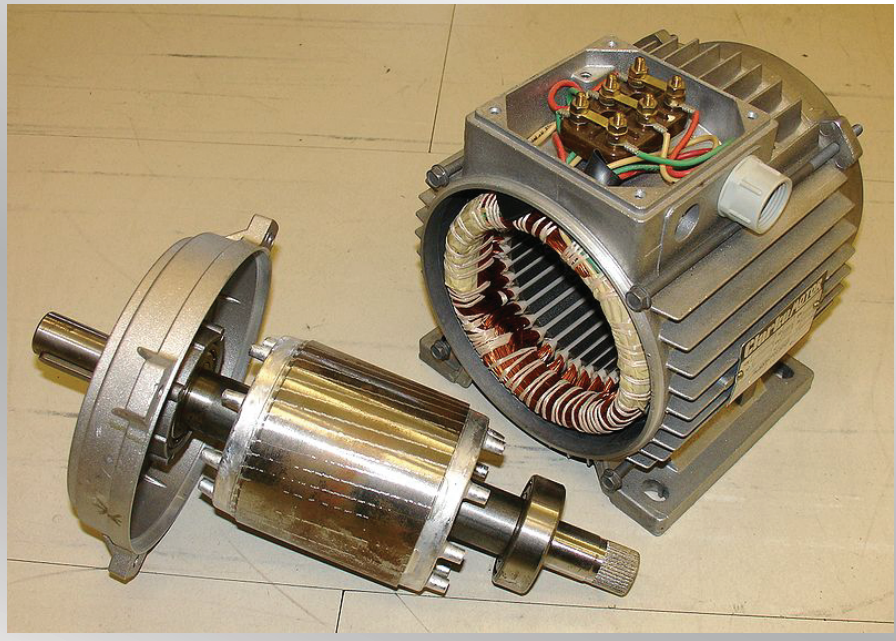
۳
ماشینهای القایی سه فاز



۱- مقدمه
۲- ساختمان ماشین‌های القایی
۲-۱- استاتور
۲-۲- سیم پیچ
۲-۳- رتور
۳- اساس کار موتورهای القایی
۴- پدیده میدان دوار در ماشینهای القایی
۵- تغییر جهت چرخشی میدان دوار
۶- عوامل موثر در سرعت میدان دوار
۷- نحوه ایجاد چرخش رتور در موتورهای القایی
۸- موتورهای القایی از نوع رتور قفس سنجابی
۹- لغزش در ماشین‌های القایی
۱۰- رفتار ماشین‌های القایی در لغزش های مختلف
۱۰-۱- لغزش در زمان راه‌اندازی
۱۰-۲- لغزش در سرعت سنکرون
۱۰-۳- لغزش موتور در حین کار
۱۰-۴- لغزش منفی
۱۰-۵- لغزشهای بزرگتر از واحد (بیش از ۱۰۰٪)
۱۱- کمیتهای الکتریکی رتور
۱۱-۱- فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور
۱۱-۲- راکتانس رتور
۱۱-۳- مقاومت مدار رتور
۱۱-۴- ولتاژ رتور
۱۱-۵- امپدانس رتور
۱۱-۶- جریان رتور
۱۱-۷- ضریب قدرت مدار رتور
۱۲- گشتاور ماشین‌های القایی
۱۳- ناحیه بندی ماشین القایی بر اساس مشخصه گشتاور-دور
۱۴- مشخصه گشتاور- دور موتور القایی
۱۵- مشخصه ضریب قدرت- سرعت موتور القایی

۱۶- تأثیر فاصله هوایی میان رتور و استاتور بر مقدار ضریب قدرت موتور
۱۷- مشخصه جریان – دور موتور القایی
۱۸- تحلیل رفتار موتور القایی در بارهای مختلف "مشخصه‌های خروجی"
۱۹- روشهای راه‌اندازی موتورهای القایی
۱۹-۱- راه‌اندازی مستقیم DOL
۱۹-۲- راه‌اندازی ستاره – مثلث
۱۹-۳- راه‌اندازی با اتو ترانسفورماتور
۱۹-۴- راه‌اندازی با تجهیزات الکترونیک قدرت-راه‌اندازی نرم
۱۹-۵- روش راه‌اندازی رتوری
۲۰- تغییر سرعت موتورهای القایی
۲۰-۱- کنترل هم زمان فرکانس و ولتاژ
۲۰-۲- تغییر قطبهای سیم‌بندی
۲۰-۳- موتور دالاندر
۲۰-۴- قراردادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل استاتور
۲۰-۵- تغییر مقدار لغزش
۲۱- ترمز موتورهای القایی
۲۱-۱- ترمز جریان مخالف
۲۱-۲- ترمز با جریان مستقیم
۲۱-۳- ترمز مولدی
۲۱-۴- ترمز الکترومکانیکی
۲۲- رفتار مولدی ماشین القایی
۲۲-۱- اتصال مولد القایی به شبکه برق
۲۲-۲- استفاده از خازن (مولد القایی در حالت منفرد)
۲۳- تلفات و راندمان
۲۴- مقایسه موتورهای رتور قفسی و رتور سیم‌پیچی
۲۵- پلاک خوانی موتورهای القایی و استفاده از برگه مشخصات فنی

۳

مقدمه

موتورهای القایی سه فاز، پرکاربردترین موتورهایی هستند که برای به حرکت در آوردن ، چرخهای صنعت از آنها استفاده می‌شود. طراحی ساده و مستحکم , قیمت ارزان , هزینه نگه داری پایین و اتصال آسان به منبع سه فاز امتیازات اصلی موتورهای القایی هستند. با اینکه ساختمان موتورهای القایی سه فاز به مراتب ساده تر از موتورهای DC است. ولی مکانیزم عملکرد، کنترل سرعت و گشتاور در این نوع موتورها نیازمند درک عمیقتری از مفاهیم الکتریسته و مغناطیس می‌باشد.

