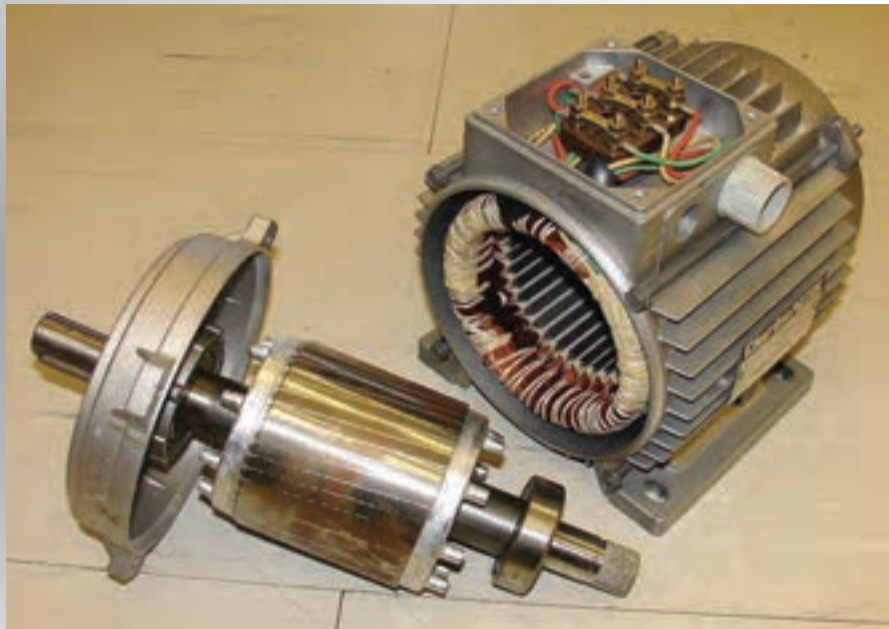


۳ ماشین های القایی سه فاز



هدف‌های رفتاری :

- مفاهیم آسنکرون و سنکرون را تعریف کند.
- ماشین آسنکرون را در دو حالت موتوری و مولدی تعریف کند.
- ساختمان ظاهری و داخلی ماشین آسنکرون را از روی شکل توضیح دهد.
- اساس کار موتورهای آسنکرون را توضیح دهد.
- چگونگی تولید میدان دوار در یک استاتور سه فاز دوقطبی را توضیح دهد.
- تأثیر فرکانس و تعداد قطب بر سرعت میدان دوار را توضیح دهد.
- مثال مربوط به سرعت میدان دوار را تشریح کند.
- تمرین مربوط به سرعت میدان دوار را حل کند.
- لغزش را تعریف کند.
- علت ایجاد لغزش در موتورهای آسنکرون را توضیح دهد.
- مثال مربوط به محاسبه لغزش را تشریح کند.
- تمرین مربوط به محاسبه لغزش را حل کند.
- لغزش در حالت‌های مختلف موتور آسنکرون را توضیح دهد.
- اثر تغییرات لغزش بر مدار رتور را توضیح دهد.
- مشخصه‌های $T = f(n)$, $T = f(s)$ را رسم کند.
- با استفاده از مشخصه‌های $T = f(n)$, $T = f(s)$ گشتاورهای راه‌اندازی و بحرانی را نشان دهد.
- ساختمان داخلی روتور موتورهای قفسی را در کلاس‌های مختلف توضیح دهد.
- روش‌های راه‌اندازی موتورهای روتور قفسی را بیان کند.
- کاربرد موتورهای روتور قفسی را بیان کند.
- ساختمان داخلی موتورهای روتور سیم‌پیچی را توضیح دهد.
- اثر تغییر مقاومت مدار روتور سیم‌پیچی را در دو حالت راه‌اندازی و زیربار توضیح دهد.
- کاربرد موتورهای روتور سیم‌پیچی را بیان کند.
- انواع تلفات در موتورهای آسنکرون را تعریف کند.
- دیاگرام توازن قدرت در موتورهای آسنکرون را رسم کند.
- روابط توان، تلفات و بازده را توضیح دهد.
- مثال مربوط به توان و بازده را تشریح کند.
- تمرین مربوط به توان و بازده را حل کند.
- روش‌های کنترل سرعت در موتورهای القایی را شرح دهد.

- روش‌های ترمز در موتورهای القایی را شرح دهد.
- اطلاعات لازم را از پلاک موتورهای القایی استخراج کند.
- حالت مولدی ماشین‌های آسنکرون را توضیح دهد.
- تمرین‌های پایان فصل را حل کند.

ساده‌تر از موتورهای DC است. ولی مکانیزم عملکرد، کنترل سرعت و گشتاور در این نوع موتورها نیازمند درک عمیق‌تری از مفاهیم الکتریسیته و مغناطیس می‌باشد. این نوع موتور در قدرت‌های متنوع (کسری از کیلووات تا چند ده مگاوات) ساخته و بهره‌برداری می‌شوند.

موتورهای القایی سه فاز، پرکاربردترین موتورهایی هستند که برای به حرکت درآوردن، چرخ‌های صنعت از آنها استفاده می‌شود. طراحی ساده و مستحکم، قیمت ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان به منبع سه فاز امتیازات اصلی موتورهای القایی هستند. با اینکه ساختمان موتورهای القایی سه فاز به مراتب



شکل ۱- انواع موتورهای الکتریکی و کاربرد آن در صنعت

۳-۱-۱ ساختمان ماشین‌های القایی

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

در شکل (۲) ساختمان ماشین القایی نشان داده شده است.

۳-۱-۱-۱ استاتور: استاتور ماشین‌های القایی، شامل بدنه،

هسته مغناطیسی، سیم‌پیچ‌ها و باتاقان‌ها می‌باشد.^۱

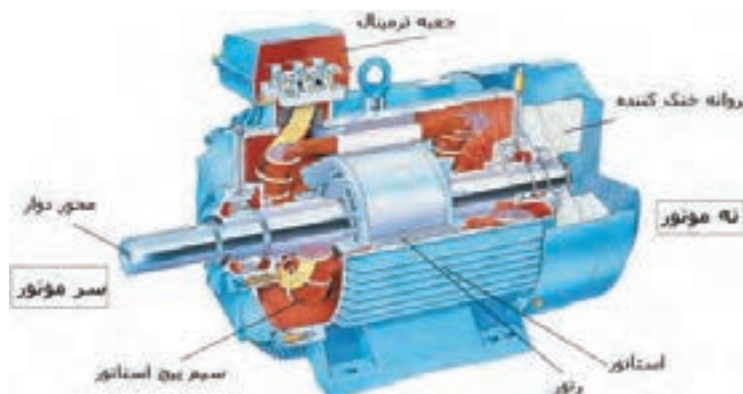
هسته استاتور، مجموعه‌ای از ورق‌های فولادی است که

دارای شیار در سطح داخلی آن مطابق شکل (۳-الف) می‌باشد که پس از قرار گرفتن در کنار هم تشکیل یک حجم استوانه‌ای توخالی را مطابق شکل (۳-ب) می‌دهد.

سیم‌پیچ‌های سه فاز ماشین القایی در داخل همین شیارها

قرار می‌گیرند.

در فصل ۱ با پدیده هیستریزس و فوکو آشنا شدید. در ماشین‌های القایی نیز به دلیل تلفات هیستریزس، جنس هسته باید از فولاد الکتریکی با پسماند کم^۲ انتخاب شود تا تلفات هیستریزس ماشین به حداقل ممکن برسد. همچنین برای کاهش تلفات فوکو نیز از روش ورق، ورق کردن هسته بهره می‌گیرند. ابعاد هسته استاتور به‌گونه‌ای است که به راحتی در بدنه فولادی، چدنی یا آلومینیومی استاتور محکم می‌شود این بدنه به صورت پره دار ساخته می‌شود تا برای تهویه بهتر، سطح تماس بیشتری با هوای محیط (سطح بیرونی) خود داشته باشد. وظیفه بدنه، پوشش نهایی ماشین القایی می‌باشد که هسته و سیم‌پیچ‌ها را در خود جای داده است و ضمن محافظت ماشین در برابر ورود اجسام خارجی امکان نصب ماشین را فراهم می‌کند. همچنین برای اتصال سیم‌پیچ‌ها روی بدنه ماشین جعبه ترمینال^۳ قرار می‌گیرد.



شکل ۲- اجزای تشکیل دهنده یک موتور القایی

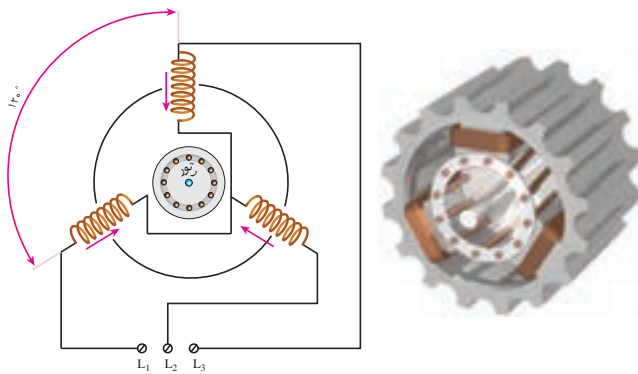
۱- در صورت نیاز ممکن است به منظور خنک سازی ماشین القایی و یا حفاظت آن از لوازم بیشتری نظیر فن، هیتر یا گرم کن، سنسور لرزش، مقاومت‌های متغیر با دما و ... در

آن استفاده شود.

