرمیچر دوار شامل یک یا چند سیم‌پیچ در اطراف یک هسته فرو مغناطیسی لایه‌لایه که از نظر مغناطیسی نرم است، می‌باشد. جریان از جاروبک‌ها به کموتاتور و یک سیم‌پیچ از آرمیچر جریان می‌یابد و آن را یک آهن‌ربای موقت می‌کند. میدان مغناطیسی تولید شده توسط آرمیچر با یک میدان مغناطیسی ثابت تولید شده توسط آهن‌رباهای دایمی و یا یک سیم‌پیچ میدان دیگر که بخشی از قاب موتور هستند، تعامل می‌کند. نیروی بین دو میدان مغناطیسی تمایل به چرخاندن محور موتور دارد. با چرخش شفت موتور، کموتاتور برق را میان سیم‌پیچ‌ها قطع و وصل می‌کند، که باعث جلوگیری از هم‌راستا شدن کامل قطب مغناطیسی روتور با قطب مغناطیسی میدان استاتور می‌شود و این باعث می‌شود که روتور هرگز متوقف نشود (بر خلاف سوزن قطب‌نما) و تا زمانی که برق تامین می‌شود به چرخش خود ادامه دهد.

بسیاری از محدودیت‌های موتور DC کموتاتوری کلاسیک به دلیل نیاز به جاروبک‌هایی است که در مقابل کموتاتور فشار وارد می‌کنند. این کار باعث ایجاد اصطکاک می‌شود.

زمانی که روتور از شکاف عایق بین بخش‌های کموتاتور می‌گذرد، جاروبک‌ها تولید جرقه می‌کنند که باعث قطع شدن مدارهای کویل می‌شود. بسته به نوع طراحی کموتاتور، این ممکن است شامل اتصال کوتاه شدن

[1]Piezoelectric [2]Synchronous [3]Asynchronous [4]Armature

جدول ۲: دسته‌بندی موتورهای الکتریکی مغناطیسی

کموتاسیون داخلی			کموتاسیون خارجی	
کموتاتور مکانیکی		کموتاتور الکترونیکی	آسنکرون	سنکرون
AC	DC		AC	
• موتور یونیورسال • موتور دفعی[1]	• موتور DC با تحریک الکتریکی: * موازی * سری * کامپاند * تحریک جداگانه • موتور DC مغناطیس دایم	• با روتور PM: موتور BLDC • با روتور فرومغناطیس: SRM *	• موتورهای سه فاز: SCIM * WRIM * • موتورهای AC: * خازن * مقاومت * اسپلیت * قطب چاک‌دار	• موتورهای سه فاز: WRSM * PMSM * BLAC motor * IPMSM * SPMSM * * هایبرید • موتورهای AC: * خازن دایمی اسپلیت * هیسترزیس * پله‌ای SyRM * * هایبرید SyRM-PM

بخش‌های مجاور به وسیله جاروبک‌ها و در نتیجه انتهای کویل‌ها در لحظه‌ای باشد که از شکاف‌ها عبور می‌کنند. علاوه بر این، اندوکتانس سیم‌پیچ روتور باعث می‌شود که ولتاژ هر مدار در زمانی که آن مدار باز می‌شود، افزایش یابد که باعث افزایش جرقه جاروبک‌ها می‌گردد. این جرقه باعث محدودتر شدن سرعت ماشین می‌شود، زیرا جرقه بسیار سریع باعث گرم شدن بیش از حد، سایش و یا حتی ذوب شدن کموتاتور می‌گردد.

چگالی جریان در واحد سطح جاروبک‌ها در ترکیب با مقاومت آن‌ها باعث محدود شدن خروجی موتور می‌گردد. قطع و وصل تماس‌های الکتریکی همچنین باعث تولید نویز الکتریکی می‌شود. جاروبک‌ها در نهایت فرسوده می‌شوند و نیاز به جایگزینی دارند و خود کموتاتور در اثر فرسایش نیاز به تعمیرات (در موتورهای بزرگ) و یا تعویض (در موتورهای کوچک) دارد. تجهیز کموتاتور در موتورهای بزرگ، یک قطعه گران قیمت است که نیاز به مونتاژ دقیق بسیاری از قطعات دارد. در موتورهای کوچک کموتاتور معمولا به صورت دایمی با روتور یکپارچه شده است، بنابراین جایگزینی آن معمولا نیاز به جایگزین کردن کل روتور دارد.

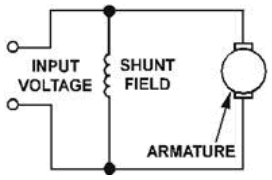
در حالی که بیش‌تر کموتاتورها استوانه‌ای هستند، برخی از آن‌ها به صورت دیسک‌های مسطح متشکل از چندین قسمت (به طور معمول، حداقل سه قسمت) می‌باشند که بر روی یک عایق نصب شده‌اند.

جاروبک‌های بزرگ برای سطح تماس بزرگ‌تر جاروبک مطلوب هستند تا خروجی موتور را به حداکثر برسانند، اما جاروبک‌های کوچک برای کاهش جرم و به حداکثر رساندن سرعتی که در آن موتور می‌تواند بدون برخورد بیش از حد جاروبک‌ها و جرقه کار کند به کار روند. جاروبک‌های کوچک برای کاهش هزینه‌ها نیز مطلوب هستند. فنرهای سخت‌تر نیز می‌توانند برای استفاده از جاروبک‌ها با جرم مشخص در سرعت بالاتر به کار روند اما این کار به قیمت تلفات اصطکاکی بیش‌تر و راندمان پایین‌تر و فرسایش سریع‌تر جاروبک و کموتاتور می‌باشد. بنابراین طراحی جاروبک موتور DC مستلزم ایجاد توازن بین توان خروجی، سرعت، کارایی و فرسایش می‌باشد.

به طور رایج ۴ نوع موتور جاروبکی DC با تحریک الکتریکی به شرح زیر وجود دارد که تفاوت آنها در مدار الکتریکی بین سیم‌پیچ روتور و استاتور می‌باشد.

