مقایسه موتور ترکشن های AC و DC

تهیه و تنظیم : امید محمدیان

دی ماه ۱۳۹۰

۱- انواع ماشین‌های الکتریکی

ماشین‌های الکتریکی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) ماشین‌های الکتریکی DC. ب) ماشین‌های الکتریکی AC.

۱-۱- ماشین‌های الکتریکی DC

ماشین‌های الکتریکی DC شامل دو حالت کارکرد موتوری (تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی) و ژنراتوری (تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی) می‌باشند. موتورهای DC از نظر نوع تحریک میدان استاتور و اتصال سیم‌پیچی روتور و استاتور در مجموع به سه نوع تقسیم می‌شوند:

الف) موتور با تحریک جداگانه ب) موتور با تحریک موازی. ت) موتور با تحریک سری.

موتور با تحریک موازی و مجزا از لحاظ عمل‌کرد مناسب، بسیار شبیه یکدیگر می‌باشند. هر دو برای کاربردهای با بار متغیر و سرعت ثابت مناسب می‌باشند، با این تفاوت که در حالت اتصال موازی نیاز به فقط یک منبع تغذیه خارجی وجود دارد در حالی که در حالت اتصال مجزا دو منبع خارجی مورد نیاز می‌باشد. در عوض تغییرات الکتریکی روی سیم‌پیچی‌های روتور و استاتور در موتور با تحریک مجزا تا حد زیادی مستقل از یکدیگر می‌باشند. این نوع از موتورها به علت مناسب بودن برای سرعت ثابت و هم چنین کوپل راه‌اندازی نسبتاً کم برای کشش الکتریکی مناسب نمی‌باشند. تقریباً در صنعت ریلی هر جا که صحبت از کشش DC می‌باشد از موتور DC با تحریک سری استفاده شده است. در موتور سری تمام جریان آرمیچر (روتور) از سیم‌پیچی میدان نیز عبور می‌کند. به همین دلیل باید هادی‌های سیم‌پیچی میدان (استاتور) نیز ضخیم در نظر گرفته شود تا تحمل جریان زیاد عبوری را داشته باشد و باعث تلفات گرمایی و افت ولتاژ نگردد. از جمله مشخصه‌های موتور سری این است که اگر ولتاژ خط ثابت باشد ($V(t) = cte$)، به علت افزایش بار با کاهش سرعت روتور به سمت صفر، گشتاور و جریان آرمیچر به مقدار حداکثر افزایش می‌یابند. در این حالت اگر سرعت صفر باشد (در حالت راه‌اندازی) گشتاور بسیار زیادی به آرمیچر اعمال خواهد شد. در موتور موازی گشتاور تولید شده روی محور روتور متناسب با جریان آرمیچر

می‌باشد. در حالی که در موتور سری تا حدود ۳۰ درصد جریان نامی، گشتاور با توان دوم جریان آرمیچر رابطه‌ای خطی خواهد داشت. در موتور سری اگر بار ثابت باشد، با ازدیاد ولتاژ خط، سرعت نیز افزایش می‌یابد. از نظر تئوری محدودیتی در افزایش سرعت وجود ندارد ولی در عمل حداکثر سرعت آرمیچر توسط بهم پیوستگی اجزا موتور مخصوصاً استحکام مکانیکی سیم‌پیچی‌های روتور محدود می‌گردد. حداکثر سرعت موتور DC در حدود ۲٤۰۰^{rpm} معمولاً محدود می‌گردد. برای کنترل میدان از یک مقاومت متغیر (رگولاتور) به صورت موازی با سیم‌پیچی میدان استفاده می‌شود. با کاهش این مقاومت، جریان واقعی میدان نیز کاهش می‌یابد. بنابراین قدرت میدان کم می‌شود، ولی در مجموع جریان آرمیچر به خاطر کاهش

مقاومت کل مدار، افزایش می‌یابد و توان بیشتری به موتور اعمال می‌گردد. برای متوقف کردن موتور DC از روش ترمز دینامیکی استفاده می‌گردد. در این روش دو سر سیم پیچی آرمیچر از مدار قطع شده و از طریق یک سری مقاومت مدار آن بسته می شود. چون آرمیچر هنوز دارای میدان مغناطیسی در حال گردش می‌باشد، بنابراین موتور تبدیل به ژنراتور شده و در اثر این عمل دو سر آرمیچر ولتاژی ایجاد م ی‌گردد. اگر مدار از طریق مقاومت‌ها بسته شده باشد جریانی در آنها جاری می شود، که این جریان باعث ایجاد گشتاور متقابلی در روتور می گردد و این گشتاور متقابل باعث کند شدن حرکت روتور می شود. هم چنان که دور موتور کم می شود گشتاور متقابل نیز به علت کاهش جریان کاهش می‌یابد. بنابراین اثر کند شدن اکثراً در سرعت‌های بالا واقع می گردد و در سرعت های پایین اثر چندانی نخواهد داشت . قسمت‌های اصلی یک موتور DC عبارتند از:

الف) استاتور. ب) روتور. ت) کلکتور و جاروبک‌ها.