۲- فولاد سیلیس دار

۳- Terminal Box

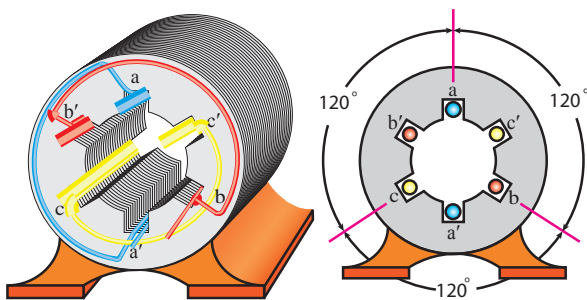
۲-۱-۳- سیم پیچ: استاتور ماشین القایی سه فاز با توجه به محیط 360° دایره ای شکل خود باید حداقل دارای سه سیم پیچ با اختلاف زاویه 120° مکانی از هم مطابق شکل (۴) باشد.



به اختلاف مکانی 120° درجه سیم پیچ توجه کنید.

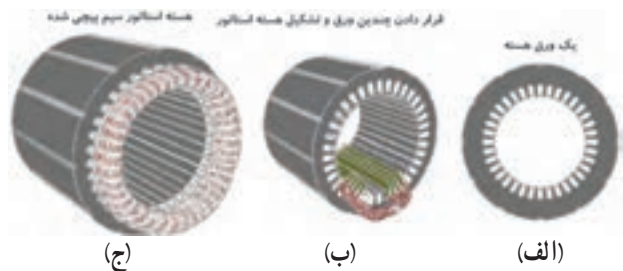
شکل ۴- استقرار سیم پیچ های ماشین القایی و مدار الکتریکی آن

در عمل سیم پیچ های سه فاز استاتور ماشین القایی احتیاج به حداقل ۶ شیار مطابق شکل (۵) دارند. سیم پیچ ها به گونه ای جاسازی می شوند که هر سیم پیچ با دیگری 120° درجه اختلاف فاز مکانی داشته باشد. در این شکل سه دسته سیم پیچ با حروف (aa', bb', cc') مشخص شده اند. در ماشین های القایی صنعتی شیارهای استاتور بیشتر از این تعداد می باشند.

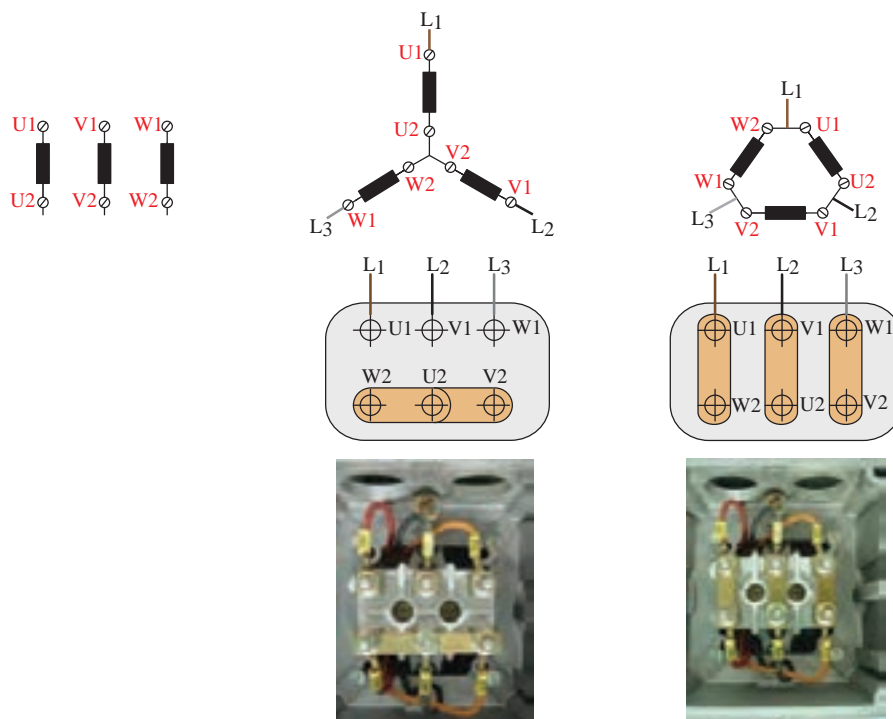


شکل ۵- استاتور ماشین الکتریکی سه فاز دو قطب شامل سه کلاف تک حلقه

به علاوه دو درپوش و یاتاقان های طرفین ماشین به گونه ای طراحی می شوند که قسمت متحرک ماشین (رتور) به راحتی در داخل استاتور بچرخد و تکیه گاه مکانیکی مناسبی برای رتور فراهم شود. این بخش در ساختار الکتریکی ماشین نقشی ندارد و جزو تجهیزات مکانیکی ماشین به حساب می آید. در موتورهای سنگین که جابه جایی آن برای افراد میسر نیست، یک قلاب در بالای بدنه ماشین پیش بینی می شود که بتوان با جرثقیل آن را جابه جا نمود.



شکل ۳- هسته استاتور، بدنه و سیم پیچ استاتور



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

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 می دهد.

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

۳-۱-۳ رتور: رتور ماشین های القایی بر دو نوع

است:

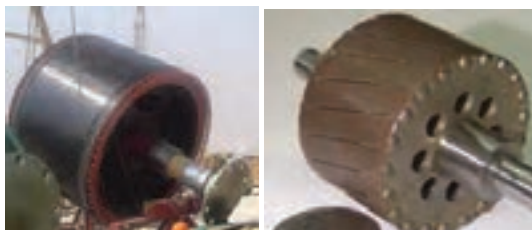
● رتور قفسی

● رتور سیم پیچی شده

هسته هر دو نوع رتور از ورقه های مغناطیسی دایره ای شکلی تشکیل شده اند که از مرکز آن محور فولادی رتور عبور کرده است. محور فولادی رتور بایستی از نظر مکانیکی از استحکام کافی برخوردار بوده ولی از نظر خاصیت مغناطیسی ضعیف باشد.

۳-۱-۴ رتور قفسی: این نوع رتور، از تعدادی

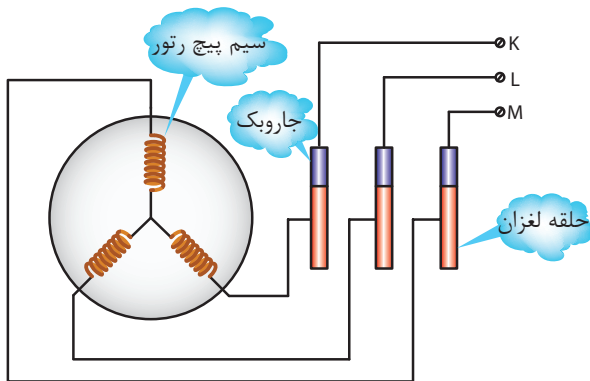
میله های مسی یا آلومینیومی مطابق شکل (۲۱) تشکیل شده است که آنها را در داخل شیارهای ورقه مغناطیسی رتور تعبیه کرده اند.



شکل ۷- رتور قفسی در ابعاد مختلف

سیم پیچ‌های رتور اغلب با اتصال ستاره^۱ به هم وصل می‌شوند و سه سر دیگر سیم پیچ‌ها توسط حلقه‌های لغزان^۲ و جاروبک به بیرون رتور جهت اتصال به مقاومت راه انداز انتقال داده می‌شوند.

بدین ترتیب در ماشین‌های القایی رتور سیم پیچی، امکان دسترسی به مدار داخلی رتور وجود دارد.
مدار الکتریکی و اتصال سیم پیچ‌های رتور به حلقه‌های لغزان در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- مدار الکتریکی رتور سیم پیچی

۵-۱-۳- رتور سیم پیچی شده (Wound rotor):

بر روی این نوع رتور سه دسته سیم پیچ با اختلاف مکانی 120° درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم پیچ‌ها 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

خود را بیازماید



- ۱- مزیت‌های ماشین‌های القایی جریان متناوب نسبت به ماشین‌های جریان مستقیم را بیان کنید.
- ۲- به قسمت ثابت ماشین‌های القایی... و به قسمت متحرک آن... می‌گویند.
- ۳- قسمت‌های اصلی استاتور ماشین‌های القایی را نام ببرید.
- ۴- چرا هسته استاتور ماشین‌های القایی را به صورت ورقه ورقه و با پسماند کم می‌سازند؟
- ۵- اجزای تشکیل دهنده رتور قفسی را نام ببرید.

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

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

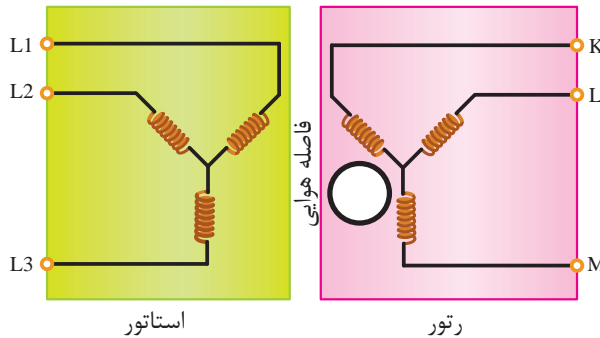
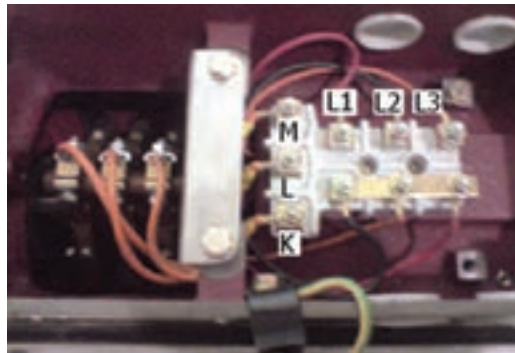
(ب) تعداد قطب‌های سیم پیچی رتور باید برابر با تعداد قطب‌های سیم پیچی استاتور باشد.