این نوع موتور در قدرتهای متنوع (کسری از کیلو وات تا چند ده مگا وات) ساخته و بهره برداری می‌شوند.

شکل ۱ – انواع موتورهای الکتریکی وکاربردآن در صنعت

۲- ساختمان ماشین‌های القایی

بطور کلی هر ماشـــین القایی (موتور یا مولد القایی) از دو بخش اســـتاتور و رتور تشکیل شده است. استاتور بخش ثابت و رتور بخش متحرک ماشین می‌باشد.

در شکل(۲) ســـاختمان ماشـــین القایی نشان داده شده است.

هر یک از اجزای ماشـــین بر حســـب عملکردشان بر روی یکـــی از این دو بخش قـــرار می گیرند. مثلا پروانه خنک کننده روی رتور نصب می‌شود.

۲-۱- استاتور

استاتور ماشین القایی ، شامل بدنه ، هسته مغناطیسی ، سیم پیچها و یاتاقانهای سر و ته می‌باشد.[۱]

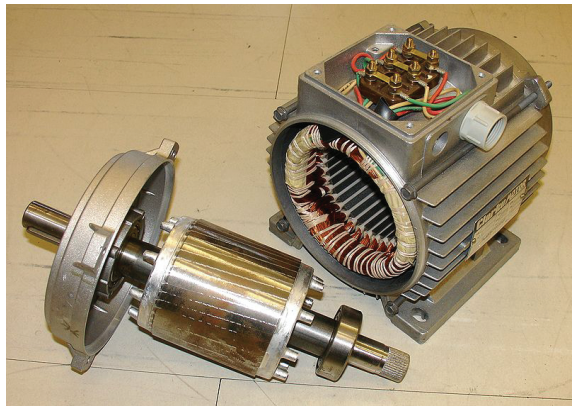
هســـته اســـتاتور ، مجموعه ای از ورقهـــای فولادی اســـت که دارای شیار در سطح داخلی آن مطابق شکل (۳-الف) می‌باشد پس از قرار گرفتن در کنار هم تشکیل یک حجم استوانه ای مطابق شکل (۳-ب) می‌دهد.

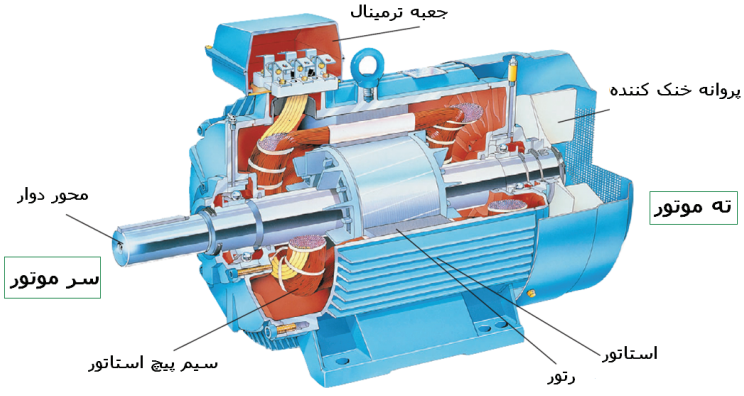
سیم پیچهای سه فاز ماشین القایی در داخل همین شیارها قرار می‌گیرند.

در فصل ۱ با پدیده هیســـترزیس و فوکو آشنا شدید. در ماشـــینهای القایی نیز به دلیل تلفات هیسترزیس، جنس هســـته باید از فولاد مغناطیســـی با پسماند کم[۲] انتخاب شـــود تا تلفات هیســـترزیس ماشین به حداقل ممکن برســـد. همچنین برای کاهش تلفات فوکو نیز از روش ورق ،ورق کردن هسته بهره می گیرند.

ابعاد هســـته اســـتاتور بگونه ای است که براحتی در بدنـــه ی فولادی، چدنی یا آلومینیومی اســـتاتور محکم می‌شود این بدنه بصورت پره دار ساخته می‌شود تا برای تهویه بهتر، سطح تماس بیشتری با هوای محیط (سطح بیرونی) خود داشته باشد.

وظیفه ی بدنه ، پوشش نهایی ماشین القایی می‌باشد که هســـته و ســـیم پیچها را در خود جای داده است و ماشـــین را در برابر ورود اجسام خارجی به آن محافظت می‌کند. همچنین برای اتصال سیم پیچ ها روی بدنه‌ی





شکل ۲ - اجزای تشکیل دهنده یک موتور القایی

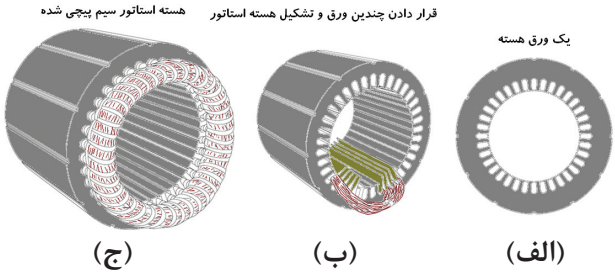
۱) درصورت نیاز ممکن است به منظور خنک سازی ماشین القایی و یا حفاظت آن از لوازم بیشتری نظیر فن ،هیتر یا گرم کن ، سنسور لرزش ، مقاومتهای متغیر با دما و ... در آن استفاده شود.

