بسم الله الرحمن الرحيم

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب عباسعلی پاکزبان متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن ها استفاده شده است ، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد .

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

عباسعلی پاکزبان

امضاء

دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر

کنترل و تغییر سریع سرعت ، درموتورهای سنکرون مغناطیس دائم(*PMSM*)

نگارش : عباسعلی پاکزبان

استاد راهنما: دکتر سید زین العابدین موسوی

استاد مشاور: دکتر عباس هوشمند

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق (قدرت)

مهر ماه ۱۳۹۰

تقدیم به

تقدیم به روان پاک پدر و مادرم ، که
هنوز در پایگاه یادشان استوار و
پر شکیب ، حرارت وجودیشان را
احساس می کنم

و تقدیم به همسر گرامی و عزیزم

که در هر لحظه زندگی تکیه گاه و
امید بخش من و در طول سه سال
تحصیل همواره مشوق من بود

تشکر و قدردانی

از استاد گرانقدر جناب

آقای دکتر سید زین العابدین موسوی

که در این امر صمیمانه مرا یاری فرمودند و همچنین از جناب آقای دکتر عباس هوشمند از دانشگاه خواجه نصیر و دیگر اساتید محترم گروه برق دانشکده فنی دانشگاه شهید رجایی، نهایت تشکر را دارم .

چکیده فارسی: .....

به دلیل خصوصیات ذاتی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (***PMSM***) نظیر: چگالی توان بالا ، لختی کم ، نسبت بالای گشتاور تولیدی به اینرسی ، شتاب گیری سریع ، سادگی عملیات نگهداری ، ضریب توان و بازده مناسب تر درسالهای اخیر در بسیاری ازکاربردهای صنعتی با سرعت متغیر در گستره توان کم و متوسط نسبت به موتورهای ***DC*** و موتورهای القایی ترجیح داده شده اند.

لذا درتجهیزات بکار رفته درآزمایشگاهها ، سانتیریفیوژها ، صنایع پتروشیمی و آسانسورهای بدون موتور خانه از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم استفاده می شود.

قابلیت کنترل وتغییر سریع سرعت موتورهای آهنربای دائم سنکرون به صورت خود کنترل شونده و امکان دستیابی به عملکرد با سرعت متغیر در محدودهٔ وسیع، باعث شده تا روشهای کنترل مختلفی بسته به کاربرد موتور و به منظور استفاده مطلوب از مزایای ذاتی آنها ارائه شوند.

در این پایان نامه چندین نوع از روشهای کنترل سرعت متداول موتور سنکرون مغناطیس دائم بطور خلاصه ذکر گردیده و سه روش رایج تر و پر کاربردی تر از آنها از جمله روش کنترل معمول در صنعت برمبنای مولفه های جریان ،که روش حداکثر گشتاور به ازای جریان و ولتاژمی باشد، روش کنترل بر مبنای مولفه های ولتاژ، که در آن بجای صفحهٔ جریان در صفحهٔ مختصات ولتاژ طراحی می شود . و روش کنترل مستقیم گشتاور و شار که ، اعمال کنترل مستقیم ولتاژ مناسب به موتور براساس خطای گشتاور و خطوط میدان است ،بحث و بررسی می گردنند.

در نهایت ضمن جمع بندی و برشمردن مزایا و معایب روشهای ذکر شده ، به مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته شده و روش کنترل مستقیم گشتاور و شار با توجه به مزایای نسبی از جمله کاملتر بودن در دفع اغتشاش بار ، سرعت پاسخ دهی بسیار بالا، پایداری سیستم ، با وسعت بیشتر محدوده عملکردی سرعتهای بالا و پایین و همچنین تلفات حرارتی کمتر و در مجموع معایب کمتر نسبت به سایر روشهای کنترل سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ترجیح داده شده است.

واژگان کلیدی : موتور سنکرون مغناطیس دائم ، روشهای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم ، کنترل مستقیم گشتاور و شار

فهرست مطالب

فصل اول: آشنائی با موتور سنکرون مغناطیس دائم ۱

۱-۱) مقدمه ۱

۱-۲) موتور سنکرون مغناطیس دائم (***PMSM***) ۲

۱-۳) ساختمان موتور سنکرون مغناطیس دائم ۴

۱-۴) تقسیم بندی موتورمغناطیس دائم (موتور ***PM***) ۶

۱-۴-۱) مقایسه بین موتور ***PMSM*** و موتور ***DC*** بدون جاروبک ***BDCM*** ۷

۱-۵) مزایا و ارزیابی اقتصادی : ۷

۱-۶) کاربردهای موتورسنکرون مغناطیس دائم ۸

۱-۷) مقایسه موتورهای مغناطیس دائم (***PM***) با موتورهای القائی ۸

فصل دوم: ساختار ومدلسازی موتور سنکرون مغتاطیس دائم ۱۰

۲-۱) مقدمه ۱۰

۲-۲) تفاوت عملکردی موتور سنکرون مغناطیس دائم نوع ***SPM*** و نوع ***IPM*** ۱۱

۲-۳) معادلات ماشین در دستگاه مرجع سه فازه ***abc*** ۱۳

۲-۴) معادلات ماشین در دستگاه مرجع چرخان ۱۴

فصل سوم: بررسی روشهای کنترل و تغییر سریع سرعت در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۱۸