۱- گاهی در صنعت می‌توان موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده‌ای یافت که سیم پیچ‌های رتور آن با اتصال مثلث به هم وصل شده باشند.

۳-۲- اساس کار موتورهای القایی

مطابق شکل (۱۰)، مدار الکتریکی موتور القایی سه فاز رتور سیم پیچی شده مانند یک ترانسفورماتور سه فاز است. در واقع هر دو از اثر القای نیروی محرکه در سیم پیچ طرف دیگر استفاده می کنند لذا به این موتورها، موتورهای القایی گفته می شود. البته در ساختار موتور القایی بین استاتور (اولیه) و رتور

(ثانویه) علاوه بر هسته مغناطیسی، فاصله هوایی نیز وجود دارد و از آنجا که در قدرت های یکسان، نیروی محرکه مغناطیسی بیشتری جهت غلبه بر تلفات مکانیکی رتور و مقاومت مغناطیسی ناشی از فاصله هوایی بین استاتور و رتور مورد نیاز است، بنابراین در قدرت یکسان جریان بی باری موتورهای القایی نسبت به ترانسفورماتورها بیشتر می باشد.



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

۳-۳- پدیده میدان دوار در ماشین های القایی

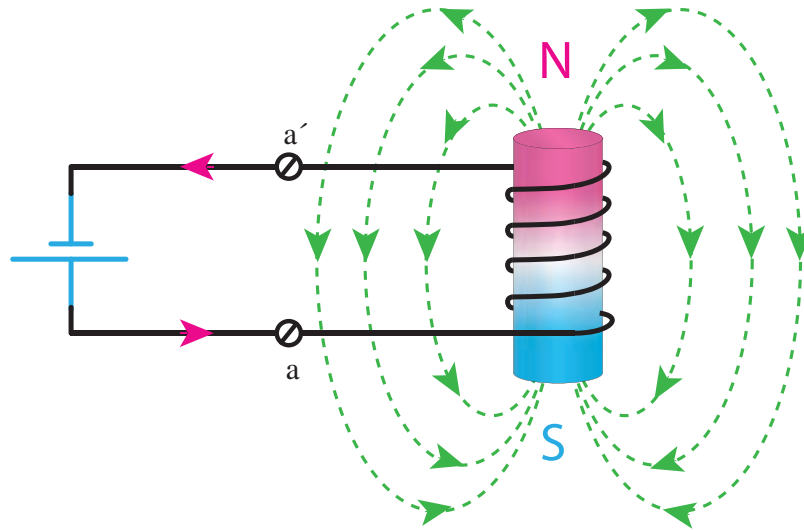
در این بخش پس از معرفی ساختار ماشین القایی سه فاز، ثابت می شود که چگونه با عبور جریان سه فاز از سه سیم پیچ استاتور ماشین القایی می توان میدان دوار ایجاد کرد به طوری که این میدان پیرامون هسته استاتور گردش نموده و بدین ترتیب شرایط لازم برای چرخش رتور را فراهم کند. البته برای اثبات موضوع فوق از معادلات ریاضی بهره

می گیرند ولی از آنجا که می توان این موضوع را با دلایل فیزیکی نیز شرح داد، لذا برای اثبات میدان دوار از تشریح فیزیکی میدان استفاده می گردد.

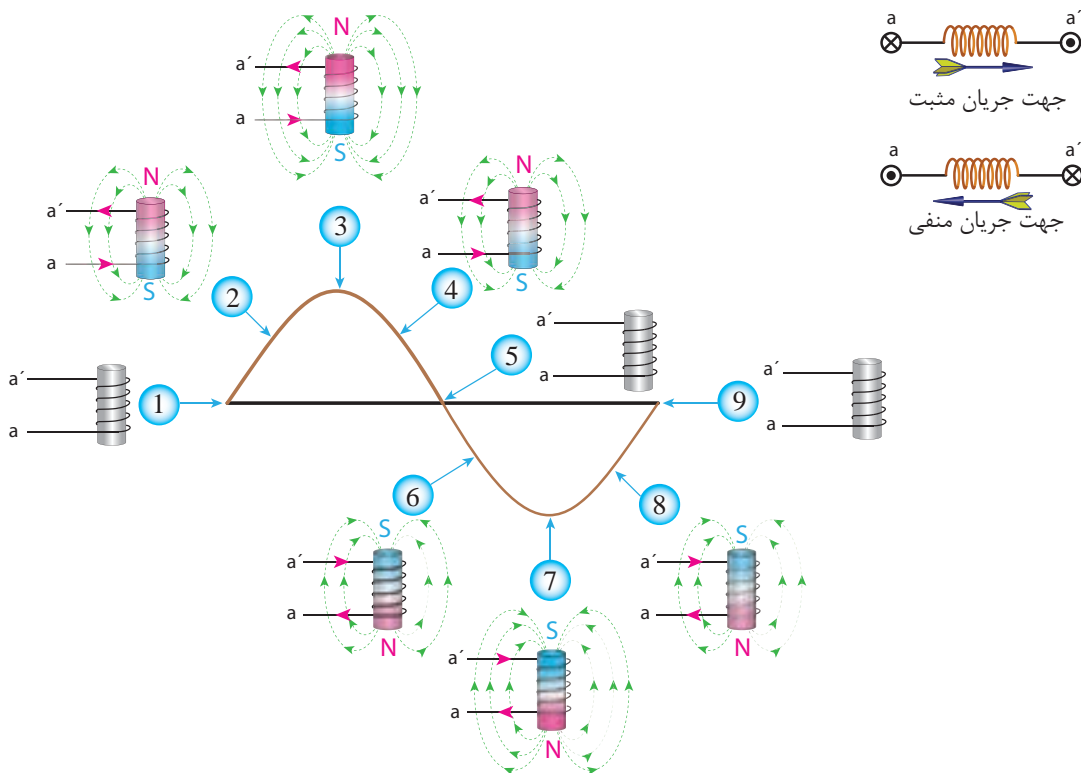
در آغاز انواع میدان های ایجاد شده توسط جریان های مستقیم و متناوب یادآوری می شود. مطابق شکل (۱۱) با عبور جریان DC از یک سیم پیچ می توان میدان ثابت ایجاد کرد. زیرا اندازه و جهت این میدان همواره ثابت است. همچنین با عبور

ضربانی می‌گویند. جهت میدان‌های مغناطیسی اطراف سیم پیچ در جریان متناوب تکفاز مطابق شکل (۱۲) می‌باشد.

جریان متناوب تک فاز میدانی متغیر ایجاد می‌شود که به صورت ضربانی جهت آن در هر نیم سیکل مرتب تغییر می‌کند که به آن میدان



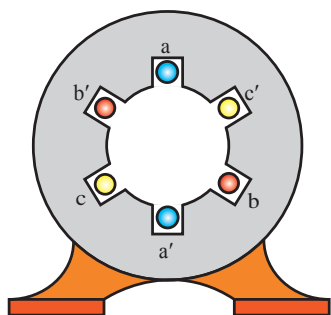
شکل ۱۱- میدان مغناطیسی حاصل از منبع جریان مستقیم



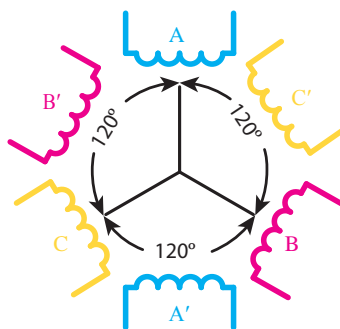
شکل ۱۲- جهت میدان مغناطیسی سیم پیچ در جریان متناوب

شکل (۱۳- الف) سیم بندی سه فازه ماشین القایی دو قطبی ساده را نشان می دهد. با توجه به شکل (۱۳- ب، ج)، سیم پیچ های سه فاز a, b, c در بدنه استاتور، با اختلاف 120° درجه مکانی نسبت به یکدیگر جاسازی شده اند در این ماشین بازوی برگشت سیم پیچ های هر فاز استاتور، ماشین

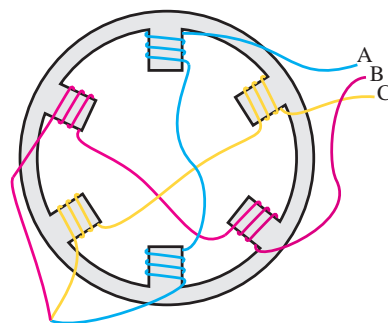
پیکان نشان داده شده در شکل ۱۲ جهت جریان فرضی وارد و خارج شده از سیم پیچ را نشان می دهد. در ادامه نشان داده می شود که با عبور جریان های متناوب سه فاز در سه سیم پیچ مطابق شکل (۱۳) میدان های گردشی یا دوار ایجاد خواهد شد.