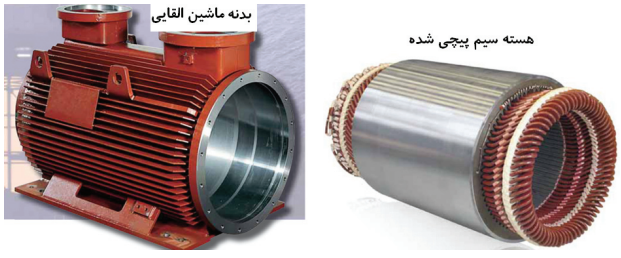
۲) فولاد سیلیس دار

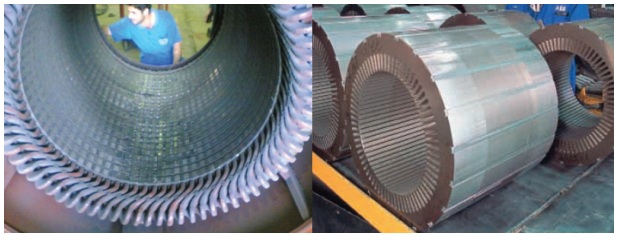
ماشین جعبه ترمینال[1] قرار می‌گیرد.

بـه علاوه دو درپـوش و یاتاقانهای طرفین ماشـین بگونه ای طراحی می‌شـوند که قسمت متحرک ماشین (رتـور) براحتی در داخل اسـتاتور بچرخـد و تکیه گاه مکانیکی مناسـبی برای رتور فراهم شود. این بخش در سـاختار الکتریکی ماشین نقشی ندارد و جزو تجهیزات مکانیکی ماشین بحساب می‌آید.

در موتورهای سـنگین که جابه جایی آن برای افراد میسـر نیسـت، یک قلاب در بالای بدنه ماشـین پیش بینی می‌شود که بتوان با جرثقیل آن را جابه‌جا نمود.



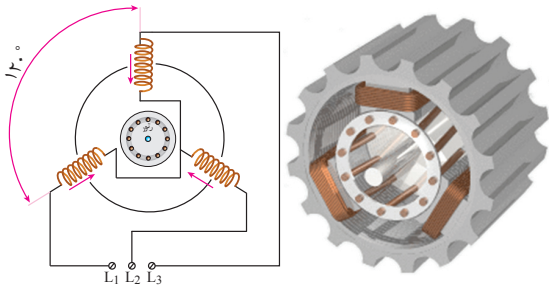




شکل ۳-هسته استاتور، بدنه و سیم‌پیچ استاتور

۲-۲-سیم پیچ

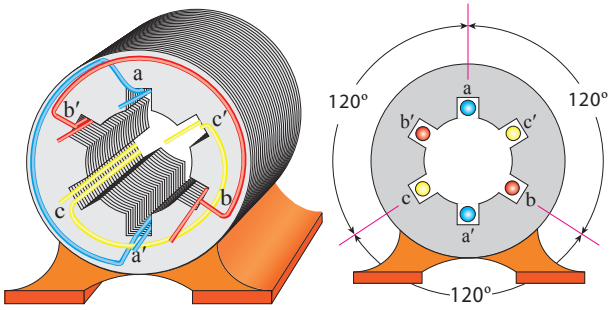
اسـتاتور ماشین القایی سـه فاز با توجه به محیط ۳۶۰° دایـره ای شـکل خود باید حداقل دارای سـه سـیم پیچ با اختلاف زاویه ۱۲۰° مکانی از هم مطابق شـکل(۴)باشـد.



به اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه سیم پیچ توجه کنید.

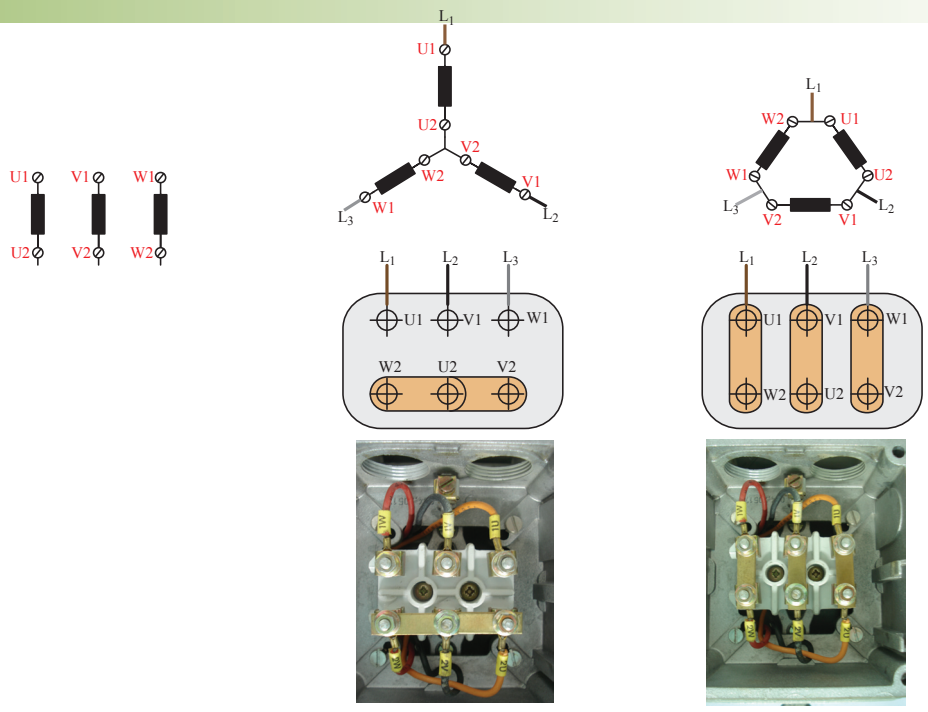
شـکل ۴ - استقرار سـیم پیچ های ماشـین القایی ومدار الکتریکی آن

در عمل سـیم پیچ های سه فاز اسـتاتور ماشین القایی احتیاج به حداقل ۶ شـیار مطابق شـکل (۵) دارند. سـیم پیچها به گونه ای جاسـازی می‌شـوند که هر سـیم‌پیچ با دیگری ۱۲۰ درجـه اختلاف فاز مکانی داشـته باشـد. در این شکل سـه دسته سیم پیچ با حروف(aa', bb', cc') مشخص شده اند. در ماشین های القایی صنعتی شـیارهای استاتور بیش تر از این تعداد می باشـند.