۱.۱.۴ موتور DC جاروبک‌دار با سیم‌پیچ موازی[2]

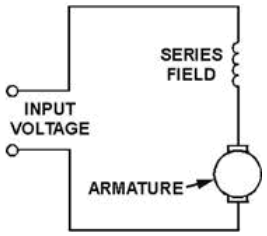
این موتور قابل استفاده نیازمندی سرعت‌های دقیق موتور نیاز است. مدار این موتور در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مدار موتور DC جاروبکی موازی

۲.۱.۴ موتور DC جاروبک‌دار با سیم‌پیچ سری[3]

مدار این موتور در شکل ۸ نشان داده شده است و از خصوصیات اصلی آن می‌توان به گشتاور راه اندازی بالا، دینامیک سریع و قابلیت استفاده در بارهای سنگین را نام برد.



شکل ۸: مدار موتور DC جاروبکی سری

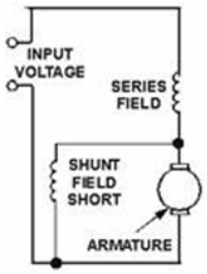
۳.۱.۴ موتور DC جاروبک‌دار کامپاند[4]

ترکیبی از موتورهای سری و شنت می‌باشد و مزایای هر دو موتور را یکجا دارد. مدار آن در شکل ۹ نشان داده شده است. این موتور دارای دو آرایش

[1]Repulsion Motor [2]DC Shunt-Wound Motor [3]DC Series-Wound Motor [4]DC Compound Motor

زیر می‌باشد.

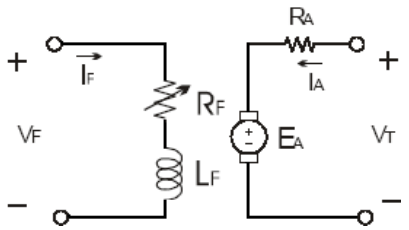
- کامپاند تجمیعی [1]
- کامپاند تفاضلی [2]



شکل ۹: مدار موتور DC جاروبکی کامپاند

۴.۱.۴ موتور DC جاروبک دار با تحریک مستقل

تغذیه استاتور و روتور این نوع موتور مستقل بوده و مدار آن مطابق شکل ۱۰ می‌باشد.

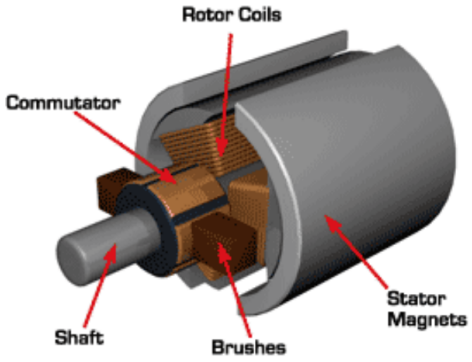


شکل ۱۰: مدار موتور DC جاروبکی تحریک مستقل

۵.۱.۴ موتور DC جاروبک‌دار آهن‌ربای دایمی

موتور آهن‌ربای دایمی که ساختمان آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است، دارای سیم‌پیچ میدان در قاب استاتور نیست، به جای آن برای تامین میدان مغناطیسی که میدان روتور با آن برای تولید گشتاور تعامل می‌کند، بر آهن‌ربای دایم تکیه دارد. ممکن است به منظور بهبود کموتاسیون در شرایط تحت بار، در موتورهای بزرگ از سیم‌پیچ‌های جبران‌ساز به صورت سری با آرمیچر استفاده شود. از آن‌جا که این میدان ثابت است، نمی‌توان آن را برای کنترل سرعت تنظیم کرد. میدان‌های مغناطیس دایم استاتور برای موتورهای کوچک مناسب است. به این دلیل که مصرف برق سیم‌پیچ‌های میدان را حذف می‌کند. بیش‌تر موتورهای DC بزرگ‌تر از نوع دینامی هستند که دارای سیم‌پیچ‌های استاتور می‌باشند. آهنرباهای بزرگ، بسیار گران و همچنین خطرناک هستند و مونتاژ آن‌ها دشوار است، این مسایل باعث سنگین شدن کفه ترازو به سمت سیم‌پیچ‌های میدان برای ماشین‌های بزرگ می‌شود.

در مجموع از خصوصیات این نوع موتورها می‌توان به عدم نیاز به جریان تحریک بالا، بازدهی بالا، طول عمر زیاد و کاربرد در اندازه کوچک اشاره نمود. این موتورها دارای محدودیت هایی از قبیل محدودیت سرعت، مشکل‌های نویز، گرما و تداخل الکترومغناطیسی هستند که ناشی از وجود کموتاتور و جاروبک‌ها است.



شکل ۱۱: ساختمان موتور DC آهن‌ربای دایمی

برای به حداقل رساندن وزن کلی و اندازه، موتورهای کوچک PM از آهن‌رباهای پر انرژی از جنس نئودیمیوم یا دیگر عناصر استراتژیک استفاده می‌کنند که بیش‌تر آن‌ها آلیاژهای نئودیمیوم، آهن، بور هستند.

۶.۱.۴ موتور DC بدون جاروبک

در کاربردهای نظامی و به خصوص موشکی، سه خواسته مهم در خصوص موتورهای الکتریکی عملگرها مطرح است. گشتاور و توان حجم واحد بالا، بازدهی بالا و عملکرد دینامیکی سریع. یکی از راه حل‌های اصلی برای رسیدن به این موارد جایگزینی روتور مغناطیس دائم به جای روتور سیم‌پیچی شده است که همین مهم باعث کم رنگ شدن نقش موتورهای DC جاروبک‌دار و القایی سه فاز در کاربردهای موشکی شده است.

سابقه استفاده از تحریک مغناطیس دائم در ماشین‌های الکتریکی برای اولین بار به اوایل قرن ۱۹ بر می‌گردد. اما به خاطر کیفیت ضعیف مواد مغناطیس دائم مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۳۲ با اختراع آلنیکو استفاده از سیستم‌های تحریک مغناطیس دائم جان تازه ای گرفت ولی فقط محدود به ماشین‌های کموتاتوردار کوچک بود. در سال ۱۹۸۰ با اختراع مگنت‌های کمیاب نئودیمیم–آهن–بور (NdFeB) که دارای بیشترین چگالی انرژی در بین سایر مگنت‌ها است جهش تازه ای در استفاده از موتورهای DC بدون جاروبک پدید آمد.