استاتور و روتور هر دو نوع از نوع سیم پیچی شده می باشند. کلکتور جهت جمع کردن و انتقال جریان الکتریکی از بیرون به روتور یا از روتور به بیرون می باشد، که روی محور روتور قرار گرفته است . برای عمل انتقال جریان، روی کلکتور از جاروبک های لغزنده ای استفاده می شود که حامل ز غال الکتریکی می‌باشند. در ناحیه کلکتور علاوه بر ایجاد متناوب جرقه بر اثر حرکت جاروبک ها که باعث تلفات زیادی می‌گردد، همواره سایش و خوردگی زغال و کلکتور مطرح بوده و نیاز مبرم به تعمیر و نگهداری مداوم دارند.

۱-۲- ماشین‌های الکتریکی AC

ماشین‌های الکتریکی AC نیز به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) ماشین سنکرون. ب) ماشین آسنکرون (القایی). ت) ترانسفورماتور.

موتورهای سنکرون به جهت ساختار و کاربردشان در سرعت های ثابت با توان بسیار بالا مانند صنایع سیمان، برای کاربردهای کشش، مصارف چندانی ندارند ولی اخیراً برای قطارهای بسیار سریع از موتورهای سنکرون نیز استفاده شده است و حتی سرعت های بالای ٤٠٠ کیلومتر در ساعت نیز توسط آن بدست آمده است. در عوض در سال‌های اخیر (از بیش از دو دهه پیش) موتورهای آسنکرون یا القایی در صنعت رخنه کرده و در بسیاری از موارد رکورددار کاربرد موتور می باشد. شاید با اطمینان بتوان ادعا کرد که بیش از ۸۰ درصد موتورها در صنعت از نوع القایی می‌باشد. موتور القایی از دو قسمت عمده تشکیل شده است:

الف) استاتور . ب) روتور.

استاتور از نوع سیم‌پیچی شده می‌باشد، ولی روتور بنابر کاربرد موتور می تواند به صورت سیم‌پیچی شده یا از نوع قفس سنجابی باشد . موتور القایی از نظر ساختمان ساده ترین موتور می باشد و به جهت استفاده از روتور قفس سنجابی (استفاده کردن از شمش ها یا ورقه های مسی و آلومینیومی و اتصال آنها در دو سر روتور به یکدیگر) دارای استحکام مکانیکی و الکتریکی بسیار زیادی می‌باشد. به جز در محل بلبرینگ‌ها در هیچ نقطه دیگری از آن، قسمت مستهلک شونده وجود ندارد و از این جهت نیاز به تعمیر و نگهداری ندارد. در موتور القایی نیازی به کلکتور، جاروبک و زغال وجود ندارد و این از مزایای بسیار بزرگ آن می‌باشد. عمده اشکال بر سر راه استفاده گسترده از موتورهای القایی دشواری کنترل سرعت آن است . زیرا سرعت موتور القایی بستگی به فوکانس میدان الکتریکی که به استاتور آن اعمال می شود و هم چنین تعداد قطب‌های استاتور دارد . به عنوان مثال اگر فرکانس میدان ۵۰ هرتز (٦٠ هرتز) باشد و استاتور دارای دو قطب باشد، روتور با سرعتی نزدیک به ۳۰۰۰^{rpm} (۳٦۰۰^{rpm}) دوران خواهد کرد و این سرعت تا زمانی که فرکانس میدان تغییر نکند ثابت خواهد ماند. سرعت موتور القایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