شـکل ۵- استاتورماشـین الکتریکی سـه فاز دو قطب شامل سه کلاف تک حلقه

۱ Terminal Box



شکل ۶ -نحوه اتصال سر سیم ها در ترمینال ماشین القایی سه فاز

در ماشینهای القایی، سر و ته سیم پیچها(aa',bb',cc') را به داخل جعبه ترمینال می آورند تا به ترمینالهای خروجی متصل شوند. بدین ترتیب تغییر اتصال ستاره و یا مثلث در جعبه ترمینال بسیار ساده مانند شکل (۶) می‌باشد.

۲-۳- رتور

رتور ماشین‌های القایی بر دو نوع است:

- رتور قفسی
- رتور سیم پیچی شده

هر دو نوع رتور از ورقه های مغناطیسی دایره‌ای شکلی تشکیل شده‌اند که از مرکز آن محور فولادی رتور عبورکرده است. محور فولادی رتور بایستی از نظر مکانیکی از استحکام کافی برخوردار بوده ولی از نظر خاصیت مغناطیسی ضعیف باشد.

۲-۳-۱ - رتور قفسی

این نوع رتور ، از تعدادی میله های مسی یا آلومینیومی مطابق شکل(۲۱) تشکیل شده است که آنها را در داخل شیارهای ورقه مغناطیسی رتور تعبیه کرده اند. سپس این میله ها از هر دو طرف توسط دو حلقه هم جنس با میله ها (آلومینیوم یا مس) به هم متصل شده اند. شکل(۷) ابعاد چند نوع رتور قفسی را نشان می‌دهد.

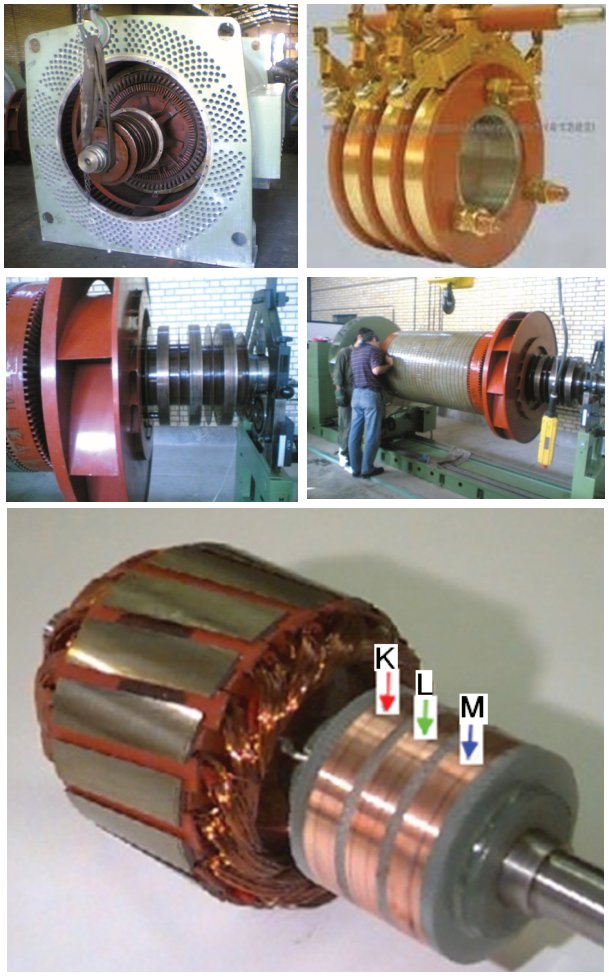
شکل ۷- رتور قفسی در ابعاد مختلف

۳

۲-۳-۲ -رتور سیم پیچی شده (Wound rotor)

بر روی این نوع رتور سه دسته سیم پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم پیچ ها نسبت به بدنه رتور عایق شده است.

نمایی از این نوع رتور در شکل(۸) دیده می‌شود.



شکل ۸ -رتور سیم پیچی شده در ابعاد مختلف

نکات قابل توجه در رابطه با ماشینهای القایی رتور سیم پیچی عبارتست از:

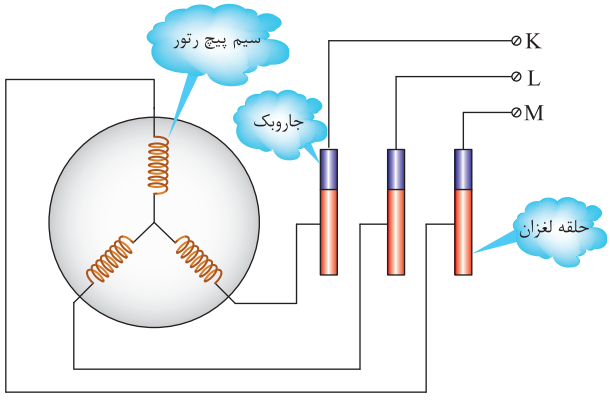
الف) تعداد شیارهای رتور همواره کمتر از تعداد شیارهای استاتور است.

ب) تعداد قطبهای حاصل شده از سیم پیچی رتور باید برابر با تعداد قطبهای حاصل شده از سیم پیچی استاتور باشد.

سیم پیچهای رتور اغلب با اتصال ستاره[1] به هم وصل می‌شوند و سه سر دیگر سیم پیچها توسط حلقه های لغزان[2] و جاروبک به بیرون رتور جهت اتصال به مقاومت راه‌انداز انتقال داده می شوند.

بدین ترتیب در ماشینهای القایی رتور سیم پیچی، امکان دسترسی به مدار داخلی رتور وجود دارد.