برخی از مشکلات موتور DC جاروبکی، در طراحی BLDC که ساختمان آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است، حذف شده‌اند. در این موتور، سوییچ دوار[3] مکانیکی یا کموتاتور با یک سوییچ الکترونیکی خارجی که با موقعیت روتور سنکرون می‌شود، جایگزین شده است.

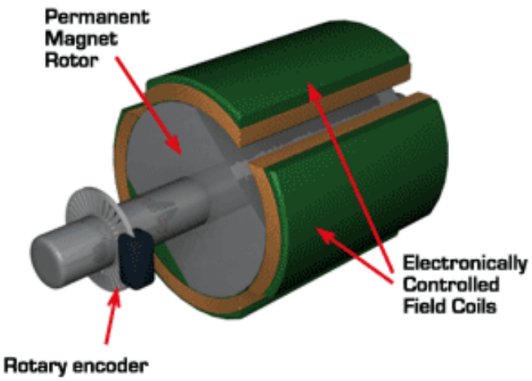
موتورهای BLDC معمولا دارای راندمان ۸۵ تا ۹۰ درصد و یا بیش‌تر هستند. راندمان تا ۹۶/۵ درصد نیز برای یک موتور BLDC گزارش شده است، در حالی که موتورهای DC جاروبکی به طور معمول دارای راندمان ۷۵ تا ۸۰ درصد می‌باشند.

موتورهای BLDC معمولا در جایی استفاده می‌شوند که در آن کنترل دقیق سرعت لازم است؛ همانند هارد دیسک کامپیوتر یا درایوهای CD و مکانیزم‌های درون محصولات اداری مانند فن‌ها، پرینترهای لیزری و فتوکپی. موتورهای DC بدون جاروبک مزایای زیادی نسبت به موتورهای معمولی دارند که برخی از آنها عبارتند از:

[1]Cumulative Compound [2]Differentially Compounded [3]Rotating Switch

بسیار خنک‌تر از موتورهای AC کار می‌کنند و این کارکرد خنک منجر به بهبود بسیاری در عمر بیرینگ‌ها می‌شود.

بدون داشتن کموتاتوری که بخواهد فرسوده شود، عمر یک موتور BLDC می‌تواند بسیار طولانی‌تر از یک موتور DC جاروبکی و دارای کموتاتور باشد.



شکل ۱۲: ساختمان موتور BLDC

کموتاسیون می‌تواند منجر به میزان زیادی نویز الکتریکی و رادیویی شود؛ بدون کموتاتور و یا جاروبک، موتور BLDC می‌تواند در دستگاه‌های حساس الکتریکی مانند تجهیزات صوتی و یا کامپیوتر استفاده شود. موتورهای BLDC از نظر آکوستیکی بسیار آرام هستند که مزیت زیادی در تجهیزاتی است که تحت تاثیر ارتعاشات قرار دارند.

سنسورهای اثر هال[1] کوچکی که کموتاسیون ایجاد می‌کنند می‌توانند یک سیگنال سرعت سنج مناسب را برای استفاده در کنترل حلقه بسته[2] همانند سروو کنترل فراهم کنند.

موتور به راحتی می‌تواند با یک ساعت داخلی یا خارجی سنکرون شود که منجر به کنترل سرعت دقیق می‌شود.

در موتورهای BLDC، بر خلاف موتورهای جاروبکی، هیچ شانسی برای جرقه وجود ندارد که این باعث مناسب شدن آن‌ها در محیط‌های دارای مواد شیمیایی فرار و سوخت می‌شود. همچنین جرقه باعث تولید اوزن می‌شود که می‌تواند در ساختمان‌های با تهویه ضعیف جمع شود و به سلامت ساکنان آسیب رساند. جدول ۳ مزایا و معایب موتور BLDC را به صورت خلاصه بیان می‌نماید.

موتورهای BLDC مدرن دارای بازه توانی از کمتر از یک وات تا چند کیلووات هستند. موتورهای BLDC بزرگ‌تر تا حدود ۱۰۰ کیلووات در وسایل نقلیه برقی به کار می‌روند. همچنین این موتورها استفاده قابل توجهی در هواپیماهای برقی مدل دارند.

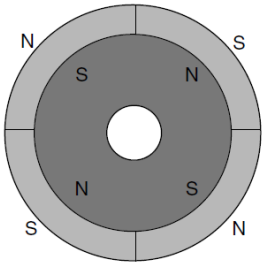
موتورهای BLDC را از نظر نحوه سوار شدن مگنت‌ها بر روی روتور می‌توان به دو دسته زیر تقسیم بندی نمود:

موتور با روتور سطحی: هر مغناطیس دائم بر روی سطح روتور نصب شده و ساخت آن را آسان می‌کند و قطب‌های اریب به آسانی آهنربا می‌شوند و دندانه‌های گشتاور حداقل می‌گردد.

جدول ۳: مزایا و معایب موتور BLDC

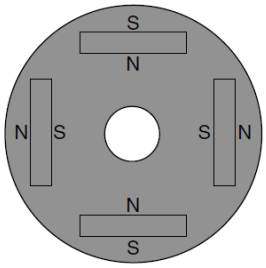
مزایا	معایب
چگالی انرژی بالا نسبت گشتاور به وزن بالا بازدهی بالا پاسخ دینامیکی سریع گشتاور راه اندازی بالا تلفات کم عدم نیاز به نگهداری قابلیت دفع گرما به خاطر فقط وجود سیم‌پیچی استاتور عملکرد بیصدا قابل استفاده در محیط‌های خطرناک و منفجر شونده	هزینه بالا کنترل پیچیده نیاز به مبدل جهت چرخش نیاز به سنسور فیدبک کارایی پایین در دماهای بالا به خاطر روتور مغناطیس دائم ریپل گشتاور خطر مغناطیس زدایی مگنت ها

این ساختار که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، برای کاربردهای سرعت پایین استفاده می‌شوند.



شکل ۱۳: موتور با روتور سطحی

موتور با روتور داخلی: مطابق شکل ۱۴ هر مغناطیس دائم در داخل روتور قرار گرفته است. این نوع موتورها یک کاندید خوب برای کاربردهای سرعت بالا است.



شکل ۱۴: موتور با روتور داخلی

همچنین در یک دسته بندی دیگر، موتورهای BLDC از نظر جهت شار میدان نیز به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند

موتور با میدان شعاعی: در این نوع موتورها شار در امتداد شعاع موتور است. موتور BLDC با این نوع روتور به صورت گسترده و در کاربردهای زیادی استفاده می‌شود.