۳-۱) مقدمه ۱۸

۳-۲) روشهای کنترل و تغییر سریع سرعت در موتور سنکرون مغناطیس دائم بطور خلاصه ۱۹

۳-۲-۱) روش کنترلی $\boldsymbol{id = 0}$ ۱۹

۳-۲-۲) روش کنترل ضریب توان برابر یک ۲۰

۳-۲-۳) روش کنترلی بازده حداکثر ۲۰

۳-۲-۴) روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های جریان ۲۱

فهرست مطالب

۳-۲-۵) روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ ۲۱

۳-۲-۶) روش کنترل مستقیم شار و گشتاور (***DTC***) ۲۲

۳-۳) روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های جریان ۲۳

۳-۳-۱) مکان های هندسی و نواحی سرعت ۲۵

۳ -۳-۲) مزایای روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های جریان ۲۷

۳-۳-۳) معایب روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های جریان ۲۷

۳- ۴) روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ ۲۸

۳ -۴-۱) مدل ریاضی موتور بر مبنای مؤلفه های ولتاژ ۲۸

۳-۴-۲) اصول و مبانی ریاضی روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ ۲۹

۳-۴-۳) نحوه تعیین نوع مکان هندسی در سرعتهای مختلف ۳۳

۳-۴-۴) سیستم کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم. ۳۷

۳ -۴-۵) نتایج شبیه سازی در روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های ولتاژ ۴۱

۳-۴-۶) جمع بندی و نتیجه گیری روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های ولتاژ ۴۳

۳-۵) روش کنترل مستقیم شار و گشتاور (***DTC***) ۴۳

۳-۵-۱) مقدمه و معرفی روش ۴۳

۳-۵-۲) معادلات موتور در چارچوب شار استاتور ۴۵

۳-۵-۲-۱) معادله گشتاور در چارچوب شار استاتور ($x\ y$) ۴۶

۳-۵-۲-۲) معادله شار پیوندی در چارچوب شار استاتور درموتور سنکرون مغناطیس دائم ۴۷

۳-۵-۳) کنترل مستقیم شار استاتور ۴۸

۳-۵-۳-۱) کنترل مستقیم دامنه شار استاتور ۵۰

۳-۵-۳-۲)کنترل جهت گردش بردار شار استاتور، کنترل مستقیم گشتاور ۵۲

۳-۵-۴) ساختار ***DTC*** در محرکه ***PMSM*** ۵۳

۳-۵-۵) الگوریتم کاهش هارمونیک جریان (کنترل مستقیم مؤلفه صفر جریان) ۵۶

۳-۵-۶) مشکلات اعمال ***DTC*** بر روی ***PMSM*** ۵۷

فهرست مطالب

۳-۵-۷) شبیه سازی روش ***DTC*** برای یک موتور سنکرون مغناطیس دائم..... ۵۷

۳ -۵-۷-۱) مدلسازی..... ۵۷

۳-۵-۷-۲) نتایج ونمودارهای شبیه سازی..... ۷۰

۳-۵-۸) جمع بندی و نتیجه گیری روش ***DTC***..... ۷۲

فصل چهارم: تجزیه وتحلیل نتایج سه روش کنترل سرعت در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم..... ۷۴

۴-۱) مقدمه..... ۷۴

۴-۲) خلاصه وجمع بندی ۷۵

۴-۲-۱) روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های جریان ۷۵

۴-۲-۲) خلاصه وجمع بندی روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مولفه های ولتاژ..... ۷۶

۴ -۲-۳) مقایسه کنترل بر مبنای مؤلفه های ولتاژ باکنترل بر مبنای مؤلفه های جریان..... ۷۶

۴-۲-۴ خلاصه وجمع بندی روش کنترل مستقیم شار وگشتاور (***DTC***) ۷۷

۴ -۲-۵) مقایسه کنترل مستقیم شار و گشتاور (***DTC***) باکنترل بر مبنای مؤلفه های ولتاژ..... ۷۸

۴ -۳) پیشنهاد برای پژوهش های بعدی..... ۸۰

فهرست شکلها

شکل (۱-۱) موتورسنکرون مغناطیس دائم.....۳

شکل (۱-۲) شمای ساده ماشین سنکرون مغناطیس دائم.....۳

شکل (۱-۳) برشی از یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم.....۴

شکل (۱-۴) آرایشهای مختلف روتور موتورسنکرون مغناطیس دائم..... ۶

شکل (۱-۵) مقایسه موتور القائی با موتور سنکرون مغناطیس دائم..... ۹

شکل (۲-۱) موتورسنکرون مغناطیس دائم نوع ***SPM*** و ***IPM*** ۱۰

شکل (۲-۲) رتور موتور سنکرون مغناطیس دائم ۴ قطب از نوع ***SPM*** ۱۱

شکل (۲-۳) رتور موتورسنکرون مغناطیس دائم ۴ قطب از نوع ***IPM*** ۱۲

شکل (۲- ۴) مسیرهای فوران مغناطیسی.....۱۲

شکل (۲-۵) مدار معادل موتور سنکرون مغناطیس دائم.....۱۵

شکل (۲-۶) مدار معادل موتور سنکرون مغناطیس دائم با در نظر گرفتن تلفات هسته..... ۱۵

شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام سیستم کنترل موتور ***IPM*** در صفحه مختصات جریان.....۲۴

شکل (۳-۳) مکان هندسی روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ درسرعتهای پایین.....۳۴

شکل (۳-۴) مکان هندسی روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ درسرعتهای متوسط.....۳۵

شکل (۳-۵) مکان هندسی روش کنترل معمول در صنعت بر مبنای مؤلفه های ولتاژ درسرعتهای بالا..... ۳۶

شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام ساده شدۀ سیستم درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم.....۳۷

شکل (۳-۷) سیستم کنترل پیشنهادی با دو فیدبک..... ۳۸

شکل (۳-۸) الگوریتم تولید V_q^* تحت روش کنترل معمول در صنعت در مبنای مؤلفه های ولتاژ.....۳۹

شکل (۳-۹) سیستم کنترل پیشنهادی با سه فیدبک تحت کنترل بر مبنای مؤلفه های ولتاژ.....۴۰

شکل (۳-۱۰) رفتار سیستم در پاسخ به تغییرات پله ای سرعت مرجع.....۴۲

شکل (۳-۱۱) رفتار سیستم در پاسخ به تغییرات پله ای گشتاور بار..... ۴۲

شکل (۳-۱۲) فازور فضایی شار رتور و استاتور در چارچوبهای مختلف..... ۴۵

شکل (۳-۱۳) تغذیه ***PMSM*** توسط اینورتر دو سطحی ولتاژ.....۴۹

شکل (۳-۱۴) بردارهای ولتاژ مختلف متناسب با وضعیت سوئیچها..... ۵۰

شکل (۳-۱۵) کنترل حرکت راس بردار شار استاتور با استفاده از ۶ بردار ولتاژ در جهت (***CCW***)..... ۵۱

فهرست شکلها

شکل (۳-۱۶) بلوک دیاگرام محرکه ***PMSM*** با ***DTC***.....۵۳

شکل (۳-۱۷) بلوک دیاگرام محرکه ***IPM*** با ***DTC***.....۵۴

شکل (۳-۱۸) بلوک دیاگرام پایه محرکه ***PMSM*** با ***DTC***.....۵۴

شکل (۳-۱۹) بلوک دیاگرام ***Simulink*** درایو ***DTC*** برای ***PMSM***.....۵۹

شکل (۳-۲۰) جزئیات بلوک ***io Control***.....۶۰

شکل (۳-۲۱) جزئیات بلوک تخمینگر مکان تقریبی شار استاتور ۶۰

شکل (۳-۲۲) جزئیات بلوک اینورتر (***Inverter block***).....۶۱

شکل (۳-۲۳)جزئیات یک بلوک تبدیل سه فاز به دو فاز (***3 to 2 block***).....۶۲

شکل (۳-۲۴) جزئیات بلوک تخمینگر سرعت روتور (***speed Estimator block***).....۶۳

شکل (۳-۲۵) جزئیات بلوک ***PMSM***.....۶۴

شکل (۳-۲۶) جزئیات بلوک ***Vabc2qd0***.....۶۵

شکل (۳-۲۷) جزئیات بلوک ***iabc 2qd***.....۶۵

شکل (۳-۲۸) جزئیات بلوک ***qd-motor***.....۶۶

شکل (۳-۲۹) جزئیات بلوک ***d-cct***.....۶۶

شکل (۳-۳۰) جزئیات بلوک ***q-cct***.....۶۷

شکل (۳-۳۱) جزئیات بلوک رتور..... ۶۷

شکل (۳-۳۲) جزئیات بلوک ***OSC***.....۶۸

شکل (۳-۳۳) جزئیات بلوک ***qdr 2 abc***..... ۶۹

شکل (۳-۳۴) مکان هندسی راس بردار شار استاتور ۷۰

شکل (۳-۳۵) مقایسه ریپل گشتاور تولیدی و جریان فازها در دو روش.....۷۱

شکل (۳-۳۶) مقایسه سرعت پاسخ دهی گشتاور و سرعت موتور سنکرون ***PM*** در دو روش.....۷۲

فهرست جداول

جدول (۳-۱) جدول سوئیچینگ مراجعه ای (***Look up table***)..... ۵۲

جدول(۴-۱) مقایسه معیارهای بررسی سه روش کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم.....۷۹

• فصل اول: آشنائی با موتور سنکرون مغناطیس دائم [۱- ۸]

۱-۱) مقدمه

استفاده وسیع از موتورهای الکتریکی، مهندسین را بر آن می‌دارد که در طراحی، بهره برداری و کنترل موتورهای الکتریکی دقت لازم را مبذول دارند، تا چنین وسیله‌ای که حتی مورد استفاده عامی‌ترین افراد نیز قرار می‌گیرد، به سادگی مورد بهره برداری قرار گیرد و نیازهای مختلف یک جامعه را برآورده سازد. همچنین کنترل و تغییر سریع سرعت این موتورها نیزدر شرایط متفاوت و غالباً کوتاهترین زمان ممکن دارای اهمیت فوق‌العاده می‌باشد.

بدیهی است در هر طراحی لزوم رعایت محدودیتهای ابعادی و وزنی به جهت اقتصادی و محیطی نیز باید مدنظر قرار گیرد.