مدار الکتریکی و اتصال سیم پیچهای رتور به حلقه های لغزان در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹-مدار الکتریکی رتور سیم پیچی

خود را بیازمایید

۱) مزیتهای ماشین القایی جریان متناوب نسبت به ماشین های جریان مستقیم را بیان کنید.

۲) به قسمت ثابت ماشین القایی.....و به قسمت متحرک آن..... میگویند.

۳) قسمتهای اصلی استاتور ماشین القایی را نام ببرید.

۴) چرا هسته استاتور ماشین‌های القایی را بصورت ورقه ورقه و با پسماند کم می سازند؟

۵) اجزای تشکیل دهنده رتور قفسی را نام ببرید.

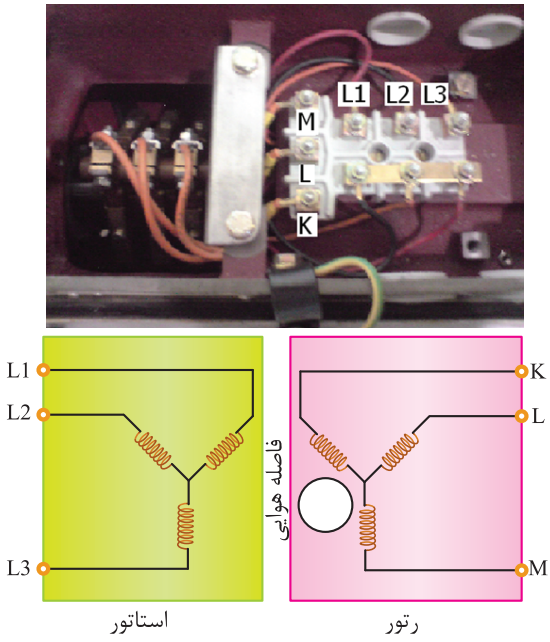
۱) گاهی در صنعت می‌توان موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده ای یافت که سیم پیچ های رتور آن با اتصال مثلث به هم وصل شده باشند.

۲) Slip ring

۳- اساس کار موتورهای القایی

مطابق شـکل (۱۰) ، مـدار الکتریکی موتور القایی سه فاز رتور سـیم پیچی شده مانند یک ترانسفورماتور سه فاز اسـت. در واقع هر دو از اثر القای ولتاژ در سیم پیچ طرف دیگر اسـتفاده می کنند لذا به این موتورها ، موتورهای القایی گفته می‌شود.

البته در سـاختار موتور القایی بین سـیم پیچ اولیه (اسـتاتور) و ثانویه(رتور) علاوه بر هسـته مغناطیسی، فاصلـه هوایی نیز وجـود دارد و از آنجا که در قدرتهای یکسان، نیروی محرکه مغناطیسی بیشتری جهت غلبه بر تلفات مکانیکی رتور و مقاومت مغناطیسـی ناشـی از فاصلـه هوایی بین اسـتاتور و رتور مورد نیاز اسـت ، بنابراین در قدرت یکسـان جریان بـی باری موتورهای القایی نسبت به ترانسفورماتورها بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۰ -مدار الکتریکی(پایین) و جعبه ترمینال(بالا)
موتور القایی با رتور سیم پیچی شده

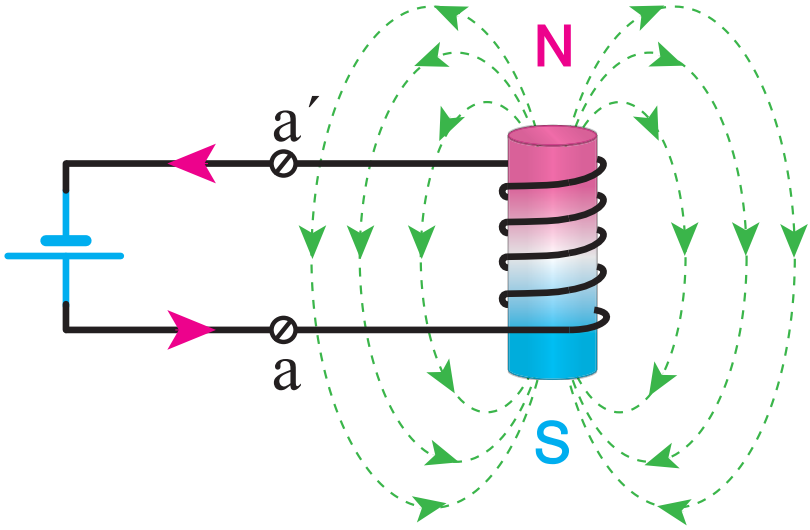
۴-پدیده میدان دوار در ماشینهای القایی

در این بخش پس از معرفی سـاختار ماشین القایی سه فاز ، ثابت می‌شود که چگونه با عبور جریان سه فاز از سه سیم پیچ اسـتاتور ماشین القایی می‌توان میدان دوار ایجـاد کـرد بطوریکه این میدان پیرامون هسـته اسـتاتور گردش نموده و بدین ترتیب شرایط لازم برای چرخش رتور را فراهم کند.