موتور با میدان محوری: در این نوع موتورها شار عمود بر شعاع موتور است. موتور BLDC با این نوع روتور به ندرت و در کاربردهای کمی استفاده می‌شود.

همانگونه که ذکر گردید کموتاسیون در موتور BLDC به شیوه الکترونیکی انجام می‌گردد که بدین منظور چندین نوع مبدل مختلف برای

[1]Hall Effect Sensors [2]Closed-Loop Control

درایو نمودن این نوع موتور وجود دارد که فهرست آنها به شرح زیر می‌باشد.

- اینورتر منبع جریان
- اینورتر منبع ولتاژ
- اینورتر منبع جریان مبتنی بر مبدل باک
- اینورتر منبع جریان مبتنی بر مبدل کاک
- اینورتر چهار سوئیچه
- توپولوژی C-Dump
- توپولوژی مبتنی بر مبدل SEPIC
- توپولوژی مبدل با لینک DC متغییر

در جدول ۴ مشخصات موتورهای DC جاروبک‌دار با موتورهای DC بدون جاروبک مورد مقایسه قرار گرفته است.

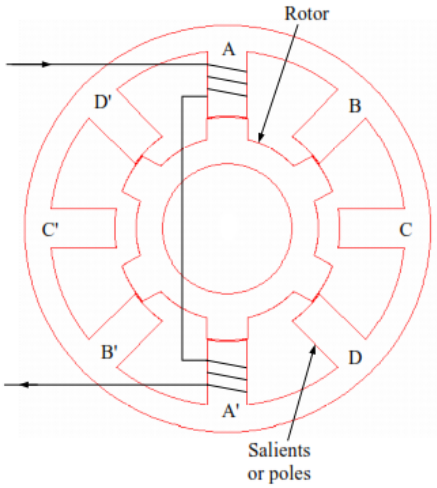
جدول ۴: مقایسه موتور DC بدون جاروبک با موتور DC جاروبک‌دار

مشخصه	موتور DC جاروبک‌دار	BLDC
مشخصه گشتاور — سرعت	تقریباً مسطح	مسطح
اینرسی روتور	زیاد است که موجب می‌شود که مشخصه‌های دینامیکی نامناسبی را از خود نشان دهد.	کم است چون که مغناطیس دائم بر روی روتور قرار دارد و لذا پاسخ دینامیکی را بهبود می‌بخشد.
توان واحد وزن	متوسط ـ چون هم روتور و هم استاتور دارای سیم‌پیچی است.	بالاـ به خاطر روتور مغناطیس دائم
بازدهی	متوسط	بالا
طول عمر	کوتاه	طولانی
گستره سرعت	محدود به خاطر جاروبک ها	گستره سرعت وسیع
قیمت	ارزان قیمت	گران قیمت
نیازمندی‌های کنترل	برای سرعت ثابت نیازی به کنترل کننده نیست فقط کنترل کننده برای سرعت متغیر نیاز است.	یک کنترل کننده همیشه مورد نیاز است تا موتور را در حال حرکت نگه دارد.
کنترل	ارزان و ساده	پیچیده و گران

۲.۴ موتور رلوکتانسی

علاقه به استفاده از موتور رلوکتانسی[1] از سال ۱۸۵۰ شروع گردید. این نوع موتورها برای عملکرد نیازمند به یک مبدل قابل کنترل هستند که بدون آن مبدل نمی توانند به صورت مستقیم با منبع سه فاز کار کنند. بنابراین برای کاربردهای سرعت ثابت، درایور این نوع موتور گرانتر از موتورهای القایی و سنکرون با روتور سیم‌پیچی شده است. یک ویژگی منحصربفرد موتور رلوکتانسی استقلال فازهای آن است که این مقاوم بودن در برابر خطای آن را تضمین می‌کند. موتور رلوکتانسی از موتورهای جذاب برای کاربردهای فضایی است و رقیب جدی موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم است. روتور این نوع موتور از آهن و استاتور آن از سیم‌پیچی تشکیل شده است (شکل ۱۵). در واقع روتور، استاتور و سنسور فیدبک، اجزای اصلی این نوع موتور را تشکیل می‌دهند.

رلوکتانس مقاومت مغناطیسی یا به عبارتی نفوذ پذیری مغناطیسی است. این پارامتر در یک مدار مغناطیسی عبارت است از نسبت نیروی محرکه مغناطیسی، به شار مغناطیسی.



شکل ۱۵: اجزای اصلی موتور رلوکتانسی

این نوع موتورها می‌توانند به صورت چند فازه کار کنند و فازهای آن از هم مستقل هستند و اگر فازی دچار خطا شود موتور حرکت را حفظ می‌کند و فقط ریپل گشتاور افزایش می‌یابد. استقلال فازها ناشی از اندوکتانس متقابل ناچیز بین فازها است. سوئیچینگ مبدل براساس موقعیت روتور و جریآنهای استاتور انجام می‌گیرد.

موتورهای رلوکتانسی انواع مختلفی دارند که زیر بیان شده و خصوصیات هر یک از آنها در جدول ۵ مقایسه گردیده اند.

- رلوکتانسی سنکرون[2]
- رلوکتانسی سوئیچ شده[3]
- رلوکتانسی پله ای[4]
- رلوکتانسی سوئیچینگ شار[5]

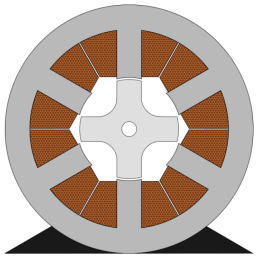
جدول ۵: مقایسه انواع موتورهای رلوکتانسی

پارامتر/نوع موتور	رلوکتانسی سنکرون	رلوکتانسی سوئیچ شده	رلوکتانسی پله ای	رلوکتانسی سوئیچینگ شار
چگالی توان	متوسط	عالی	عالی	خوب
کنترل موقعیت	خوب	عالی	خوب	خوب
ریپل گشتاور	کم	متوسط	متوسط	متوسط
مقاومت در برابر دما	عالی	عالی	متوسط	عالی
کنترل	پیچیده	پیچیده	ساده	پیچیده
مقاومت در برابر شوک	عالی	عالی	خوب	عالی
مقاومت در برابر آسیب	متوسط	عالی	متوسط	متوسط
هزینه	متوسط	متوسط	خوب	خوب