کاربردهای ویژه‌ای از موتورهای الکتریکی وجود دارند که بسادگی قابل طراحی و بهره برداری نیستند. لذا در کاربریهای ویژه که نتوان از موتورهای الکتریکی متعارف بهره گرفت ، به طراحی و بکارگیری موتورهای ویژه پرداخته می‌شود. معمولاً برای چنین کاربردهای خاص سیستم‌های کنترل پیشرفته‌ای مورد نیاز است تا موتور مورد نظر تحت کاربرد ویژه‌ای بهره برداری شود.

گر چه موتورهای ***DC*** به لحاظ سادگی کنترل سرعت و گشتاور دارای توانائی‌های در خور توجه می‌باشد ، اما محدودیتهاییی مانند پیچیدگی ساختار و ایجاد جرقه در جاروبکها از عوامل بازدارنده در بکارگیری آنها در همه شرایط محیطی می‌باشد.

با بهره گیری از موتورهای القائی می‌توان مشکلات موتورهای ***DC*** را تا حدی کاهش داد. ساختمان این موتورها ساده‌تر بوده و نگهداری از آنها راحت‌تر است. اما دشواری کنترلی این نوع موتورها را بایستی در نظر داشت.

موتورهای سنکرون هم دارای سرعت ثابت متأثر از فرکانس شبکه یا منبع تغذیه می‌باشند و مزایای سادگی موتورهای القائی را نداشته و تنظیم سرعت در آنها را می‌توان به کمک تغییر فرکانس انجام داد.

موتورهای سنکرون با آهنربای دائم (***PMSM***) [1] که در حقیقت یک موتور سنکرون معمولی است که در آن به جای تحریک سیم پیچی شده رتور، جاروبکها و حلقه‌های لغزان، از آهنربای دائم استفاده شده است.

درسالهای اخیر به دلیل خصوصیات ذاتی نظیر: چگالی شار بالا در فاصله هوایی ، نسبت توان به وزن بالا، لختی کم، نسبت بالای گشتاور تولیدی به ممان اینرسی محور رتور، شتاب گیری سریع، گستره وسیع سرعت، ظرفیت گشتاور بالا، سادگی، عملیات نگهداری، ضریب توان و بازده مناسب‌تر نسبت به موتورهای ***DC*** و موتورهای القایی در بسیاری از کاربردهای صنعتی باسرعت متغیر در گستره توان کم و متوسط با رفتار قابل قبول ترجیح داده شده‌اند. و در شرایط کار با نهایت کارایی موتور مانند تجهیزات آزمایشگاهی، سانتیریفیوژها ، صنایع پتروشیمی و کنترل موقعیت و کاربردهای روباتیک از موتورهای ***PMSM*** استفاده می‌شود. از این نوع موتورها تا توان نامی ***1MW*** تاکنون ساخته شده‌اند که می‌توان آنها را در زمینه‌های تولید انرژی نیز بکار برد.[۳]

۱-۲) موتور سنکرون مغناطیس دائم (*PMSM*)

کنترل سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم و خصوصیات ذاتی آنها ، موجب استفاده روز افزون آنها در صنایع مختلف گردیده است. به عنوان مثال، در سال۱۹۹۰ و ۱۹۹۴ موریموتو و همکارانش [۷ و۸] ، بکارگیری موتورسنکرون مغناطیس دائم را جهت بهبود عملکرد راه اندازها بکمک بهینه کردن مقدار تلفات الکتریکی توصیه نمودند. بوس [۹] در سال ۲۰۰۲ انواع مختلف موتورهای سنکرون مغناطیس دائم را با موتورهای القائی مقایسه کرد و معادلات مربوط به موتور ***PM*** از نوع قطب برجسته را بدست آورد. در سال ۲۰۰۴ ، جیان زین و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش کنترل مدولار توانستند سرعت اینگونه موتورها را کنترل کنند.

موتور سنکرون مغناطیس دائم در حقیقت یک موتور سنکرون معمولی است شکل(۱-۲) که در آن به جای تحریک سیم پیچی شده رتور، جاروبکها و حلقه‌های لغزان، از آهنربای دائم استفاده شده است.

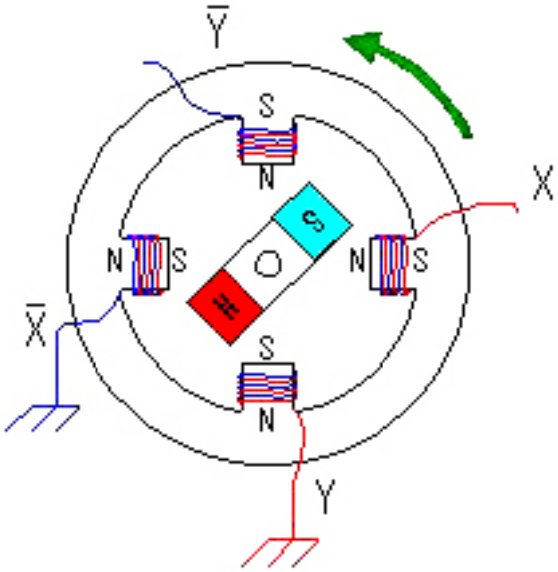
در نتیجه از نظر تعمیر، نگهداری و میزان استهلاک، در موقعیت بهتری نسبت به ماشینهای القائی و ***DC*** قرار می‌گیرند و همچنین تلفات مسی در هادیهای تحریک رتور حذف شده و لذا باعث افزایش راندمان ماشین می‌گردد و نیز بدلیل محدود شدن تلفات به مس و آهن استاتور ، فرایند خنک سازی از طریق بدنه استاتور آسانتر صورت می‌پذیرد بنابراین افزایش راندمان و کوچک‌تر سازی حجم ماشین را امکان پذیر می‌سازد. شکل(۱-۳)

1- Permanent Magnet Synchronous Motor

شکل (۱-۱) موتورسنکرون مغناطیس دائم.