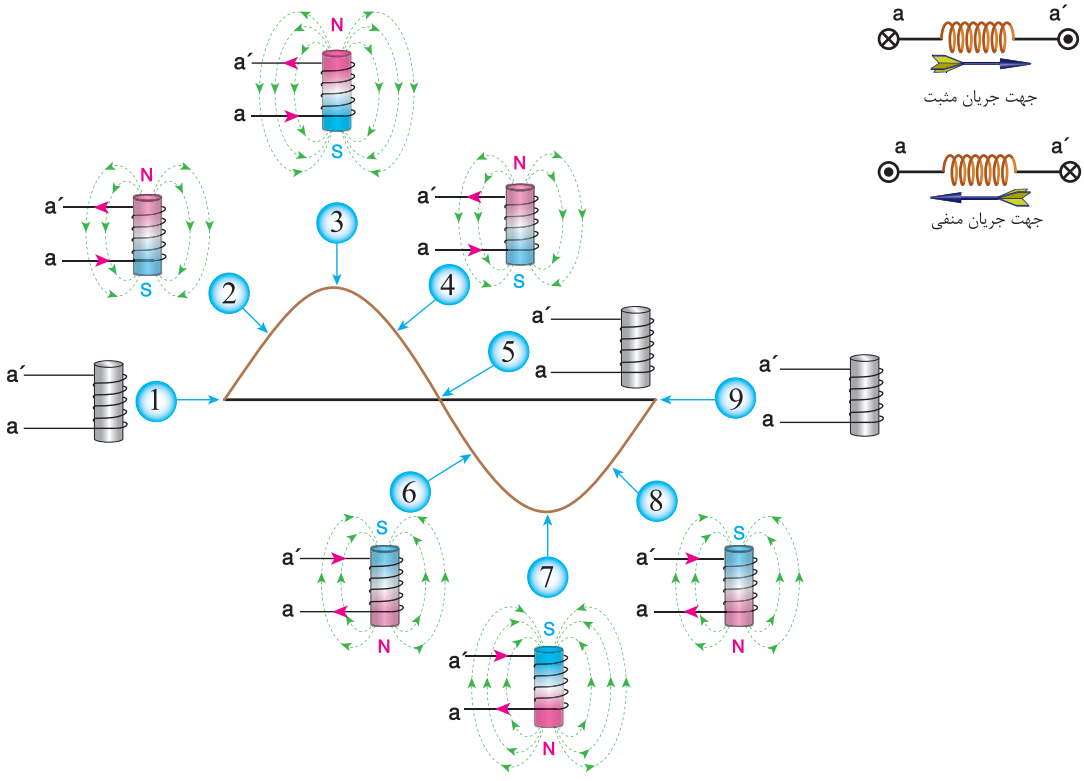
البته بـرای اثبات موضوع فـوق از معادلات ریاضی بهره می گیرند ولی از آنجا که می‌توان این موضوع را با دلایل فیزیکی نیز شرح داد، لذا برای اثبات میدان دوار از تشریح فیزیکی میدان استفاده می‌گردد.

در آغاز انواع میدان های ایجاد شده توسط جریانهای مستقیم و متناوب یادآوری می‌شود. مطابق شکل (۱۱) با عبور جریان DC از یک سـیم پیـچ می‌توان میدان

ثابت ایجاد کـرد. زیرا اندازه و جهت این میدان همواره ثابت اسـت. همچنیـن با عبور جریان متنـاوب تک فاز میدانی متغیر ایجاد می‌شـود که بصورت ضربانی جهت آن در هر نیم سیکل مرتب تغییر می کند.



شکل ۱۱-میدان مغناطیسی حاصل از منبع جریان مستقیم



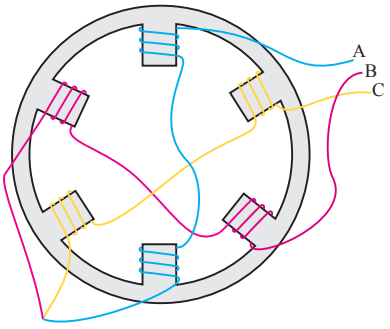
شکل ۱۲-جهت میدان مغناطیسی سیم پیچ در جریان متناوب

این میدان را میدان ضربانی می گویند. جهت میدانهای مغناطیسی اطراف سیم پیچ در جریان متناوب تکفاز مطابق شکل (۱۲) می‌باشد.

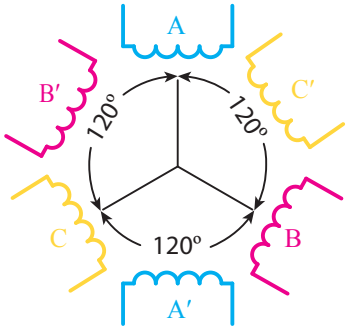
پیکان جهت جریان فرضی وارد و خارج شده از سیم‌پیچ را نشان می‌دهد.

در ادامه نشان داده می‌شود که با عبور جریانهای متناوب سه فاز در سه سیم پیچ مطابق شکل(۱۳) میدانهای گردشی یا دوار ایجاد می‌شود.

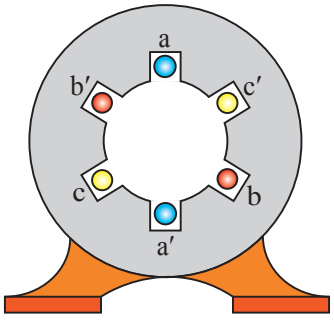
شکل (۱۳-الف) سیم بندی سه فازه ماشین القایی دوقطبی ساده را نشان می دهد. با توجه به شکل (۱۳-ب ، ج) ، سیم پیچهای سه فاز c,b,a در بدنه استاتور ، با اختلاف ۱۲۰ درجه مکانی نسبت به یکدیگر جاسازی شده اند در این ماشین بازوی برگشت سیم پیچهای هر فاز استاتور ، ماشین را به