[1]Reluctance Motor [2]Synchronous reluctance [3]Switched reluctance [4]Reluctance Stepper [5]flux switching

در این میان موتور رلوکتانسی سوییچ شده به واسطه خصوصیاتی که دارد، در اکچویتورهای الکترومکانیکی از جایگاه ویژه ای برخوردار است. موتور رلوکتانسی سوئیچ شده در اواسط قرن ۱۹ معرفی گردید. اما به دلیل محدودیت برطرف نشدنی آن در آن زمان یعنی نیاز به سوئیچینگ بالا، تا قرن بیستم کمتر مورد توجه قرار گرفت. در دهه ششم قرن بیستم به خاطر پیشرفت‌های الکترونیک قدرت، موتور رلوکتانسی سوئیچ شده برای کاربردهای سرعت متغیر مورد توجه قرار گرفت. پیشرفت‌های میکروپروسسوری و تکنولوژی‌های منطقی قابل برنامه ریزی در اواخر دهه هشتم قرن بیستم، عملکرد موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شده را بیشتر بهبود داد و سپس استفاده گسترده از آنها گردید.

موتور رلوکتانسی سوییچی یا SRM، هیچ جاروبک یا آهن‌ربای دایمی ندارد و روتور آن دارای جریان الکتریکی نیست. به جای آن در اثر ناهمراستایی اندک بین قطب روی روتور با قطب استاتور گشتاور ایجاد می‌شود. روتور خود را با میدان مغناطیسی استاتور هم‌راستا می‌کند در حالی که سیم‌پیچ‌های میدان استاتور به صورت نوبتی انرژی‌دار می‌شوند که باعث چرخش میدان استاتور می‌گردد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: روتور و استاتور موتور رلوکتانسی سوییچی

شار مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم‌پیچ‌های میدان مسیر کم‌ترین رلوکتانس مغناطیسی را دنبال می‌کند. به این معنی که شار از قطب‌هایی از روتور می‌گذرد که به قطب انرژی‌دار استاتور نزدیک‌تر هستند، در نتیجه آن قطب‌های روتور را مغناطیسی و ایجاد گشتاور می‌کنند. زمانی که روتور می‌چرخد، سیم‌پیچ‌های مختلف دارای انرژی و باعث نگهداری چرخش روتور می‌شوند.

مهمترین مزایای موتور رلوکتانس سوییچ شده را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- سادگی ساختار موتور
- چگالی گشتاور بالا
- ساختار مکانیکی مقاوم
- هزینه تولید کم
- مقاوم در برابر دماهای بالا به خاطر آهنی بودن روتور
- عدم نیاز به نگهداری
- مقاوم بودن در برابر خطا به خاطر استقلال فازها
- گشتاور راه اندازی بالا
- قابل استفاده در محیط‌های خطرناک و منفجر شونده

معایب و محدودیت‌های این موتور را نیز به شرح زیر می‌توان نام برد:

- نویز آکوستیکی
- ریپل‌های گشتاور بالا : هر چقدر تعداد فازها بیشتر شود ریپل گشتاور کاهش می‌یابد ولی در مقابل هزینه موتور بالا می‌رود.
- نیاز به مبدل جهت چرخش
- نیاز به سنسور فیدبک
- وجود تلفات جریانهای گردابی به خاطر روتور آهنی

اما به طور عمده دلایل گرایش بیشتر به سمت موتورهای رلوکتانسی سوییچ شده به شرح زیر قابل بیان هستند:

۱. مقاوم بودن در برابر خطا: هر فاز بر خلاف فازهای موتورهای القایی و مغناطیس دائم یک مدار مستقل دارند. یعنی یک فاز می‌تواند دچار خطا شود، بدون اینکه برای سایر فازها مشکلی ایجاد شود. در این حالت ماکزیمم توان خروجی تا حدی کاهش پیدا خواهد کرد. اما با طراحی دست بالا یا فازهای رزرو، می‌توان در شرایط خطا نیز گشتاور نامی را ایجاد کرد.

۲. قیمت ارزان: ساختار ساده موتور رلوکتانسی سوئیچ شده ساخت آن را خیلی ارزان نموده است.

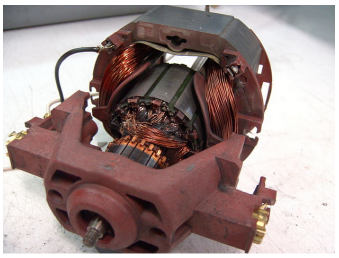
۳. ساختار الکترونیک قدرت ساده: درایو الکترونیکی آن ساده است و از اجزای استاندارد استفاده می‌کند که در تکنولوژی‌های امروزی که در درایورهای سرعت متغیر استفاده می‌شود قابل دسترسی است.

۴. چگالی توان و گشتاور بالا: موتور رلوکتانسی سوئیچ شده به صورت تئوری نسبت به هر موتور عملی امروزی گشتاور بالاتری دارد و بنابراین موجب می‌شود در کاربردهای گشتاور بالا درکوچک‌ترین ابعاد مطرح باشد.

۳.۴ موتور یونیورسال

موتور با کموتاسیون و سیم‌پیچ سری به عنوان موتور یونیورسال[1] یا جامع شناخته می‌شود، زیرا توانایی کار با هر دو برق AC یا DC را دارد. موتور یونیورسال که نمونه باز شده آن در شکل ۱۷ نشان داده شده است، می‌تواند به خوبی با برق AC کار کند چرا که جریان میدان و آرمیچر و در نتیجه میدان مغناطیسی حاصل به صورت سنکرون و با پلاریته معکوس تغییر می‌کند و از این رو نیروی مکانیکی حاصل شده باعث یک جهت ثابت چرخش می‌شود.

موتورهای یونیورسال با کارکرد در فرکانس‌های عادی خطوط برق اغلب در محدوده کم‌تر از ۱۰۰۰ وات یافت می‌شوند. موتورهای یونیورسال همچنین موتورهای کشش معمول را در راه آهن برقی تشکیل می‌دهند.