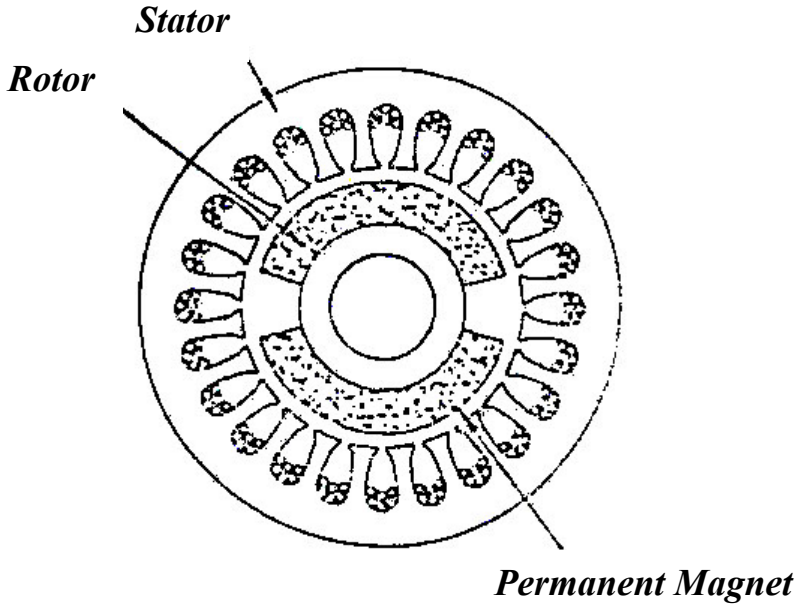
از دیگر مزایای بکارگیری مغناطیس‌های دائم ، تغییرات گستردهٔ مشخصه ماشین در یک اندازه معین بتوسط تغییرات در نوع مغناطیسها و ترتیب قرارگیری آنها می‌باشد.

این موتورها از قدرتهای کم تا قدرتهای زیاد و سرعتهای تا ***6000*** دور بر دقیقه، ساخته می‌شوند. از این نوع موتورها تا توان نامی ***1MW*** تاکنون ساخته شده‌اند که می‌توان آنها را در زمینه‌های تولید انرژی نیز بکار برد. بطور مثال موتوری با توان ***1MW*** به عنوان محرکه پیش راننده یک کشتی بکار گرفته شده است. [۳]



شکل (۱-۲) شمای ساده ماشین سنکرون مغناطیس دائم.

استاتور موتور سنکرون مغناطیس دائم همانند موتورهای القائی است و نیروی محرکه مورد نیاز آن، سینوسی می‌باشد، همانطور یکه جریان استاتور در اینگونه موتورها باید سینوسی باشد تا به گشتاور یکنواختی در اینگونه موتورها دست یابیم. برشی از سطح مقطع یک موتور سنکرون مغناطیس دائم دو قطبه در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) برشی از یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم.

۱-۳) ساختمان موتور سنکرون مغناطیس دائم [۳]

همانطور که از شکل (۱-۴)مشخص است آهنربای دائم روی رتور قرارگرفته است تا نیاز به جاروبک و حلقه لغزان مرتفع گردد.

اجزاء اصلی ساختمان یک ماشین سنکرون مغناطیس عبارتند از :

۱ -استاتور شامل دو بخش است :

الف -ورقه‌های استاتور که همانند موتورهای القائی و سنکرون از فولاد مغناطیسی نرم تهیه می‌شود

ب-سیم پیچی استاتور که بصورت سه فاز یا تکفاز و معمولاً دو لایه (با توجه به مزایای دو طبقه) و بطور متناوب (یک در میان) روی هم بسته می‌شوند. کلافهای خاص هر گروه به یکدیگر وصل می‌شوند تا گروه فاز را تشکیل دهند.

به هنگام سیم پیچی استاتور به منظور کاهش هارمونیک ولتاژ، سیم بندی معمولاً بصورت گام کسری اجرا می‌شود. در سیم بندی موتورهای مغناطیس دائم کوچک بجای روش معمول سیم پیچی، از سیم پیچی سلونوئیدی استفاده می‌شود.