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



ب) نمایش کلاف ها بر اساس موقعیت مکانی



الف) شمای واقعی با ماشین القایی با سیم پیچ متمرکز



د) شکل واقعی ماشین القایی سیم پیچ متمرکز مدل آزمایشگاهی

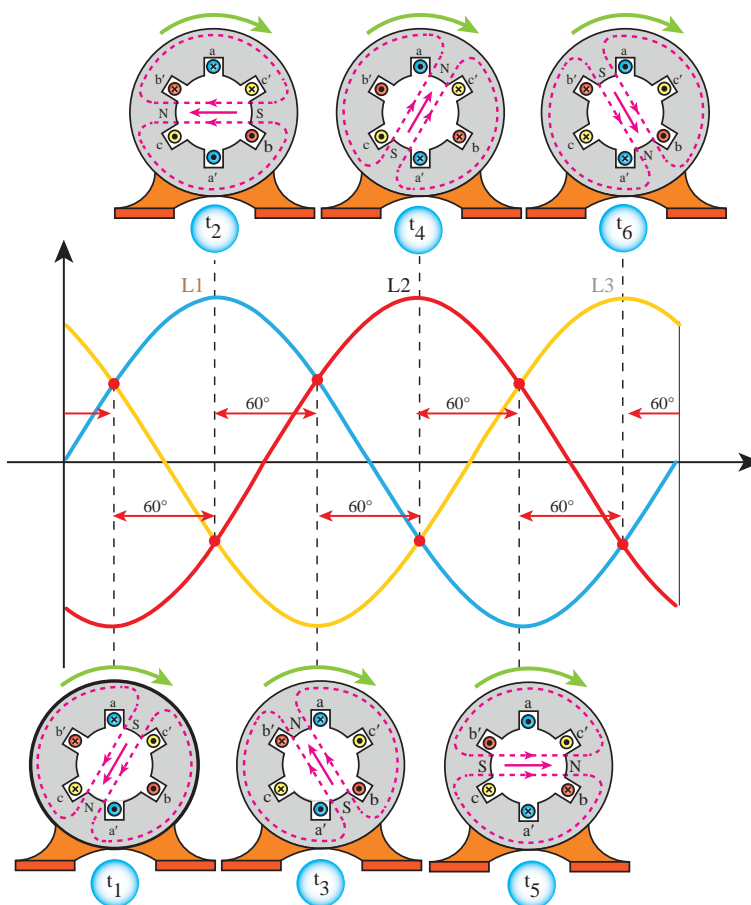
شکل ۱۳- ماشین القایی سه فاز

استاتور، جریان الکتریکی در آن جاری می شود و سپس در هادی های هر سیم پیچ متناسب با جهت جریان عبوری از آن میدان مغناطیسی ایجاد می شود.

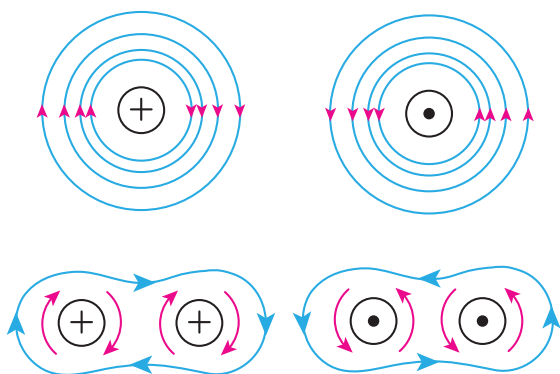
برای تحلیل آسان تر میدان دوار، اندازه و جهت جریان های سه فازه شکل (۱۴) در زمان های t_1 تا t_6 در نظر گرفته می شود. در نتیجه فاصله هر یک از نمونه های زمانی 60° درجه از یکدیگر می باشد. بنابراین با تحلیل این ۶ نقطه می توان گردش کامل میدان دوار را در مسیر دایره ای (یعنی 360° درجه) بررسی نمود.

را به دو نیم تبدیل نموده است یعنی بازوی رفت سیم پیچ مثلاً a با بازوی برگشت آن یعنی a' ، 180° درجه اختلاف مکانی دارد بنابراین در این ماشین القایی میدان دو قطبی ایجاد می شود.

برای شروع انتهای سیم پیچ های 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 پیچ های



شکل ۱۴- میدان دوار استاتور در یک دوره تناوب



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

جدول (۱) تحلیل جهت جریان هر یک از سیم‌پیچ‌ها را در یک دوره تناوب شکل موج سه فاز نشان می‌دهد. جهت جریان هادی‌های هر شیار و وضعیت میدان‌های مغناطیسی استاتور در هر یک از زمان‌های t_1 تا t_6 به کمک جدول (۱) به دست می‌آید. از آنجا که شیارهای استاتور، هادی‌های هر فاز را در خود جای داده‌اند و جهت جریان هادی‌های هر شیار در هر لحظه با توجه به فرض فوق قابل علامت‌گذاری هستند. لذا می‌توان جدول (۱) را کامل نمود. بنابراین با توجه به میدان مغناطیسی اطراف هادی‌های هم جوار، جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هر لحظه به دست می‌آید.

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.

به عنوان نمونه با توجه به شکل موج جریان‌های سینوسی سه فاز، در لحظه t_1 فاز a مثبت، فاز b منفی و فاز c مثبت است. پس علامت جهت جریان در ابتدای سیم پیچ a، \otimes و در انتهای آن یعنی a' ، \odot درج می‌شود. این علامت‌ها برای فازهای دیگر نیز به

جدول ۱- جهت جریان سیم پیچ‌های استاتور

	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ						
	I_a	I_b	I_c	a	c'	b	a'	c	b'	
t_1	+	-	+	\otimes	\odot	\odot	\odot	\otimes	\otimes	
t_2	+	-	-	\otimes	\otimes	\odot	\odot	\odot	\otimes	
t_3	+	+	-	\otimes	\otimes	\otimes	\odot	\odot	\odot	
t_4	-	+	-	\odot	\otimes	\otimes	\otimes	\odot	\odot	
t_5	-	+	+	\odot	\odot	\otimes	\otimes	\otimes	\odot	
t_6	-	-	+	\odot	\odot	\odot	\otimes	\otimes	\otimes	

جهت گردش میدان



۳-۴- تغییر جهت چرخشی میدان دوار

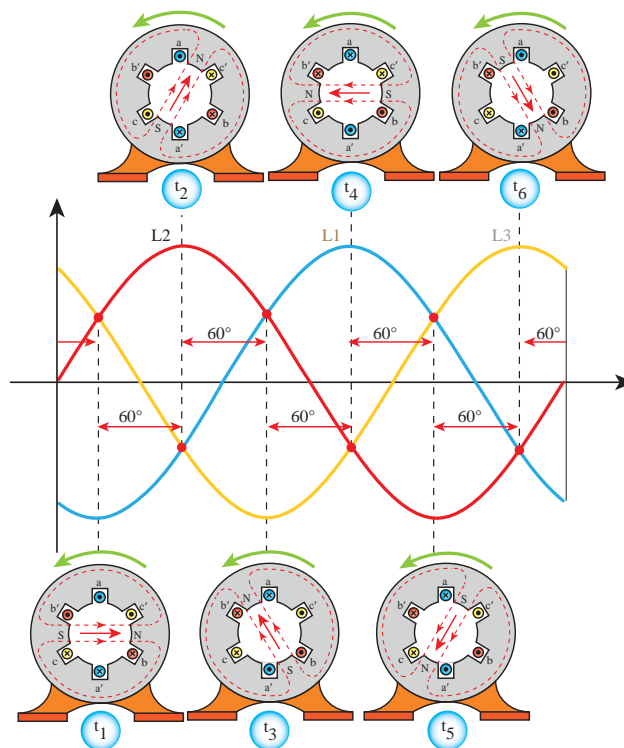
در صورتی که جای دو فاز از سه فاز متصل شده به ماشین القایی به اختیار عوض شود، میدان دوار ماشین القایی سه فاز تغییر جهت می دهد. این تغییر در جدول (۲) بر اساس

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

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





شکل ۱۶- جهت جریان سیم پیچ‌های 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_1	+	+	-						
t_2	-	+	-						
t_3	-	+	+						
t_4	-	-	+						
t_5	+	-	+						
t_6	+	-	-						

۵-۳- عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

همانطور که ملاحظه کردید برای ترسیم میدان دوار از شکل موج جریان‌های سه فاز در فواصل منظم و در یک دوره تناوب استفاده می‌شود. حالا تصور کنید هر چه دوره تناوب در زمان کوتاه‌تری تکرار گردد مسلماً سرعت چرخشی میدان دوار نیز بیشتر خواهد شد و بالعکس با افزایش زمان دوره تناوب سرعت میدان دوار کندتر می‌شود.

یکی از کمیت‌های شبکه برق متناوب، فرکانس f است که با دوره تناوب T نسبت عکس دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت یکی از عوامل مؤثر بر سرعت میدان دوار، فرکانس شبکه برق می‌باشد ولی از آنجا که فرکانس متناسب با عکس زمان تناوب است، بنابراین با کاهش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار، کم می‌شود و با افزایش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار زیاد می‌شود.

سرعت میدان دوار ماشین‌های القایی را با n_s نمایش می‌دهند و آن را سرعت سنکرون می‌نامند.

سرعت میدان دوار متناسب با فرکانس است بنابراین

می‌نویسیم:

$$n_s \propto f$$

از آنجا که جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها در یک دوره تناوب

فقط یکبار تغییر جهت می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که قطب‌های S و N میدان دوار در این مدت فقط یکبار عوض می‌شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی که قطب‌ها (360°) درجه) محیط استاتور را اشغال کرده‌اند در یک دوره تناوب، میدان دوار یک دور محیط استاتور را طی می‌کند در حالی که در یک ماشین چهار قطبی که هر دو قطب آن (180°) درجه) محیط استاتور را اشغال کرده است در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها نیم دور (180°) درجه) محیط استاتور را طی می‌کند. پس می‌توان نتیجه گرفت، افزایش تعداد قطب‌های استاتور باعث کم شدن سرعت میدان دوار می‌شود.

بنابراین عامل دیگر تعیین کننده سرعت میدان دوار، تعداد قطب‌های سیم‌بندی ماشین‌های القایی می‌باشد.

با مراجعه به جدول (۳) دیده می‌شود که میدان دوار ماشین ۴ قطبی در مقایسه با ماشین ۲ قطبی در یک دوره تناوب نیم دور محیط استاتور را طی می‌کند.