شکل ۱۷: نمونه باز شده یک موتور یونیورسال

[1] Universal Motor

مزیت موتور یونیورسال این است که تغذیه AC می‌تواند در موتورهایی به کار رود که برخی از ویژگی‌های معمول موتورهای DC را دارند، مخصوصا گشتاور راه‌اندازی بالا و طراحی بسیار جمع و جور در سرعت‌های بالا. جنبه منفی موتورهای یونیورسال مشکلات مربوط به تعمیر و نگهداری و عمر کوتاه کموتاتور است. این موتورها در دستگاه‌هایی مانند میکسر مواد غذایی و ابزارآلات قدرت که به طور مقطعی استفاده می‌شوند و اغلب نیاز به گشتاور استارت بالا دارند، استفاده می‌شود.

چندین تپ در سیم‌پیچ میدان قرار داده شده‌اند که می‌توانند کنترل غیر دقیق سرعت را انجام دهند. مخلوط‌کن‌های خانگی چند سرعته اغلب یک کویل میدان را با چند تپ و یک دیود که به صورت سری با موتور قرار دارد و باعث کارکرد موتور در نیم موج یکسو شده AC می‌شود، به کار می‌برند. موتورهای یونیورسال همچنین خود را مدیون کنترل سرعت الکترونیکی می‌دانند که آن‌ها را تبدیل به یک انتخاب ایده‌آل برای دستگاه‌هایی مانند ماشین لباسشویی خانگی می‌کند.

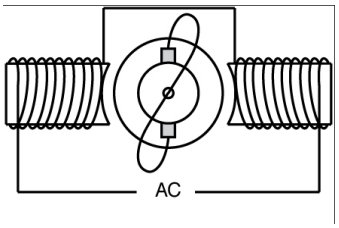
در حالی که موتور SCIM نمی‌تواند یک شفت را سریع‌تر از فرکانس خطوط برق بچرخاند، موتورهای یونیورسال می‌توانند در سرعت‌های بسیار بالاتر کار کنند. این باعث می‌شود که موتورهای یونیورسال برای لوازم خانگی از قبیل مخلوط‌کن، جاروبرقی و سشوار مفید می‌شوند که در آن‌ها سرعت بالا و وزن سبک مطلوب است. موتورهای یونیورسال همچنین در ابزارهای قابل حمل مانند دریل و اره برقی استفاده می‌شوند. بسیاری از موتورهای جارو برقی و دستگاه‌های چمن زنی بیش از ۱۰ هزار دور در دقیقه سرعت دارند، در حالی که بسیاری از خردکن‌های کوچک مشابه بیش از ۳۰ هزار دور در دقیقه سرعت دارند.

۴.۴ موتور دفعی

موتور دفعی نوعی موتور است که با جریان متناوب AC تک فاز کار می‌کند و قبلا به عنوان موتورهای کشنده در برخی تجهیزات استفاده می‌شد اما هم اکنون تقریباً با انوع موتورهای دیگر جایگزین شده است. موتور دافعه تحت موتور تک فاز است. در موتور دافعه سیم‌پیچ‌های استاتور به طور مستقیم به منبع تغذیه AC متصل شده و روتور، شبیه به یک موتور DC جاروبک‌دار، به یک مجموعه کموتاتور و جاروبک اتصال دارد. اما مانند شکل ۱۸ هیچ اتصال الکتریکی بین روتور و استاتور وجود ندارد و جریان روتور به وسیله القا تولیدمی شود.

سیم‌پیچ‌های روتور متصل به یک کموتاتور است که در تماس با یک جفت جاروبک اتصال کوتاه قرار دارد و می‌تواند موقعیت زاویه ای خود را نسبت به محور استاتور تغییر دهد. موتور می‌تواند آغاز به حرکت نموده، متوقف شود، معکوس بچرخد و سرعت نیز می‌تواند به سادگی با تغییر موقعیت زاویه ای جاروبک‌ها تغییر نماید.

اکثر موتورهای دارای کموتاتور داخلی محدودیت ولتاژ کاری حدود ۱۵۰۰ ولت دارند که دلیل آن این است که ولتاژهای بالاتر منجر به خطر قوس در سراسر کموتاتور می‌گردد. اما موتور دافعه را می‌توان در ولتاژهای بالاتر استفاده نمود، زیرا مدار روتور الکتریکی به تغذیه متصل نیست.



شکل ۱۸: مدار موتور دفعی

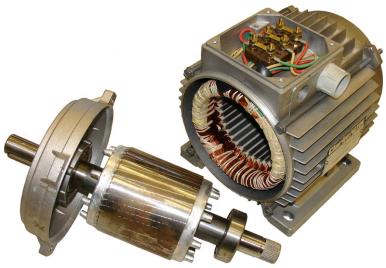
عمده ترین کاربردهای موتور دفعی شامل آسانسورهای با سرعت بالا، فن‌ها و پمپ ها، دستگاه‌های چاپ، ماشین آلات نساجی و ماشین آلات سیم‌پیچی (به دلیل تنظیم آسان سرعت و جهت به صورت دستی و بدون نیاز به مدارات پیچیده) می‌باشد.

۵.۴ موتور القایی

طراحی موتورهای القایی[1] و سنکرون AC برای کار با برق تک فاز و چند فاز سینوسی و یا شبه سینوسی همانند برق موجی شکل برای کاربردهای سرعت ثابت با برق AC شبکه و یا کاربرد سرعت متغیر برای کنترلرهای VFD بهینه شده است. موتور AC دارای دو بخش است، استاتور ثابت دارای کویل‌های مناسب برای برق AC برای تولید میدان مغناطیسی دوار و یک روتور متصل به شفت خروجی که به وسیله میدان دوار تولید گشتاور می‌کند.

یک موتور القایی، یک موتور آسنکرون AC است که در آن توان به وسیله القای الکترومغناطیسی به روتور منتقل می‌شود که بسیار شبیه به کارکرد ترانسفورماتور[2] است. یک موتور القایی شبیه به یک ترانسفورماتور دوار است که در آن استاتور یعنی بخش ثابت، در اصل سمت اولیه ترانسفورماتور و روتور به عنوان بخش دوار، سمت ثانویه آن است. موتورهای القایی چند فاز به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند.