الف)شمای واقعی با ماشین القایی با سیم پیچ متمرکز



ب)نمایش کلافها بر اساس موقعیت مکانی



ج)شمای تک حلقه سیم بندی ماشین القایی با سیم پیچ گسترده بر اساس موقعیت مکانی

د)شکل واقعی ماشین القایی سیم پیچ متمرکز مدل آزمایشگاهی

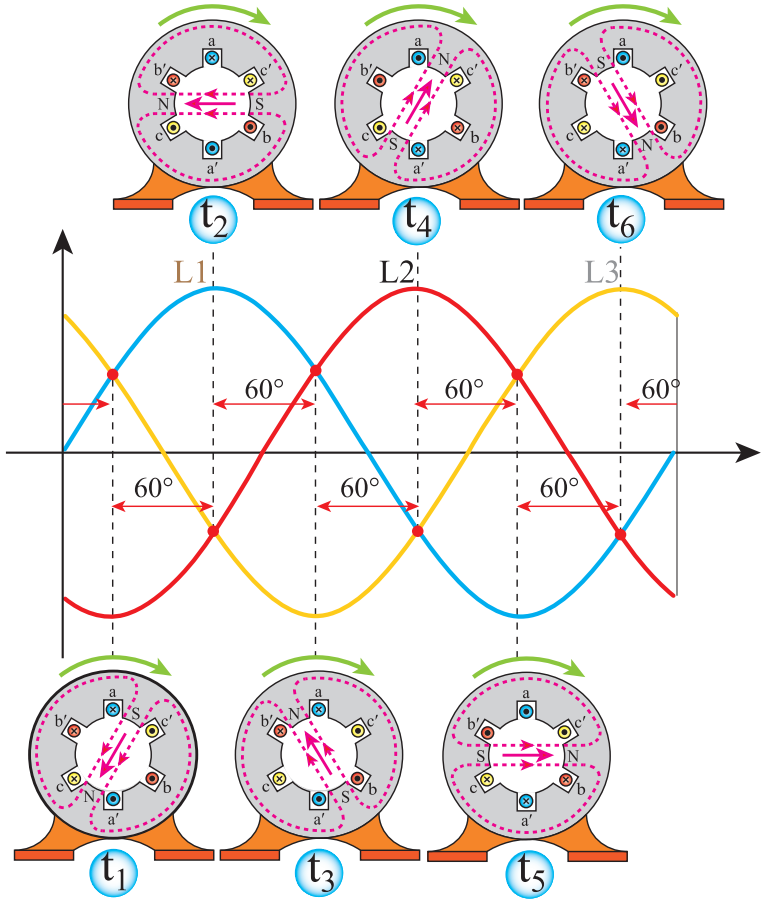
شکل ۱۳-ماشین القایی سه فاز

دو نیم تبدیل نموده است یعنی بازوی رفت سیم پیچ مثلا a با بازوی برگشت آن یعنی a'، ۱۸۰° درجه اختلاف مکانی دارد بنابراین در این ماشین القایی میدان دو قطبی ایجاد می‌شود.

حال انتهای سیم پیچهای سه فاز استاتور یعنی (a',b',c') را با اتصال ستاره به هم متصل کرده و ابتدای آنها یعنی (a,b,c) را به منبع برق سه فاز با ولتاژ مناسب ، وصل می کنند.

بلافاصله پس از اتصال برق سه فاز به سیم پیچهای استاتور، جریان الکتریکی در آن جاری می‌شود و سپس در هادی های هر سیم پیچ متناسب با جهت جریان عبوری از آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود.

برای تحلیل آسان تر میدان دوار ، اندازه و جهت جریانهای سه فازه شکل (۱۴) را در زمانهای t_1 تا t_6

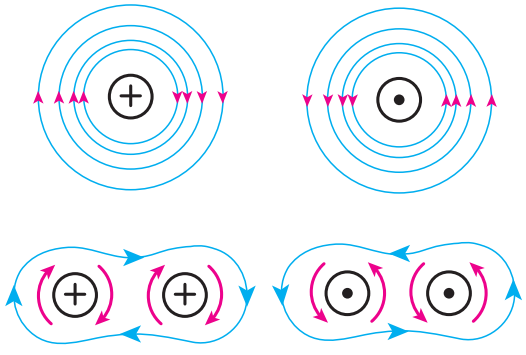


شکل ۱۴-میدان دوار استاتور در یک دوره تناوب

در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه فاصله هر یک از نمونه های زمانی بر اساس سرعت زاویه ای، ۶۰ درجه از یکدیگر می‌باشد. بنابراین با تحلیل این ۶ نقطه می‌توان گردش کامل میدان دوار را در مسیر دایره ای (یعنی ۳۶۰ درجه) بررسی نمود.

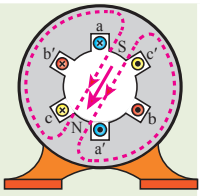
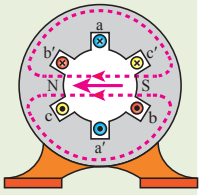
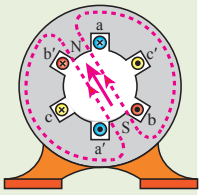
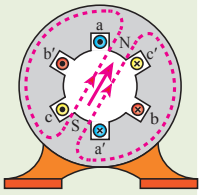
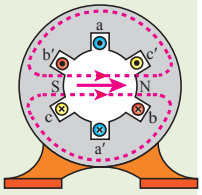
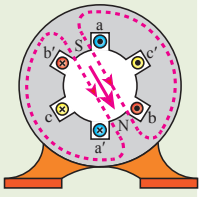
جدول (۱) تحلیل جهت جریان هر یک از سیم پیچها را در یک دوره تناوب شکل موج سه فاز نشان می دهد. جهت جریان هادیهای هر شیار و وضعیت میدانهای مغناطیسی استاتور در هر یک از زمانهای t_1 تا t_6 به کمک جدول (۱) بدست می‌آید.

از آنجا که شیارهای استاتور، هادیهای هر فاز را در خود جای داده اند و جهت جریان هادی های هر شیار در هر لحظه با توجه به فرض فوق قابل علامت گذاری هستند. لذا می‌توان جدول(۱) را کامل نمود. بنابراین با توجه به میدان مغناطیسی اطراف هادی های هم جوار ، جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هر لحظه بدست می‌آید.