با توجه به جدول (۳) سرعت میدان دوار با رابطه $\frac{2}{P}$ متناسب است.

$$n_s \propto \frac{2}{P}$$

p تعداد قطب‌ها

n_s سرعت میدان دوار

جدول ۳- اثر افزایش تعداد قطب ماشین‌های القایی بر سرعت رتور

تعداد قطب‌ها	محیط اشغال شده توسط یک جفت قطب	چرخش میدان در یک دوره تناوب
۲	$\frac{360^\circ}{2} = \frac{360^\circ}{1} = 360^\circ$	$\frac{2}{2} = 1$ یک دور کامل
۴	$\frac{360^\circ}{4} = \frac{360^\circ}{2} = 180^\circ$	$\frac{2}{4} = \frac{1}{2}$ نیم دور
۶	$\frac{360^\circ}{6} = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$	$\frac{2}{6} = \frac{1}{3}$ ثلث دور
...
p	$\frac{360^\circ}{P}$	$\frac{2}{P}$ دور

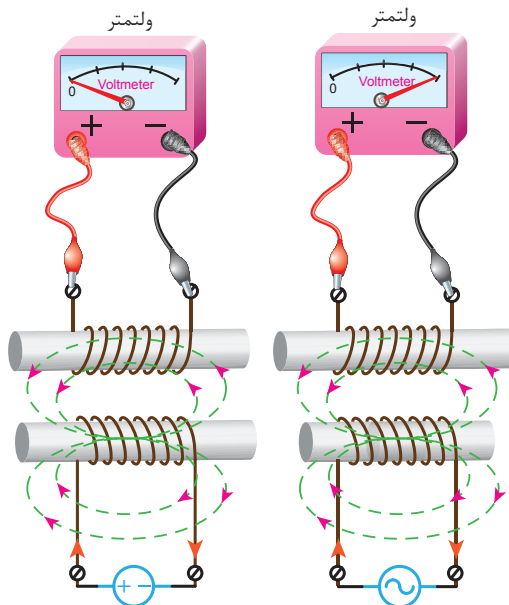
خود را بیازمایید



- ۱- در ماشین القایی هر چقدر دوره تناوب بزرگ تر باشد سرعت میدان دوار است.
- ۲) چرا در ماشین‌های القایی هر چقدر تعداد قطب‌ها بیشتر باشد سرعت میدان دوار کمتر می‌شود؟
- ۳) سرعت میدان دوار ماشین القایی ۱۰۰۰ RPM و فرکانس شبکه ۵۰ Hz می‌باشد. تعداد قطب‌های ماشین را به دست آورید.

۳-۶- نحوه ایجاد چرخش رتور در موتورهای القایی

تغییرات فوران عامل ایجاد نیروی محرکه القایی در سیم پیچ است. از آنجاکه جریان DC فوران با مقدار ثابت تولید می‌کند لذا سیم پیچ حامل جریان DC در سیم پیچ مجاور خود نیروی محرکه القایی نمی‌کند.



شکل ۱۷- ایجاد ولتاژ القایی با ولتاژ متناوب (سمت راست) عدم ایجاد ولتاژ القایی با ولتاژ جریان مستقیم (سمت چپ)

رابطه سرعت میدان دوار با در نظر گرفتن هر دو عامل فرکانس و تعداد قطب‌های سیم پیچی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$n_s = \frac{2 \times f}{p} \quad (3-1)$$

(n_s بر حسب دور در ثانیه)

سرعت میدان دوار در رابطه (۳-۱) بر حسب دور بر ثانیه می‌باشد ولی از آنجا که سرعت ماشین‌های دوار را معمولاً بر حسب دور بر دقیقه (RPM) نمایش می‌دهند، لذا رابطه سرعت میدان دوار به صورت رابطه (۳-۲) خواهد شد.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (3-2)$$

در رابطه (۳-۲):

n_s سرعت میدان دوار بر حسب RPM

f فرکانس شبکه برق بر حسب Hz

P تعداد قطب‌های سیم‌بندی ماشین القایی

به یاد داشته باشید که فرکانس در شبکه‌های برق ثابت است در نتیجه حداکثر سرعت میدان دوار در ماشین القایی دو قطبی ایجاد می‌شود.

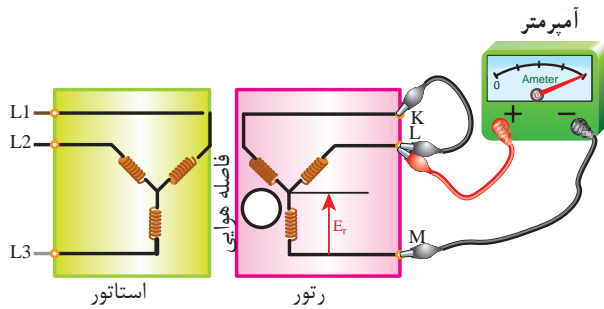
مثال: سرعت میدان دوار یک ماشین ۲ قطبی در شبکه برق

ایران با فرکانس (۵۰ Hz) چقدر است؟

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ RPM}$$

این سرعت بیشترین مقداری است که میدان دوار ماشین القایی در اتصال به شبکه برق کشور ایران می‌تواند داشته باشد.

که سیم پیچ استاتور به برق اتصال داشته باشد رتور به حرکت خود ادامه خواهد داد.

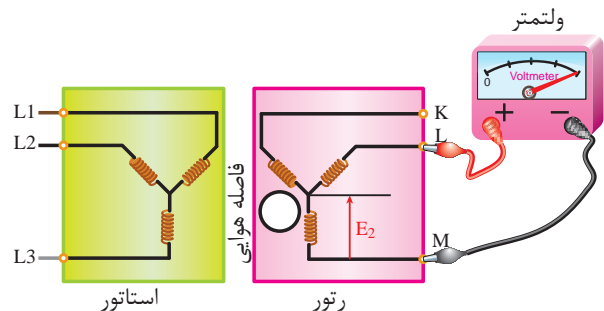


شکل ۱۹- مدار الکتریکی ماشین القایی رتور سیم پیچی شده در حالی که استاتور آن توسط منبع سه فاز برقرار و مدار رتور آن اتصال کوتاه است

ولتاژ القاء شده در مدار بسته رتور باعث جاری شدن جریان در سیم پیچ‌های آن می‌شود.

آمپر متر شکل (۱۹) جریان یکی از فازهای سیم پیچ رتور را نشان می‌دهد. این جریان را I_r نامند و آن را با I_r نمایش می‌دهند.

با اتصال سیم پیچ استاتور ماشین القایی رتور سیم پیچی شده به منبع ولتاژ متناوب و ایجاد میدان دوار در استاتور طبق قانون القای فارادی، نیروی محرکه‌ای متناسب با آهنگ تغییرات فوران در سیم پیچ‌های رتور القاء خواهد شد. اما، با باز بودن مدار خروجی K, L, M رتور شکل (۱۸)، رتور حرکت نمی‌کند و با قرار دادن یک ولت متر مطابق شکل (۱۸) در دو سر سیم پیچی رتور می‌توان مقدار نیروی محرکه القایی سیم پیچی رتور را اندازه گرفت. از آنجا که رتور در این حالت ساکن است و چرخش ندارد، این نیروی محرکه القایی را ولتاژ حالت سکون رتور می‌نامند و آن را با E_r نمایش می‌دهند.



شکل ۱۸- مدار الکتریکی ماشین القایی رتور سیم پیچی شده در حالی که استاتور آن توسط منبع سه فاز برقرار گردیده و مدار رتور آن باز است

در واقع با ایجاد میدان دوار استاتور، نیروی محرکه E_r در سیم پیچی رتور القاء می‌شود ولی از آنجا که جریانی از مدار رتور عبور نمی‌کند در نتیجه نیروی لورنس هم به سیم پیچی رتور وارد نمی‌شود.

در صورتی که بخواهیم به رتور نیروی لورنس وارد شود باید در سیم پیچی رتور جریان جاری شود. بنابراین اگر حلقه‌های خروجی مدار رتور مطابق شکل (۱۹) به یکدیگر اتصال داده شوند و آمپر متر در مسیر M و L قرار گیرد، مدار رتور بسته می‌شود و در سیم پیچی رتور جریان جاری می‌شود و نیروی لورنس پدید می‌آید لذا رتور حول محورش می‌گردد و تا زمانی

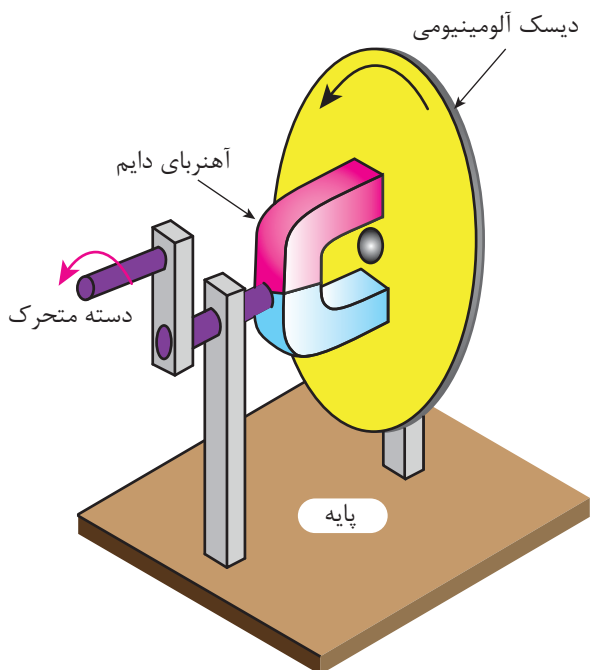
خود را بیازمایید



- ۱- چرا برای به چرخش در آمدن رتور ماشین القایی علاوه بر میدان دوار، سیم پیچی رتور نیز باید حامل جریان باشد؟
- ۲- منظور از ولتاژ حالت سکون در ماشین القایی با رتور سیم پیچی شده چیست؟
- ۳- هرچقدر اختلاف سرعت رتور و میدان دوار کمتر باشد ولتاژ القایی در رتور است.