موتورهای القایی را می‌توان به SCIMها و WRIMها تقسیم بیش‌تر کرد. SCIMها یا موتورهای القایی قفس سنجابی، دارای یک سیم‌پیچ سنگین از میله‌های جامد از جنس آلومینیوم یا مس ساخته و به وسیله رینگ‌هایی در انتهای روتور به هم متصل می‌شوند. زمانی که میله‌ها و حلقه‌ها با هم در نظر گرفته می‌شوند، بسیار شبیه به یک قفس سنجاب می‌شوند و نام آن‌ها از این‌جا می‌آید (شکل ۱۹).



شکل ۱۹: موتور قفس سنجابی

جریان‌های القا شده در این سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی روتور را فراهم می‌کنند. شکل میله‌های روتور تعیین کننده مشخصات سرعت–گشتاور است. در سرعت‌های پایین، جریان القایی در قفس سنجابی به صورت

[1] Cage And Wound Rotor Induction Motor [2] Transformer

تقریبی دارای فرکانس خط تغذیه است و تمایل دارد که در قسمت‌های خارجی قفس روتور قرار گیرد. زمانی که موتور شتاب می‌گیرد، فرکانس لغزش کم‌تر می‌شود و جریان بیش‌تری در داخل سیم‌پیچ برقرار می‌شود. با شکل دادن به میله‌ها برای تغییر مقاومت بخش‌های سیم‌پیچ در بخش‌های داخلی و خارجی قفس، به طور موثر یک مقاومت متغیر وارد مدار روتور می‌شود. با این حال بیش‌تر این موتورها دارای میله یکنواخت هستند.

در یک WRIM، سیم‌پیچ‌های روتور از دورهای زیادی از سیم عایق ساخته شده‌اند و به رینگ‌های لغزشی[1] روی شفت موتور متصل هستند (شکل ۲۰). می‌توان یک مقاومت خارجی و یا دیگر دستگاه‌های کنترلی را به مدار روتور متصل نمود. مقاومت‌ها امکان کنترل سرعت موتور را فراهم می‌کنند، هر چند که توان زیادی در مقاومت خارجی بین می‌رود. روتور سیم‌پیچی شده همانند استاتور سه فاز بوده و به صورت ۱۲۰ درجه اختلاف مکانیکی توزیع شده اند و شش سر از روتور در دسترس است که از بیرون می‌توان روتور را به صورت ستاره یا مثلث وصل کرد. یک مبدل می‌تواند از مدار روتور تغذیه شود و توان فرکانس لغزش را که در غیر این صورت تلف می‌شود، به وسیله یک اینورتر یا موتور–ژنراتور جداگانه به سیستم قدرت باز می‌گردد.

شکل ۲۰: روتور سیم‌پیچی شده با رینگ لغزشی

موتور WRIM در درجه اول برای استارت یک بار اینرسی بالا و یا باری که نیاز به یک گشتاور شروع بسیار بالا دارد، در سراسر محدوده سرعت کامل مورد استفاده قرار می‌گیرد. با انتخاب درست مقاومت‌های مورد استفاده در مقاومت ثانویه و یا رینگ لغزشی، موتور قادر به تولید گشتاور ماکزیمم در جریان تامینی نسبتا کم از سرعت صفر تا سرعت کامل می‌باشد. این نوع از موتور همچنین یک سرعت قابل کنترل تامین می‌کند.

سرعت موتور را می‌توان تغییر داد، زیرا منحنی گشتاور موتور به طور موثری با تغییر مقاومت متصل به مدار روتور تغییر می‌کند. افزایش میزان مقاومت باعث حرکت سرعت مربوط به ماکزیمم گشتاور به سمت پایین می‌شود. اگر مقاومت متصل به روتور فراتر از نقطه‌ای رود که ماکزیمم گشتاور در سرعت صفر رخ می‌دهد، گشتاور کاهش بیش‌تری می‌یابد.

هنگامی که موتور با باری استفاده می‌شود که دارای یک منحنی گشتاور است که با سرعت را افزایش می‌یابد، موتور در سرعتی کار می‌کند که در آن گشتاور موتور با گشتاور بار برابر شود. کاهش بار باعث می‌شود که سرعت موتور بالا رود و افزایش بار باعث می‌شود که سرعت موتور کاهش یابد تا زمانی که گشتاور بار و موتور برابر شود. کارکرد با این روش باعث می‌شود که تلفات لغزش که می‌تواند بسیار قابل توجه باشد، در مقاومت ثانویه از بین برود. تنظیم سرعت و راندمان خالص نیز بسیار ضعیف است. حدود ۹۰% موتورهای القایی از نوع قفس سنجابی هستند. موتور القایی قفس سنجابی ساده‌تر و اقتصادی‌تر از موتور القایی با روتور سیم‌پیچی شده است.

مقایسه موتور DC بدون جاروبک با موتور القایی سه فاز در جدول ۶ مشخصه‌های موتور DC بدون جاروبک با موتور القایی سه فاز مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۶: مقایسه BLDC با موتور القایی سه فاز

مشخصه	القایی سه فاز	BLDC
مشخصه گشتاور — سرعت	خطی است، گشتاور پایین در سرعت پایین	مسطح است، در بار نامی می‌تواند در هر سرعتی عمل کند
اینرسی روتور	بالا است که موجب می‌شود که مشخصه‌های دینامیکی نامناسبی را از خود نشان دهد.	کم است چون که مغناطیس دائم بر روی روتور قرار دارد این پاسخ دینامیکی را بهبود می‌بخشد.
توان واحد وزن	متوسط ـ چون هم روتور و هم استاتور دارای سیم‌پیچی است.	بالاـ به خاطر روتور مغناطیس دائم
بازدهی	بالا	بالاتر به خاطر عدم وجود تلفات روتور
جریان راه اندازی	تقریباً ۷ برابر جریان نامی است نیاز به مدارهای راه اندازی است.	جریان راه اندازی برابر جریان نامی
نیازمندی‌های کنترل	برای سرعت ثابت نیازی به کنترل کننده نیست فقط کنترل کننده برای سرعت متغیر نیاز است.	یک کنترل کننده همیشه مورد نیاز است تا موتور را در حال حرکت نگه دارد.