که در آن f فرکانس میدان و p تعداد قطب‌های استاتور می‌باشد. البته لازم به ذکر است که سرعت موتور القایی کمی کمتر از مقدار بدست آمده از رابطه بالا می‌باشد و این به خاطر این است که گشتاور لازم بتواند در موتور ایجاد گردد. مقدار انحراف از سرعت فوق معمولاً کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در گذشته تغییر در فرکانس به قدری مشکل بود که عملاً از آن صرف نظر می‌کردند و فقط با تکنیک‌های خاصی تعداد قطب‌ها را دو برابر یا نصف می کردند و در نتیجه دو سرعت مختلف قابل دسترسی بود . در حال حاضر با توجه به امکان ساخت اینورترها با عناصر سوییچینگ سریع و با قدرت بالا براحتی می توان فرکانس و ولتاژ دو سر میدان را کنترل کرد و در سرعت های مختلف موتور را به گردش در آورد . یکی از پیشرفته ترین متدهای سوییچینگ عناصر نیمه هادی در اینورترها که در بحث کنترل دور موتور وسایل نقلیه بسیار کاربرد دارد تحت عنوان روش مدولا سیون پهنای باند معروف است و قادر است در سرعت های مختلف گشتاور را ثابت نگه دارد.

۲- مقایسه موتورهای DC سری و موتورهای القایی

موتورهای DC سری ذاتاً مناسب کشش می‌باشند و حتی کنترل دور این موتورها به راحتی توسط یک مقاومت متغیر قابل انجام است ولی موتورهای القایی بر خلاف موتورهای DC هنگامی که به عنوان یک موتور کشش و یا حتی به عنوان یک موتور با دور متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیاز به درایورهای خاصی دارند. پس در نتیجه در نگاه اول موتورهای ترکشن DC بر موتورهای ترکشن القایی ترجیح داده می‌شوند. ولی با توجه به سادگی ساختمان داخلی موتورهای AC و پیشرفت تکنولوژی در کنترل سرعت

این گونه موتورها باعث شده که استفاده از این موتورها به عنوان موتورهای کشش و یا حتی در کاربردهای دیگر به موتورهای DC ترجیح داده شوند.

۲-۱- از نظر قدرت

با توجه به اینکه روتور موتور القایی بر خلاف موتور DC که به صورت سیم پیچی می‌باشد، به صورت قفس سنجابی است. لذا تحمل جریان های زیاد برای آن ممکن است و می توان توان‌های بالاتری را از آن انتظار داشت. لذا نسبت توان بر وزن در موتور القایی بزرگ تر از موتور DC می‌باشد، این نسبت در

موتورهای AC نسبت به DC به دو برابر نیز می‌رسد، یعنی وزن یک موتور القایی معادل نصف وزن موتور DC هم توان خود می‌باشد.

۲-۲- از نظر ساخت

از نظر ساختمان استاتور، تقریباً دو نوع موتور مشابه می باشند (از نظر تعداد سیم پیچی و تعداد قطب ها معمولاً یکسان نمی‌باشند) ولی روتور موتور القایی ساختمان بسیار ساده تری دارد و ملحقاتی مانند کلکتور، جاروبک و زغال که در موتور DC لازم است روی آن قرار نمی‌گیرد. بنابراین از نظر ساختمان روتور بسیار ساده‌تر از موتور DC می‌باشد. نکته مهم دیگر این است، که برای ساخت موتورهای AC متعلق به یک کلاس خاص (در یک رنج توانی خاص) فقط کافی است، از نظر طولی اندازه موتور را تغییر دهیم و این از نظر ساخت بسیار ساده می باشد، زیرا فقط کافی است تعداد ورق ها را افزایش داد در حالی که در موتور DC نیاز به تغییرات کلی در ساختمان موتور از نظر ابعاد قطب ها، ضخامت سیم‌ها، تعداد دور سیم پیچی‌ها، قطر موتور و غیره می باشد. یکسان بودن قطر موتورهای AC باعث یکسان شدن بسیاری از قسمت های ویژه می‌شود، که از نظر ساخت بسیار مهم بوده و تنوع قطعات را کاهش می‌دهد.

۲-۳- از نظر تعمیر و نگهداری

چون موتور AC فاقد کلکتور، جاروبک و زغال الکتریکی می باشد، لذا نیاز چندانی به تعمیر و نگهداری ندارد.

۲-٤- از نظر کنترل سرعت

از لحاظ سیستم کنترل سرعت، موتور DC بسیار ساده‌تر و ارزان تر می‌باشد. زیرا به کمک یک مقاومت متغیر می‌توان سرعت آن را با تغییر ولتاژ میدان تغییر داد در حالی که برای موتور القایی نیاز به اینورتر و مدار کنترل سوئیچینگ می‌باشد که هزینه زیادی را در بر دارد. اما نکته‌ای که بسیار حائز اهمیت می‌باشد این

است که در حالت کنترل اینورتری به علت سرعت بالای عناصر سوئیچینگ (به علت الکترونیکی بودن آنها) به سرعت می توان تطبیق سرعت را انجام داد در حالی که این تطبیق سرعت در موتور DC با تاخیر همراه است. این تطبیق سریع سرعت، باعث کاهش تلفات انرژی نیز می‌گردد.