۷-۳- موتورهای القایی رتور قفس سنجابی

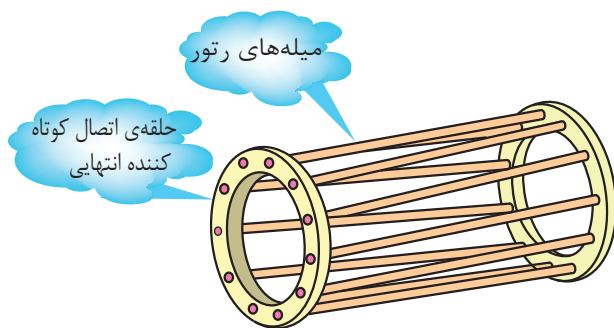
شکل (۲۰) چگونگی چرخش رتور قفسی در موتورهای القایی را به سادگی نمایش داده است. شما می‌توانید با تهیه وسایل نشان داده شده، این آزمایش را انجام دهید. در این آزمایش با چرخاندن دسته متحرک، آهنربای دائم می‌چرخد و در پی آن دیسک آلومینیومی نیز که اندکی از آهنربا فاصله دارد به حرکت در می‌آید.



شکل ۲۰- یک وسیله ساده برای فهم بهتر اثر میدان دوار در چرخش دیسک

آیا با توجه به چرخش میدان و تغییر میدان مغناطیسی در دیسک آلومینیومی مطابق آنچه در شکل (۲۰) می‌بینید، می‌توان نتیجه گرفت که عامل چرخش دیسک القای نیروی محرکه و ایجاد جریان القایی در آن است؟

در شکل (۲۱) ابتدا و انتهای مفتول‌ها به یکدیگر متصل و در نتیجه مدار اتصال کوتاه شده‌ای در هادی‌های رتور ایجاد شده است و از آنجا که شکل ایجاد شده شبیه یک قفس است، به همین دلیل به رتور شکل (۲۱) رتور قفسی می‌گویند. برای ساختن این نوع رتور ابتدا ورقه‌های هسته رتور را کنار یکدیگر قرار می‌دهند تا هسته یکپارچه رتور تشکیل شود سپس



شکل ۲۱- ساختمان رتور قفسی (سمت راست) رتور کامل با معرفی اجزای آن (سمت چپ)

ماشین‌های القایی قفس سنجایی از نظر ساختمان ساده تر و از نظر اقتصادی به صرفه تر از ماشین‌های رتور سیم‌پیچی شده هستند و کمتر به تعمیر و نگهداری احتیاج دارند.

آلومینیوم و یا گاهی مس ذوب شده را به داخل هسته رتور تزریق می‌نمایند. ماده مذاب تزریق شده در هسته پس از سرد شدن به شکل مفتول‌هایی درمی‌آیند که در داخل هسته قالب‌گیری شده است. لذا این هادی‌ها نسبت به هسته عایق نیستند.

خود را بیازمایید

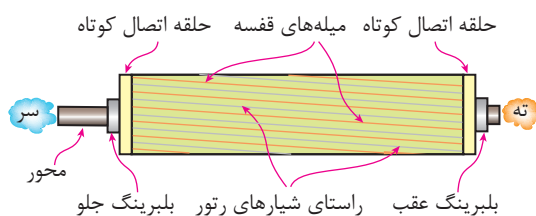
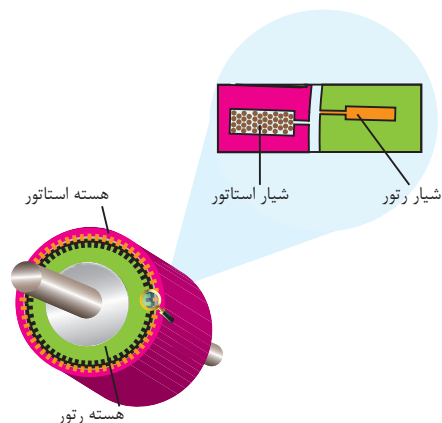


– وظیفه دو حلقه ای که در طرفین میله‌های رتور قفسی به مفتول‌ها متصل می‌شوند، چیست؟

تحقیق کنید



چرا جریان القاشده در هادی‌های رتور قفسی با اینکه رتور عایق نشده است، به بدنه ماشین منتقل نمی‌شود؟



شکل ۲۲- نمایش انحراف شیارهای رتور نسبت به امتداد شیارهای استاتور

۸-۳- لغزش در ماشین‌های القایی

در ماشین القایی به اختلاف سرعت رتور (n_r) با سرعت میدان دوار (n_s) سرعت لغزش می‌گویند. و آن را با رابطه (۳-۳) نشان می‌دهند.

$$\Delta n = n_s - n_r \quad (3-3)$$

از آنجا که سرعت رتور متغیر است لذا سرعت لغزش هم به تناسب آن تغییر می‌کند. نسبت سرعت لغزش به سرعت میدان دوار را لغزش می‌گویند و آن را با S نمایش می‌دهند.

$$S = \frac{\Delta n}{n_s} \quad (3-4)$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3-5)$$

معمولاً لغزش را در ماشین‌های القایی به صورت درصد نمایش می‌دهند و آن را از رابطه زیر محاسبه می‌کنند.

$$\% S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100$$

از آنجا که شکل (۲۱) شبیه قفس سنجاب به نظر می‌رسد، ماشین‌های القایی که ساختمان رتور آنها این گونه است را قفس سنجایی نیز می‌گویند.

مطابق شکل (۲۲) در اغلب ماشین‌های القایی شیارهای رتور با محور ماشین موازی نیستند یعنی شیارها نسبت به محور ماشین مورب است. این عمل باعث کاهش سر و صدای رتور در زمان چرخش آن می‌شود. معمولاً انحراف شیارهای رتور به اندازه پهنای یک شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود. در ماشین‌های القایی با شیارهای مورب، راه‌اندازی سریعتر بوده و قابلیت تحمل اضافه بار در چنین ماشین‌هایی بیشتر است.

هنگام راه اندازی سرعت رتور صفر است ولی میدان دوار با سرعت سنکرون می چرخد. بنابراین خواهیم داشت :

$$n_r = 0 \Rightarrow S = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1$$

$$\Delta n = n_s$$

لغزش ماشین در زمان راه اندازی برابر ۱ یا ۱۰۰٪ است.

۲-۹-۳ لغزش در سرعت سنکرون : اگر رتور

بتواند با سرعتی برابر سرعت سنکرون و یا با همان سرعت میدان دوار گردش کند لغزش ماشین صفر می شود.

$$n_r = n_s \Rightarrow S = \frac{n_s - n_s}{n_s} = 0$$

$$\Delta n = 0$$

این کار زمانی امکان پذیر است که رتور ماشین القایی به کمک یک نیروی محرکه خارجی به اندازه سرعت میدان دوار در همان جهت چرخانده شود.

لغزش ماشین القایی در سرعت سنکرون صفر است.

۳-۹-۳ لغزش موتور در حین کار : رتور موتور

القایی پس از راه اندازی دور می گیرد و سرعت آن به تدریج افزایش می یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور با سرعت میدان دوار کم می شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است می تواند ادامه یابد. زیرا اگر سرعت رتور با میدان دوار برابر شود، میدان استاتور هم نمی تواند هادی های رتور را قطع نماید و در نتیجه نیرویی به رتور وارد نمی شود. با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یاتاقان ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می شود. از آنجا که در موتورهای القایی بین

مثال رتور موتور القایی چهار قطب در فرکانس ۵۰ HZ با سرعت ۱۴۵۰ RPM می چرخد مطلوب است. سرعت لغزش و لغزش این موتور القایی :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ RPM}$$

$$\Delta n = n_s - n_r = 1500 - 1450 = 50 \text{ RPM}$$

$$S = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{50}{1500} = 0.033$$

$$0.033 \times 100 = 3\%$$

با توجه به رابطه (۳-۵) می توان نوشت :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow s n_s = n_s - n_r \Rightarrow n_r = n_s - s n_s$$

$$n_r = n_s (1 - s) \quad (3-6)$$

از رابطه (۳-۶) برای محاسبه سرعت رتور می توان استفاده نمود.

مثال اگر لغزش یک موتور القایی چهار قطب در فرکانس ۵۰ HZ، ده درصد باشد، سرعت رتور را محاسبه نمایید.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ RPM}$$

$$S = 10\% = \frac{10}{100} = 0.1$$

$$n_r = n_s (1 - S) = 1500 \cdot (1 - 0.1) = 1350 \text{ RPM}$$

۹-۳ رفتار ماشین های القایی در لغزش های مختلف

در بخش قبل گفته شد که لغزش ماشین القایی با مقادیر مختلف سرعت رتور تغییر می کند. در این قسمت مقادیر لغزش در سرعت های متفاوت رتور بررسی می گردد.