شکل ۱۵- میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان و دو سیم مجاور یا جریان هم جهت

به عنوان نمونه با توجه به شکل موج جریانهای سینوسی سه فاز ،در لحظه t_1 ، مقدار جریان فاز a مثبت، فاز b منفی و فاز c مثبت است. پس علامت جهت جریان در ابتدای سیم پیچ a ، ⊗ و در انتهای آن یعنی a' ، ⊙ درج می‌شود. این علامت ها برای فازهای دیگر نیز به همین ترتیب در سطر مربوط به هر زمان قرار داده می‌شود. با در نظر گرفتن جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده از زمان t_1 تا t_6 می‌توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی در هسته استاتور می‌چرخد. این میدان در حال گردش را میدان دوار می‌گویند.

	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ						
	I_a	I_b	I_c	a	c'	b	a'	c	b'	
t_1	+	−	+	⊗	⊙	●	⊙	⊗	⊗	
t_2	+	−	−	⊗	⊗	●	⊙	⊙	⊗	
t_3	+	+	−	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	●	
t_4	−	+	−	●	⊗	⊗	⊗	⊙	●	
t_5	−	+	+	●	⊙	⊗	⊗	⊗	●	
t_6	−	−	+	●	⊙	●	⊗	⊗	⊗	

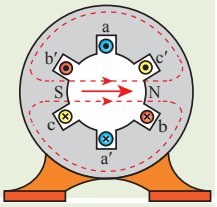
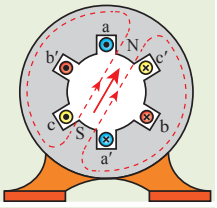
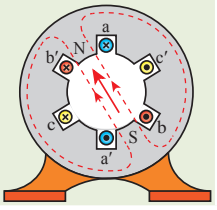
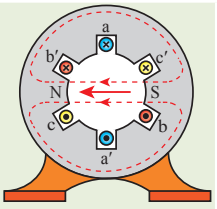
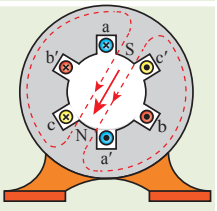
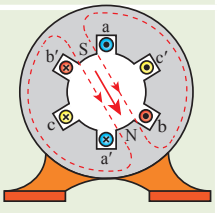
جهت گردش میدان

جدول۱- جهت جریان سیم پیچهای استاتور

۵- تغییر جهت چرخشی میدان دوار

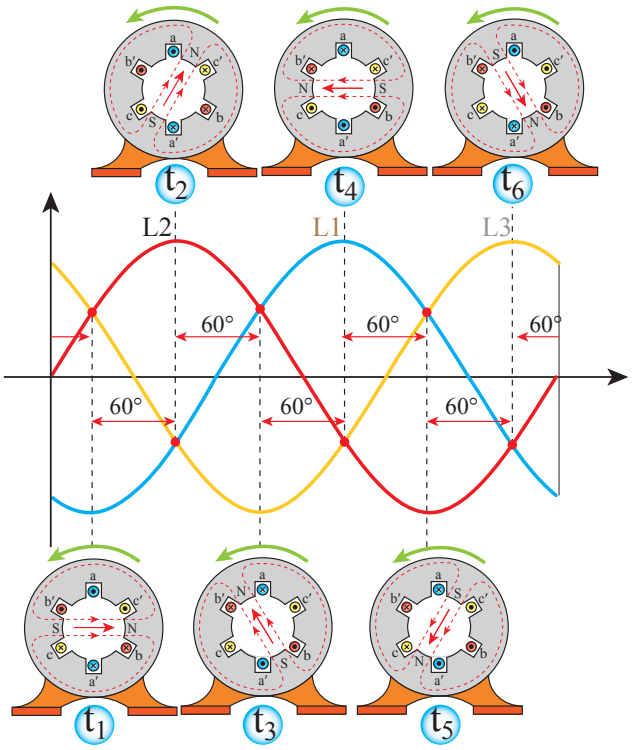
در صورتی که جای دو فاز از سه فاز متصل شده به ماشین القایی به اختیار عوض شود، میدان دوار ماشین القایی سه فاز تغییر جهت می‌دهد. این تغییر در جدول(۲) بر اساس شکل (۱۶) انجام شده است .

شکل (۱۶) جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار را با تعویض جای فاز a و b نمایش می دهد. از این روش برای تغییر جهت گردش موتور القایی استفاده می‌شود.

زمان	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ						
	I_a	I_b	I_c	a	c'	b	a'	c	b'	
t_1	−	+	+	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	●	
t_2	−	+	−	⊙	⊗	⊗	⊗	⊙	●	
t_3	+	+	−	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	●	
t_4	+	−	−	⊗	⊗	●	⊙	⊙	⊗	
t_5	+	−	+	⊗	⊙	●	⊙	⊗	⊗	
t_6	−	−	+	⊙	⊙	●	⊗	⊗	⊗	

جهت گردش میدان ←

جدول ۲- اثر تغییر جای دو فاز بر جهت میدان دوار



شکل ۱۶ - جهت جریان سیم پیچ های استاتور و تغییر جهت میدان دوار در یک دوره تناوب

خود را بیازمایید

۱) چرا جریان بی‌باری موتورهای القایی بیشتر از ترانسفورماتورها می‌باشد؟

۲)آیا می‌توان با جریان مستقیم میدان دوار ایجاد کرد؟

۳) با توجه به علامت جریان‌های داده شده در جدول زیر، جهت جریان در سیم‌پیچ‌های ماشین القایی و جهت میدان دوار را تعیین کنید.

زمان	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ					
	I_a	I_b	I_c	a	c'	b	a'	c	b'
$t_۱$	+	+	−						
$t_۲$	−	+	−						
$t_۳$	−	+	+						
$t_۴$	−	−	+						
$t_۵$	+	−	+						
$t_۶$	+	−	−						