۲-۵- کنترل لغزش

در صورتی که برای هر یک از موتورهای القایی یک اینورتر مستقل اختصاص دهیم، در این صورت سرعت موتور، ولتاژ میدان و گشتاور روی روتور به صورت پیوسته، برای هر یک از موتورها قابل کنترل بوده و می‌توان به راحتی و به سرعت با مقایسه سرعت هر یک از موتورها با سرعت خطی (واقعی) قطار که عمدتاً از طریق رادار و بنابر پدیده دوپلر قابل اندازه‌گیری می‌باشد، مقدار لغزش هر یک از چرخ‌ها را بدست آورده و با کنترل زوایای سوئیچینگ المان های نیمه هادی سرعت و گشتاور چرخ ها را به بهترین نحو کنترل کرد. این امر باعث شده است تا کنترل لغزش در وسا یل نقلیه ریلی با ترکشن AC همواره بیشتر از موتورهای مشابه DC باشد و این افزایش کنترل لغزش تا بیش از ۳۰ درصد نیز می رسد. در موتورهای DC به علت این که عمل کنترل لغزش عمدتاً از طریق الکترومکانیکی انجام می‌شود و این که سیستم‌های مکانیکی به هر حال دارای زمان تاخ یری بیش از سیستم های الکترونیکی می باشند، بنابراین حتی بهترین کنترل نیز با تاخیر همراه خواهد بود و اثرات آن کاهش پیدا خواهد کرد . نکته مهم دیگر این است که در حالت وجود لغزش در یک یا چند محور بسته به مقدار لغزش، توان کل سیستم برای ممانعت از عمل لغزش کاهش پید ا می‌کند در حالی که عملاً در سیستم های AC فقط توان در محوری که لغزش می کند، کنترل می‌شود و حتی در صورت کاهش توان در یک محور، توان دیگر محورها به همان مقدار افزایش پیدا می کند تا مانع از کاهش توان کل گردد و این امر راندمان کلی لکوموتیو را افزایش می‌دهد.

۲-٦- از نظر ترمز دینامیکی

ترمز دینامیکی در موتورهای DC در سرعت‌های پایین کم اثر بوده و فقط تا یک محدوده خاصی از سرعت مفید و موثر می باشد، در حالی که در موتورهای AC این محدوده عملاً وجود نداشته و می توان حتی با ترمز دینامیکی در شیب به حالت توقف کامل ر سید زیرا طبق منحنی گشتاور - سرعت موتور القایی، حتی

در سرعت‌های نزدیک صفر نیز روی محور روتور گشتاور نسبتاً زیادی می توان وارد کرد. این امر در حالت شیب مثبت نیز صادق است و می توان به راحتی بدون استفاده کردن از ترمز معمولی قطار را در فرارها نیز به حالت توقف کلمل در آورد و از فرار احتمالی قطار در صورت بروز ایراد در سیستم ترمز جلوگیری کرد . از طرفی ترمز دینامیکی در یک محدوده‌ای از سرعت در بیش‌ترین مقدار خود بوده و کاهش نمی‌یابد و پس از آن محدوده شروع به کاهش می کند، در حالی که در موتورهای DC فقط در یک سرعت خاص حد اکثر مقدار ترمز قابل دسترسی بوده و پس از آن قدرت ترمز کاهش می یابد. در حالت DC برای تبدیل از حالت عادی به حالت ترمز دینامیکی نیاز به مدارات قدرت (توان بالا) می‌باشد، ولی این مهم در حالت AC به کمک مدارات کنترل فشار ضعیف براحتی امکان‌پذیر است.

۲-۷- از نظر تغییر جهت موتور

در حالت DC باید از کنتاکتور در مسیر جریان اصلی که جریان بسیار زیادی می باشد، برای تعویض جهت جریان میدان یا روتور استفاده کرد که نیاز به تعمیر و نگهداری دارد . در حالی که در حالت AC به کمک مدارات کنترل می‌توان تغییر جهت داد و نیازی به مدار قدرت نمی‌باشد.

۲-۸- از نظر بازده (راندمان)

در سرعت های پایین راندمان موتور DC کمتر از موتور AC می‌باشد و با افزایش سرعت این اختلاف کاهش می یابد. ولی در مجموع به علت امکان کنترل روی واگن های با کشش AC، از لحاظ راندمان کلی، این نوع نسبت به نوع با کشش DC ارجحیت زیادی دارد. (بر اساس آمار ۸۷ مترو تهران).