۱-۹-۳ لغزش در زمان راه اندازی : به محض

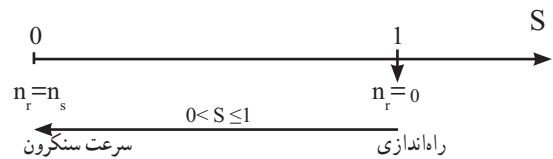
اتصال سیم پیچ های استاتور ماشین القایی سه فاز به برق یعنی

این وضعیت را در ماشین‌های القایی حالت ژنراتوری می‌نامند.
۳-۹-۵- لغزش‌های بزرگ‌تر از واحد (بیش از ۱۰۰٪): شکل (۲۴) یک ماشین القایی را نشان می‌دهد که توسط کلید راستگرد، چپگرد سه فاز به شبکه برق متصل است. اگر این ماشین به حالت موتوری در جهت راستگرد راه‌اندازی شود، رتور آن راستگرد می‌چرخد. حال چنانچه موتور به وسیله کلید ابتدا از شبکه قطع شود و بلافاصله به طور لحظه‌ای چپگرد راه‌اندازی گردد، میدان دوار آن چپگرد شده و سرعت رتور سریعاً به صفر می‌رسد. در نتیجه با توجه به جهت گردش رتور در حالت راستگرد پیش از ایستادن رتور، میدان دوار به حالت چپگرد در آمده و در نتیجه اختلاف سرعت رتور با سرعت سنکرون افزایش می‌یابد و لذا مقدار لغزش بیش از واحد خواهد شد. به این وضعیت عملکرد، حالت ترمزی ماشین‌های القایی می‌گویند.

سرعت میدان دوار و سرعت رتور همواره اختلاف وجود دارد در نتیجه به آنها موتورهای آسنکرون^۱ نیز گفته می‌شود.

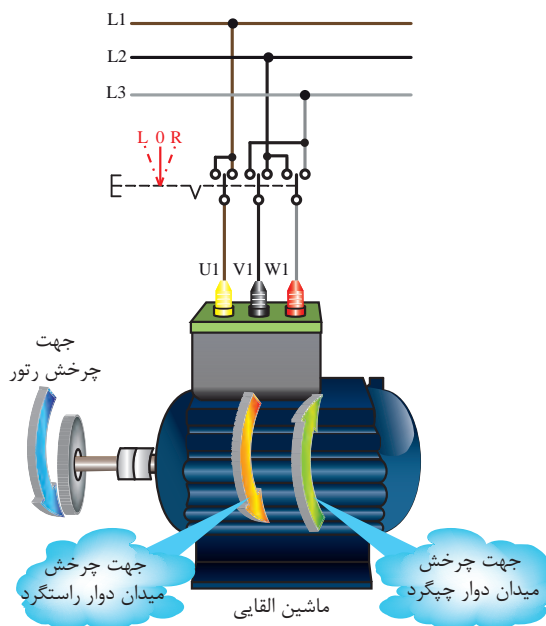
لغزش موتور القایی در حین کار کمتر از لغزش زمان راه‌اندازی است.

لغزش موتور القایی در حین کار بیش از لغزش در سرعت سنکرون است.



۳-۹-۴- لغزش منفی: اگر محور رتور ماشین

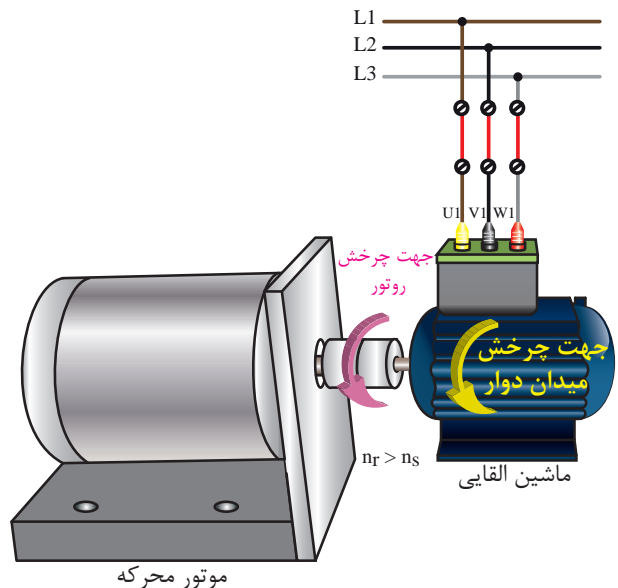
القایی متصل شده به شبکه برق توسط وسیله‌ای با سرعتی بیش از سرعت سنکرون در جهت چرخش میدان دوار چرخانده شود، بنابراین طبق رابطه (۳-۵) چون $n_r > n_s$ می‌باشد مقدار لغزش منفی خواهد شد.



شکل ۲۴ - نمایش حالت ترمزی ماشین القایی

مطابق رابطه (۳-۵) داریم:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow S = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = \frac{n_s + n_r}{n_s} > 1$$



شکل ۲۳ - نمایش حالت مولدی ماشین القایی

۱- غیر هم‌زمان

ماشین القای در لغزش‌های بزرگ‌تر از واحد، رفتار ترمزی دارد.



خود را بیازمایید

- ۱- با افزایش سرعت رتور، مقدار سرعت لغزش می‌یابد.
- ۲- رفتار ماشین القایی را در لحظه راه‌اندازی تشریح کنید.
- ۳- آیا امکان دارد موتور القایی در سرعت سنکرون قرار گیرد؟ چرا؟
- ۴- در ماشین‌های القایی اگر رتور با سرعتی بیشتر و در جهت میدان دوار بچرخد، ماشین در ناحیه کار کرده و لغزش آن است.
- ۵- سرعت چرخش رتور موتور القایی ۴ قطب در شبکه 50 HZ برابر با 1425 RPM می‌باشد لغزش آن را به اعشار و درصد محاسبه کنید.
- ۶- لغزش موتور القایی که محور آن با سرعت 2500 RPM می‌گردد برابر با $1/5$ می‌باشد. سرعت میدان دوار آن چقدر است؟

۱-۱-۳- فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور: موتور

القایی مانند ترانسفورماتوری است که سیم پیچ اولیه آن سیم پیچ استاتور و ثانویه آن هادی‌های رتور است. اما مهم‌ترین تفاوتی که بین آنها وجود دارد یکسانی فرکانس برق در دو سمت ترانسفورماتور و تفاوت فرکانس برق در استاتور و رتور موتورهای القایی است. زیرا با توجه به امکان گردش رتور موتورهای القایی، فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور یعنی (f_r) تغییر نموده و تابع سرعت رتور ماشین می‌باشد.

فرکانس ولتاژ مدار رتور با کاهش سرعت لغزش

کم و با افزایش آن زیاد می‌شود. $(\Delta n = n_s - n_r)$

در واقع تنها در صورت ساکن بودن رتور، فرکانس ولتاژ استاتور و رتور برابر است و با افزایش سرعت رتور چون سرعت لغزش کاهش می‌یابد، فرکانس ولتاژ القایی رتور نیز کم می‌شود. سرعت میدان دوار و رتور در سرعت سنکرون برابر می‌باشند. بنابراین مقدار فرکانس ولتاژ مدار رتور در شرایطی که اختلاف سرعت بین میدان دوار و رتور وجود ندارد، صفر است. همچنین در حالت سکون ماشین القایی نیز سرعت لغزش به اندازه میدان دوار است در نتیجه فرکانس ولتاژ مدار رتور با فرکانس منبع برابر می‌باشد. بنابراین در لغزش واحد فرکانس ولتاژ مدار رتور با فرکانس میدان دوار برابر است. در سرعت‌هایی هم که بین نقطه سکون و سرعت سنکرون وجود دارد، مقدار فرکانس ولتاژ مدار رتور متناسب با سرعت لغزش مطابق رابطه (۳-۷) به صورت خطی تغییر می‌کند.

$$f_r = S f \quad (3-7)$$

در رابطه (۳-۷)،

f_r فرکانس ولتاژ مدار رتور

S لغزش

f فرکانس ولتاژ استاتور

سوال در سرعت سنکرون، f_r ماشین القایی چقدر می‌شود؟

۱-۱-۳- کمیت‌های الکتریکی رتور

برای استفاده از موتور القایی باید رفتار آن را در مواردی همچون راه‌اندازی، ترمز و کنترل دور بتوان پیش‌بینی نمود. لذا ضروری است که کمیت‌های الکتریکی رتور مورد بررسی قرار گیرند. هر یک از کمیت‌های الکتریکی رتور متناسب با لغزش به گونه‌ای خاص تغییر می‌کنند.

۱- به همین خاطر گاهی به ترانسفورماتورها ماشین‌های الکتریکی ساکن نیز می‌گویند.

با افزایش سرعت رتور، لغزش کم می‌شود و چون هادی‌های رتور با سرعت کمتری توسط میدان قطع می‌شوند، نیروی محرکه القایی رتور کاهش می‌یابد.

نیروی محرکه القایی هر فاز مدار رتور را با E_r نمایش می‌دهند. این نیروی محرکه با افزایش یا کاهش لغزش به‌طور خطی اضافه و یا کم می‌شود و از رابطه (۳-۹) پیروی می‌کند.

$$E_r = SE_p \quad (3-9)$$

خود را بیازمایید



۱- رفتار موتور القایی در چه شرایطی شبیه ترانسفورماتور می‌باشد؟

۲- در ماشین القایی فرکانس رتور به چه عواملی بستگی دارد؟

۳- ولتاژ القایی رتور در لحظه راه‌اندازی..... و در سرعت سنکرون برابر با..... می‌باشد.