۲–فاصله هوایی :

فاصله هوایی یک مشخصه ویژه برای موتورهای دوار است که در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، تعیین کننده نقطه کار مغناطیس دائم در حالت بی باری ماشین است. طول فاصله هوایی در طراحی مکانیکی و ساختمانی موتور مؤثر است. اگر طول فاصله هوایی زیاد باشد، بدلیل برابر شدن اندوکتانس مغناطیس کننده محور d با محور q ($L_{md} = L_{mq} = L_m$) اثرات لغزش قابل صرفنظر می‌شود و همچنین بدلیل بزرگ بودن فاصله هوایی ، اندوکتانس سنکرون ($L_s = L_{sl} = L_m$) نیز کوچک بوده و لذا اثرات عکس‌العمل آرمیچر ناچیز می‌گردد و یک نتیجه دیگر بزرگ شدن فاصله هوایی ، کوچک شدن ثابت زمانی الکتریکی سیم بندی استاتور است که در مجموع این عوامل باعث کاهش قیمت ساخت موتور و تلفات هوا می‌شود. با این وجود با افزایش فاصله هوایی نیاز به آهنربای دائم با نیروی مغناطیسی قویتر است زیرا با افزایش فاصله هوایی، کاهش چگالی فوران در فاصله هوایی اجتناب ناپذیر می‌باشد.

۳– رتور:

به منظور حصول به ثابت زمانی مکانیکی کوچک بایستی رتور را با نسبت بالای طول به قطر (L / D) ساخت. رتور در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به چهار گروه تقسیم می‌شوند :

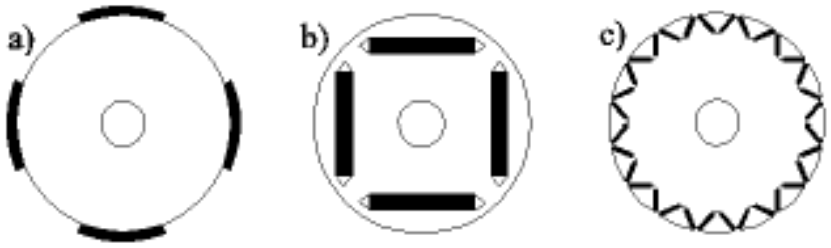
الف–موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای روی سطح (***SPM***)[1] که آهنربای دائم روی سطح رتور قرار می‌گیرد وفوران بصورت شعاعی است. برای نصب آهنربا، روی سطح رتور از چسبهای اپوکسی استفاده می‌شود.

ب–موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای داخلی (***IPM***) [2] که آهنربای دائم داخل رتور قرار گرفته و فوران بصورت شعاعی است. ساخت ***IPM*** ها مشکلتر است.

ج– موتور سنکرون مغناطیس دائم قطب چنگالی [3] که در این نوع ماشین دیسک‌هایی که در طول محورشان مغناطیس شده‌اند، کنار هم پیچیده می‌شوند تا یک حالت چنگالی شکل بوجود آید.

د– موتور سنکرون مغناطیس دائم متقاطع یا اریب (***TPM***) [4] که در این نوع ماشین آهنربای دائم بین آهن نرم قرارگرفته و فوران بصورت محیطی است . در شکل (۱–۵) سه شکل آرایش رایج‌تر در ساخت رتور موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نشان داده شده است.

1- Surface PM
2- Interior PM
3- Claw-pole PM
4- Transverse PM



شکل (۱-۴) آرایشهای مختلف رتور موتورسنکرون مغناطیس دائم ***SPM (a*** ***IPM (b*** ***TPM (c***

۱-٤) تقسیم بندی موتور مغناطیس دائم (موتور *PM*) [۴ و ۶]

بطورکلی می‌توان گفت که دو نوع موتور مغناطیس دائم جریان متناوب در صنعت به کار می‌رود. یک نوع از آنها موتور سنکرون مغناطیس دائم ***PMSM***[1] که قبلاً توضیح داده شد و نوع دوم موتور ***DC*** بدون جاروبک ***(BDCM)*** [2] می‌باشد.

در موتور نوع ***BDCM*** که مشخصه‌های یک ماشین ***DC*** را دارد، ساختمانی شبیه به موتورهای ***AC*** سنکرون دارد و در آنها از جاروبک و کموتاتور استفاده نشده است می‌دانیم که در یک موتور ***DC*** معمولی، جریان ***DC*** بوسیله کموتاتور و جاروبک به جریان مربعی با فرکانس متغیر تبدیل می‌شود. با اعمال این جریان مربعی به استاتور موتور***BDCM*** و استفاده از میدان آهنربائی در رتور، یک موتور با مشخصات قبلی ولی بدون در گیری مکانیکی بدست می‌آید که موتور ***DC*** بدون جاروبک نامیده می‌شود.

وظیفه کموتاتور و جاروبک در آنها به عهده کلیدهای الکترونیکی می‌باشد. موتورهای ***DC*** بدون جاروبک مانند موتورهای ***AC*** سنکرون، دارای میدان مغناطیسی بر روی رتور می‌باشند. ولی از نظر تعیین وضعیت رتور با موتورهای ***AC*** تفاوت دارند و بدین منظور در آنها از کلیدهای الکترونیکی که سیگنال‌های تعیین وضعیت را تولید می‌نمایند ، استفاده می‌شود و از مزیت عمر زیاد و سادگی تعمیرات و نگهداری در مقایسه با موتورهای متداول برخوردارند. موتورهای بدون جاروبک دارای استحکام بیشتر، گشتاور بیشتر و محدوده سرعت وسیع‌تری، نیز هستند. از کاربردهای این نوع موتورها می‌توان در سیستم‌های اطلاعاتی ابزار دقیق نام برد.