۲-۹- از نظر هزینه

از نظر سرمایه گذاری اولیه و پایه، هزینه سیستم AC و مدارات کنترل آن بیشتر از سیستم DC می‌باشد، ولی از نظر هزینه جاری و کلی، هزینه سیستم AC در طول عمر وسیله نقلیه کمتر از سیستم DC بوده و در مجموع بازدهی بیشتری دارد. این امر در قطارهای برقی به نحو بسیار جالبی تغییر می کند به این صورت که در حالت با ترکشن AC قیمت تمام شده ۳۰ درصد کمتر از حالت با کشش DC می‌باشد.

۲-۱۰- از نظر همگامی با تکنولوژی

با توجه به این که موتور AC وابستگی کاملی با تکنولوژی ساخت عناصر نیمه هادی و مبدل های استاتیک دارد، لذا کاربرد موتور AC نیز بر خلاف گذشته، با علم روز به جلو حرکت می کند و روز به روز به کارایی آن افزوده شده و از کمیت و حجم ملحقات آن کاسته می شود. در گذشته ساخت کنترل کننده های مختلف برای موتور AC بر مبنای تریستورها (SCR) بود. ولی از سال ۱۹۸٦ به بعد GTOها جایگزین تریستورها شدند و از نظر حجم مدارات و تعداد المان ها کاهش بسیار زیادی داشته است . این امر با گسترده تر شدن کاربرد عناصر جدیدی مانند IGBT شتاب بیشتری به خود خواهد گرفت . در صورت استفاده از GTO در اینورتر، تلفات به اندازه ٤٠ درصد کمتر از حالت تریستوری می‌باشد. (نوع IGBT استفاده شده در قطارهای خط یک متروی تهران).

۲-۱۱- از نظر گشتاور راه‌اندازی

به علت امکان کنترل پیوسته مقادیر جریان، ولتاژ و فرکانس در اینورترها، عملاً برای دو سیستم DC و AC با توان مشابه کشش حالت AC بیشتر خواهد بود.

۲-۱۲- از نظر استفاده از انرژی ترمز دینامیکی برای مصارف داخلی

در واگن‌های با کشش AC و با استفاده از تکنولوژی GTO و اینورترهای مناسب می توان انرژی تولید شده در حالت ترمز دینامیکی را به مصارف داخلی رساند و در صورتی که این انرژی زیادتر از مورد نیاز باشد، با یک کلید مقاومت دینامیکی را نیز وارد مدار کرد . البته این امر در مورد ترکشن های DC نیز امکان‌پذیر است ولی نیاز به مدارات کنترلی جداگانه‌ای دارد.

۲-۱۳- از نظر خوردگی چرخ‌ها

نتایج عملی نشان می دهد که خوردگی چرخ ها در سیستم AC نسبت به سیستم DC کمتر می‌باشد. در یک آزمایش دیده شد که پس از طی مسافت $۱۰,۰۰۰^{Km}$، مقدار سایش چرخ ها در حالت AC برابر $۰/٤٥۰^{mm}$

می‌باشد. در حالی که این مقدار در سیستم DC برابر ۰/۵٤٥mm گردید. (بر اساس آمار نقلیه ریلی متروی تهران).

۲-۱٤- از نظر صدمه به محور و خط

با توجه به این که وزن موتور DC از موتور AC هم توان بیشتر می باشد، بنابراین در هنگام نوسانات عمودی لکوموتیو، ضربات وارده از طرف موتور به محور حامل آن و هم چنین به خط زیاد بوده و عمر مفید محور و خط را کاهش خواهد داد.

نتیجه گیری: نتیجه مقایسه بین واگن های جدید با ترکشن های AC و DC:

از مقایسه بین واگن های جدید با ترکشنهای AC و DC، دیده میشود که تکنولوژی مربوط به سیستم AC بسیار پیشرفت کرده و شتاب بیشتری نیز پیدا کرده است . زیرا با وارد شدن عناصر سوئیچینگ سریع و با توان بالایی مانند GTO ها و اخیراً IGBT ها در صنعت واگن سازی امکان هر گونه کنترلی با دقت بسیار بالا میسر شده است. این امر باعث شده است، تا واگن های جدید با کشش AC دارای ضریب چسبندگی بیشتر، وزن سبکتر، قدرت بیشتر، قدرت ترمز دینامیکی بیشتر و بسیاری قابلیت های مهم دیگر باشند.