۶.۴ موتور سنکرون

موتور الکتریکی سنکرون، یک موتور AC است که وجه برجسته آن روتوری است که به وسیله سیم‌پیچ‌های آهن‌ربایی با سرعت برابر با فرکانس AC و در نتیجه میدان مغناطیسی ناشی از آن می‌چرخد. یکی دیگر از راه‌های بیان آن، این است که موتور سنکرون در شرایط کارکرد خود بدون لغزش کار می‌کند. این بر خلاف یک موتور القایی است که باید برای تولید گشتاور، لغزش داشته باشد. البته یک نوع از موتور سنکرون مانند یک موتور القایی است، به جز این که روتور توسط یک میدان DC تحریک می‌شود. رینگ‌های لغزشی و جاروبک‌ها برای هدایت جریان به روتور به کار می‌روند. قطب‌های روتور به یکدیگر متصل می‌شوند و با سرعت برابر می‌چرخند؛ به همین دلیل به آن نام موتور سنکرون داده‌اند.

برای محرکه موتورهای BLDC و موتورهای سنکرون PMSM[2] داشتن اطلاعات موقعیت روتور در هر لحظه ضروری است، با این تفاوت که در محرکه های BLDC فقط موقعیت روشن و خاموش شدن جریان سیم‌پیچ‌ها

[1] Slip Rings [2] Permanent-Magnet Synchronous Motor

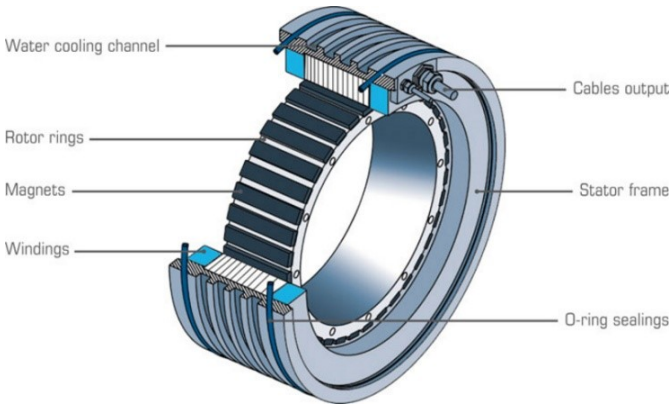
مورد نیاز است، بنابراین اغلب برای BLDCها از سنسورهای اثر هال که قیمت پایینی دارند، استفاده می‌شود. اما شکل موج جریان فاز موتور PMSM باید به شکل دقیقی کنترل گردد از این رو به انکودرهای با دقت بالا نیاز است و این موضوع باعث افزایش هزینه موتورهای PMSM در مقایسه با موتورهای BLDC شده است.

۷.۴ موتورهای سنکرون هیسترزیس

موتورهای سنکرون هیسترزیس[1] موتورهای دو فاز با خازن جابه‌جایی فاز برای یک فاز هستند. این موتورها همانند موتورهای القایی راه‌اندازی می‌شوند، روتور که یک سیلندر صاف است به طور موقت مغناطیسی می‌شود. قطب‌های توزیع شده آن، کارکرد موتورهای سنکرون هیسترزیس را مانند یک PMSM می‌کند. جنس روتور همانند یک میخ معمولی به صورتی است که مغناطیسی باقی می‌ماند ولی می‌تواند به راحتی غیرمغناطیسی شود.

۸.۴ موتور گشتاوری

موتور گشتاوری[2] که ساختمان آن در شکل ۲۱ نشان داده شده است، نوع خاصی از موتور الکتریکی است که در حالت قفل شده که جلوی حرکت روتور گرفته شده است، می‌تواند به طور نامحدود کار کند، بدون این که متحمل آسیب شود. در این حالت کاری، موتور یک گشتاور ثابت را به بار وارد می‌کند که نام این موتور نیز از همین گرفته شده است. یک کاربرد معمول موتورهای گشتاوری، موتورهای چرخش نوارهای کاست می‌باشد. در این کاربرد، موتور دارای این ویژگی است که همواره یک کشش ملایم ثابت به نوار اعمال می‌کند. این موتورها با دریافت ولتاژ بالاتر می‌توانند نوار را سریع به جلو یا عقب حرکت بدهند، بدون این که نیازی به مکانیزم‌های اضافی مانند چرخ‌دنده یا کلاچ داشته باشند.



شکل ۲۱: ساختمان و اجزای یک تورک موتور

یکی دیگر از کاربردهای رایج موتورهای گشتاوری، کنترل دریچه گاز یک موتور احتراق داخلی به کمک یک گاورنر الکترونیکی است. در این کاربرد، موتور در برابر یک فنر بازگشتی کار می‌کند و دریچه گاز را مطابق با خروجی گاورنر حرکت می‌دهد. [۱–۱۱]

[1] Hysteresis Synchronous Motors [2] Torque Motor

مراجع

[1] Hashemnia, Nasser and Asaei, Behzad. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. in *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, pp. 1–5. IEEE, 2008.

[2] Karacan, Cüneyt. Comparison of performance of switched reluctance motors, induction motors and permanent magnet dc motors. *MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY*, 2004.

[3] Baudart, François. *Design and control of fault-tolerant permanent magnet drives*. Ph.D. thesis, Ph. D. dissertation, Université de Louvain, Louvain, Belgium, 2012.

[4] Zeraoulia, Mounir, Benbouzid, Mohamed El Hachemi, and Diallo, Demba. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular technology*, 55(6):1756–1764, 2006.

[5] Sen, Paresh C. Electric motor drives and control-past, present, and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(6):562–575, 1990.

[6] Burt, Charles M, Piao, Xianshu, Gaudi, Franklin, Busch, Bryan, and Taufik, NF. Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(2):129–136, 2008.

[7] Stölting, Hans-Dieter, Kallenbach, Eberhard, and Amrhein, Wolfgang. *Handbook of fractional-horsepower drives*. Springer, 2008.

[8] Cao, Wenping, Mecrow, Barrie C, Atkinson, Glynn J, Bennett, John W, and Atkinson, David J. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (mea). *IEEE transactions on industrial electronics*, 59(9):3523–3531, 2012.

[9] Kerdsup, Burin and Fuengwarodsakul, Nisai H. Performance and cost comparison of reluctance motors used for electric bicycles. *Electrical Engineering*, 99(2):475–486, 2017.

[10] McCoy, Gilbert A and Douglass, John G. Premium efficiency motor selection and application guide–a handbook for industry. tech. rep., Washington State University Energy Program, 2014.

[11] Nanda, Gaurav and Kar, Narayan C. A survey and comparison of characteristics of motor drives used in electric vehicles. in *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 811–814. IEEE, 2006.