---

1 - Permanent Magnet Synchronous Motor
2- Brushless DC Motor

۱-۴-۱) مقایسه بین موتور سنکرون مغناطیس دائم ***PMSM*** و موتور ***DC*** بدون جاروبک ***BDCM***

۱- هر دو دارای رتور مغناطیس دائم هستند ولی شکل آهنربا و نیز ترتیب سیم پیچی استاتور آنها با هم متفاوت است.

۲- برای تولید گشتاور یکنواخت در موتور ***PMSM*** نیاز به جریان استاتور سینوسی است ولی در موتور ***BDCM*** نیاز به جریان استاتور مربعی می‌باشد.

۳- سیستم کنترلر برای هر دو نوع موتور از نظر کلی مشابه است.

۴- موتور ***PMSM*** دارای نیروی ضد محرکه سینوسی می‌باشد ولی موتور ***BDCM*** دارای نیروی ضد محرکه ذوزنقه‌ای است.

۱-۵) مزایا و ارزیابی اقتصادی :

موتور سنکرون مغناطیس دائم به علت داشتن راندمان بالا، ضریب قدرت مناسب و حساسیت کمتر نسبت به تغییرات ولتاژ و فرکانس تغذیه جهت کاربردهای صنعتی نظیر محرک فن‌ها، پمپها و کمپرسورها، بسیار مطلوب می‌باشند. تلفات رتور اینگونه ماشینها کمتر از تلفات رتور ماشینهای القائی و سنکرون معمولی است و بعلت راندمان بالاتری که نسبت به موتورهای مشابه دارند پس انداز قیمت کارکرد ، بیشتر از اختلاف قیمت اولیه خواهد داشت. بر طبق آماری که کمپانی جنرال الکتریک آورده است به ازای ده هزار ساعت کار (۲/۵ سال)، اختلاف قیمت اولیه یک موتور سنکرون مغناطیس دائم و یک موتور القائی، جبران می‌شود.

در همین آمار آمده است که سالیانه ***6.6E11 Kwh*** انرژی توسط موتورهای القائی تبدیل می‌شود که کل تلفات این پروسه در سال، حدود ***8.3 E10 Kw h*** خواهد بود. بنابراین اگر بجای موتورهای القائی از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم استفاده شود، هر سال ***2.8 E10 Kwh*** صرفه‌جوئی خواهد شد که تقریباً معادل ***20*** میلیون بشکه نفت در سال است.

۱-٦) کاربردهای موتورسنکرون مغناطیس دائم [۳ و ۷]

از کاربردهای موتورسنکرون مغناطیس دائم، می‌توان به کاربرد در علم پزشکی، هوا فضا، ماشین ابزارهای دقیق، صنعت نساجی و شیشه سازی، محرک‌های کنترل سرعت، سانتریفیوژها و صنایع پتروشیمی اشاره کرد. در صنایع نساجی و شیشه سازی معمولاً سرعت ماشین‌های مختلف باید دقیقاً یکسان و ثابت باشند تا مشخصات تولید نظیر ضخامت پارچه یا شیشه یکسان باشد.

بنابراین موتورهای ***DC*** معمولی و موتورهای القایی جوابگوی چنین کاربردهایی نمی‌باشند و ناچاراً باید از موتور سنکرون مخصوص موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده کرد.

سرعت زیاد، درجه اعتماد بالا و تعمیر و نگهداری پایین دلایل کاربردهای وسیع موتورسنکرون مغناطیس دائم در صنایع پزشکی و هوا فضا می‌باشند. علاوه بر کاربردهای صنعتی موتور سنکرون مغناطیس دائم، اینگونه موتورها در صنایع نظامی و صنایع مخابراتی نیز کاربرد زیادی پیدا کرده است.

در صنایع نظامی موتورسنکرون مغناطیس دائم، بعنوان یک سرو موتور ***AC*** در سیستم‌های کنترلی پیشرفته بکار می‌رود و در اغلب سیستم‌های مخابرات، رادارها و آنتن‌ها، موتور سنکرون مغناطیس دائم، بعنوان کنترل کننده موقعیت بکارمی رود. با توجه به فیدبک موقعیت رتور در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، سنکرونیزاسیون بسهولت انجام می‌گیرد. و می‌توان سیستم را بگو نه ای طراحی کرد، که دارای عملکرد خود راه اندازی باشد. لازم به ذکر است که فیدبک موقعیت در موتور سنکرون مغناطیس دائم در هر لحظه لازم و ضروری است. در سیستم آسانسور بدون موتورخانه[1] که از تکنولوژی موتورهای سنکرون با مغناطیس دائم بهره می‌برند ، مکانیزم‌های کاهنده سرعت (گیربکس) را حذف می‌کنند که این امر موجب کاهش وزن و اندازه موتور کششی می‌شود. با این راه حل موتور در داخل چاهک قرار می‌گیرد و در نتیجه نیازی به موتورخانه نیست و انعطاف پذیری ساختمان در زمینه معماری بیشتر خواهد شد و همچنین جمع و جور بودن و عدم نیاز به روغن کاری و نیروی گردنده بالا در سرعت پایین از مزایای این سیستم می‌باشد.

۱-۷) مقایسه موتورهای مغناطیس دائم (***PM***) با موتورهای القائی [۵ و ۶]

اگر گشتاور خروجی یکنواختی مورد نظر باشد، می‌توان از موتورهای القائی یا موتورهای مغناطیس دائم بهره برد. اما این سوال می‌ماند که استفاده از موتورهای القائی بهتر است یا استفاده از موتورهای ***PM*** ؟

۱-۷-۱) الف -مزایای موتورهای ***PM*** نسبت به موتورهای القائی عبارتند از :

۱-ماشین ***PM*** در مقایسه با ماشین‌های القائی دارای اینرسی کمتری هستند و همین دلیل داشتن پاسخ سریع ***PM*** ها می‌باشد.

1- ROOMLESS

۲-ماشین‌های ***PM*** دارای راندمان بالاتری هستند زیرا اولاً تلفات رتور در آهنربای دائم بسیار کم است و ثانیاً نیاز به جریان مغناطیس کنندگی ندارند.

۳-برای دو ماشین ***PM*** و القائی که دارای قدرت خروجی یکسان باشند. ماشین ***PM*** نیاز به سیستم الکترونیکی با جریان کمتری دارد چون اولاً جریان مغناطیس کننده، نمی‌خواهد و ثانیاً راندمان بالاتری دارد.

۴-برای یک قدرت خاص، ماشین***PM*** از نظر اندازه و وزن کوچکتر از ماشین القائی است. به عبارت دیگر نسبت قدرت به حجم یا قدرت به وزن ماشین ***PM*** بالاتر است.

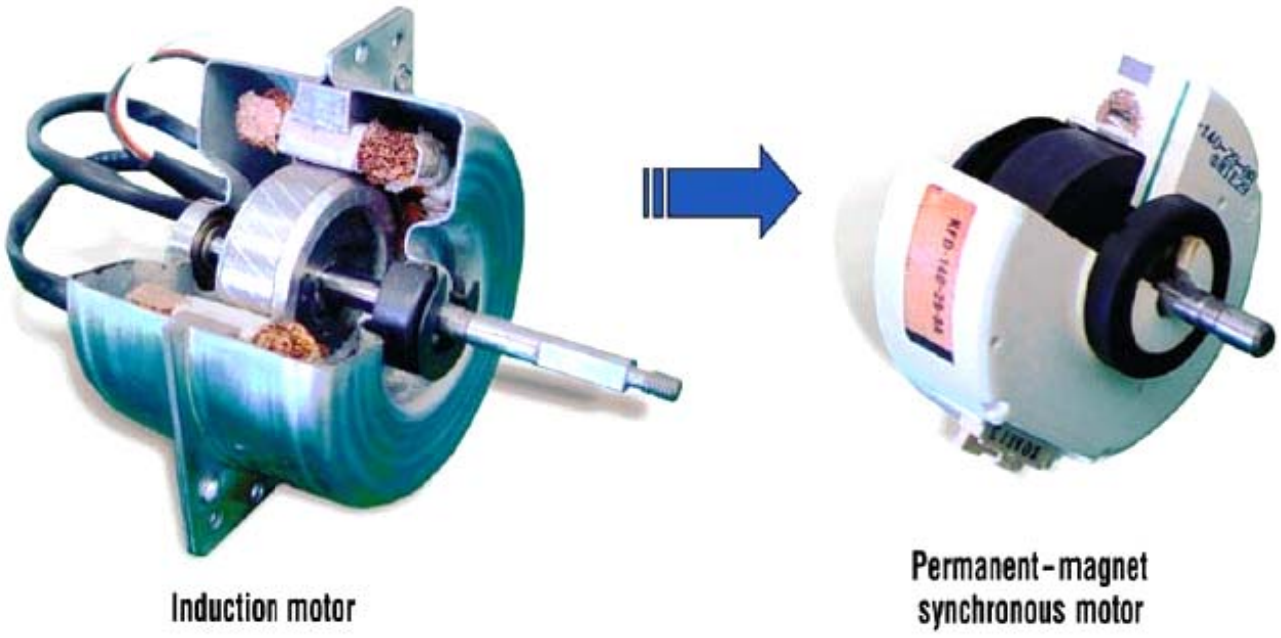
۱- ۷ -۲) ب-معایب موتورهای ***PM*** نسبت به موتورهای القائی عبارتند از :

۲- ناحیه قدرت ثابت در موتورهای القائی، بزرگتر است و در این ناحیه عمل کنترل راحت‌تر از موتورهای ***PM*** انجام می‌گیرد.

۳- قیمت موتورهای ***PM*** گرانتر است.

۴- درجه حرارت مجاز کارکرد برای موتورهای ***PM*** کمتر از موتورهای القائی است.

در مجموع بر اساس اعلام کمپانی جنرال الکتریک، همانطورکه در شکل (۱- ۶) ملاحظه می‌شود، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نسبت به موتورهای القائی ۳۰ درصد کوچکتر و ۱۰ الی ۱۵ درصد راندمان بیشتری دارند. و پیشرفتهای جدید در تولید، بدون بکارگیری زیاد مغناطیس دائم در رتور، امکان پذیر نیست.



شکل (۱- ۵) مقایسه موتور القائی با موتور سنکرون مغناطیس دائم.