۴- راکتانس القایی مدار رتور از زمان راه‌اندازی تا سرعت سنکرون چگونه تغییر می‌کند؟

۵- یک موتور القایی 50° Hz دارای راکتانس القایی $1/6 \Omega$ و مقاومت اهمی 5Ω و ولتاژ القایی 30 V در لحظه راه‌اندازی می‌باشد. کمیت‌های فوق در لغزش 8% چقدر است؟

۵-۱-۳- امیدانس رتور: هادی‌های رتور ماشین

القایی، دارای مقاومت اهمی R_r و همچنین راکتانس القایی X_r می‌باشند. بنابراین اثر با هم بودن آنها در مدار جریان متناوب می‌تواند معادل یک مدار سری $R-L$ در نظر گرفته شود. در نتیجه امپدانس این مدار مفروض مربوط به رتور بوده و آن را با Z_r نمایش می‌دهند.

۲-۱-۳- راکتانس رتور: با عبور جریان از مفتول

و یا سیم‌پیچ‌های رتور، در اطراف آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و چون اطراف هادی‌ها را هسته آهنی رتور فرا گرفته است، اثر القایی ناشی از جریان عبوری از آن افزایش می‌یابد. بدین سبب در مدار رتور اثر سلفی (راکتانس القایی) نیز وجود دارد که آن را با X_r نمایش می‌دهند. اثر راکتانس سلفی با فرکانس جریان عبوری از آن رابطه مستقیم دارد^۱. بنابراین هر چقدر فرکانس رتور کمتر شود (یعنی سرعت رتور به سرعت سنکرون نزدیک‌تر شود) راکتانس آن نیز کاهش می‌یابد.

با توجه به رابطه راکتانس سلفی و فرکانس رتور نتیجه می‌گیریم:

$$X_r = 2\pi f_r L_r$$

$$f_r = Sf$$

$$X_r = 2\pi S f L_r = S \underbrace{2\pi f L_r}_{X_p} \Rightarrow$$

$$X_r = S X_p$$

راکتانس رتور ماشین القایی در زمان راه‌اندازی را با X_p نشان می‌دهند.

۳-۱-۳- مقاومت مدار رتور: از آنجا که هادی‌های

رتور ماشین القایی دارای طول و سطح مقطع معینی هستند لذا مقدار مقاومت اهمی ثابتی دارند. مقدار مقاومت اهمی هر فاز مدار رتور را با R_p نشان می‌دهند.

۴-۱-۳- ولتاژ رتور: پیش از این چگونگی ایجاد

نیروی محرکه القایی در مدار رتور بیان گردید^۲ و ملاحظه شد که با ایجاد میدان دوار استاتور، در مدار رتور، نیروی محرکه القا می‌شود.

البته باید توجه داشت که در زمان راه‌اندازی موتور القایی

بیشترین نیروی محرکه در مدار رتور القاء می‌گردد. زیرا لغزش 100% است. این ولتاژ را ولتاژ حالت سکون رتور می‌نامند و آن را با E_p نمایش می‌دهند.

۱- $X_r = 2\pi f_r L_r$

۲- اساس کار ماشین‌های الکتریکی و پدیده میدان دوار

بیشتر بدانید



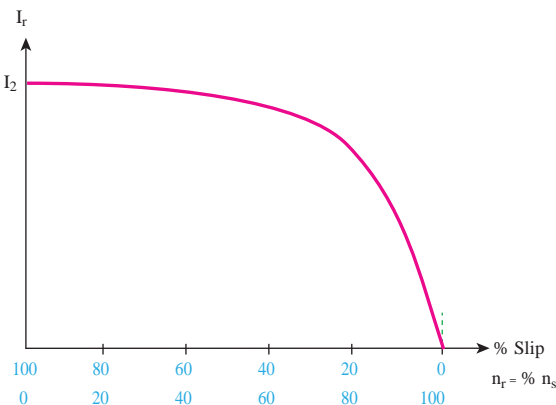
اما از آنجایی که با تغییر لغزش در مدار شکل (۲۶-الف) هر دو کمیت (E_r, X_r) با هم تغییر می کنند برای سهولت در تحلیل مدار معادل الکتریکی رتور می توان مقادیر مربوط به کمیت های (E_r, X_r) را در رابطه (۳-۱۲) قرار داده و به رابطه (۳-۱۳) رسید.

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} \Rightarrow I_r = \frac{SE_r}{\sqrt{R_r^2 + (SX_r)^2}}$$

$$\Rightarrow I_r = \frac{SE_r}{S \sqrt{\left(\frac{R_r}{S}\right)^2 + X_r^2}}$$

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{S}\right)^2 + X_r^2}} \quad (3-13)$$

شکل (۲۶-ب) مدار معادل الکتریکی رتور را بر اساس رابطه (۳-۱۳) نشان می دهد. در این رابطه تنها کمیت متغیر لغزش است. نمودار این رابطه در شکل (۲۷) نشان داده شده است.



شکل ۲۷ - منحنی تغییر جریان رتور بر حسب تغییرات لغزش و سرعت رتور

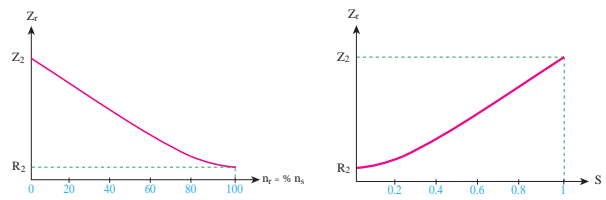
با جایگزینی رابطه (۳-۱۰) را کتانس رتور در رابطه امپدانس مدار L-R سری داریم:

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + X_r^2} \quad (3-10)$$

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + (SX_r)^2} \quad (3-11)$$

می توان نمودار تغییرات امپدانس مدار رتور را بر اساس لغزش مطابق رابطه (۳-۱۰) ترسیم نمود.

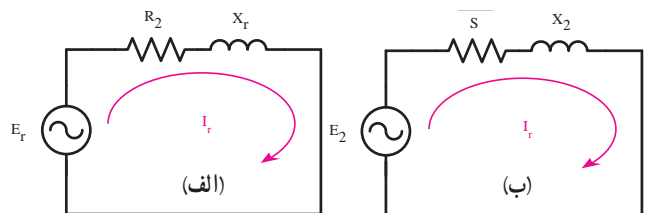
البته لازم به یادآوری است، تغییرات امپدانس بر حسب فرکانس مدار R-L سری را در درس مدارهای الکتریکی خوانده اید. این تغییرات با توجه به رابطه (۳-۱۱) خطی نیست. نمودار شکل (۲۵) بر اساس تغییر لغزش و تأثیر آن بر امپدانس مدار رتور ترسیم شده است و نشان می دهد که این امپدانس به صورت منحنی (غیر خطی) تغییر می نماید.



شکل ۲۵ - منحنی تغییر امپدانس رتور بر حسب تغییرات لغزش و سرعت رتور

۶-۱۰-۳- جریان رتور: در صورت بسته بودن مسیر سیم پیچ یا هادی های مدار رتور از آن جریان جاری می شود. میزان جریان عبوری از مدار رتور به ولتاژ القاء شده و امپدانس مدار رتور وابسته است. رابطه (۳-۱۲) با توجه به مدار معادل شکل (۲۶-الف) به دست می آید:

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} = \frac{E_r}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}} \quad (3-12)$$



شکل ۲۶ - مدار معادل الکتریکی یک فاز رتور

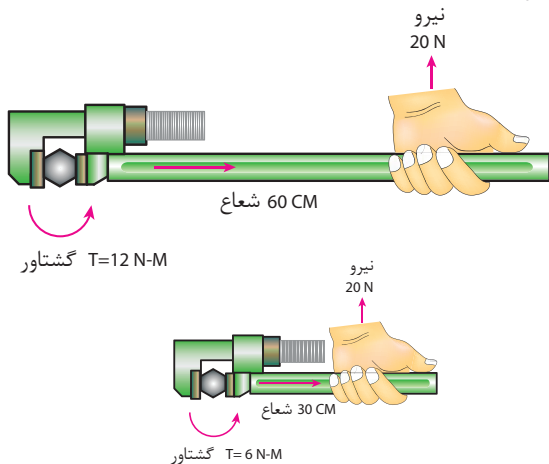
خود را بیازمایید



- ۱- جریان رتور در سرعت سنکرون چقدر است؟ چرا؟
- ۲- مقدار ضریب قدرت مدار رتور در سرعت سنکرون چقدر است؟
- ۳- مقاومت‌های اهمی و راکتانس القایی رتور یک موتور القایی در راه‌اندازی به ترتیب ۶/۰ و ۲ اهم می‌باشد. اگر ولتاژ القایی رتور در زمان راه‌اندازی ۴۲ ولت باشد، جریان رتور را در راه‌اندازی و در لغزش ۱۵/۰ به دست آورید.
- ۴- با توجه به داده‌های سؤال ۳ ضریب قدرت رتور را در حالات زیر به دست آورید:
الف) در لحظه راه‌اندازی (ب) در لغزش ۵/۰

۳-۱۱- گشتاور ماشین‌های القایی

به شکل (۲۹) توجه کنید. با کدام آچار باز کردن پیچ آسانتر است؟



شکل ۲۹- مقایسه گشتاور وارد شده به پیچ

در واقع گشتاور وابسته به نیرویی است که در فاصله مشخص، به جسم وارد می‌شود تا آن را حول یک محور بچرخاند. در شکل (۲۹) با اعمال گشتاور به پیچ، پیچ می‌چرخد.

با توجه به نمودار شکل (۲۷) مشاهده می‌شود که جریان رتور در سرعت سنکرون به صفر می‌رسد. یعنی در این سرعت هیچ جریانی از مدار رتور عبور نمی‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در سرعت سنکرون به دلیل عدم عبور جریان از رتور، هیچ نیرویی به رتور وارد نمی‌شود. همچنین با افزایش لغزش، جریان و به دنبال آن تلفات رتور افزایش می‌یابد.

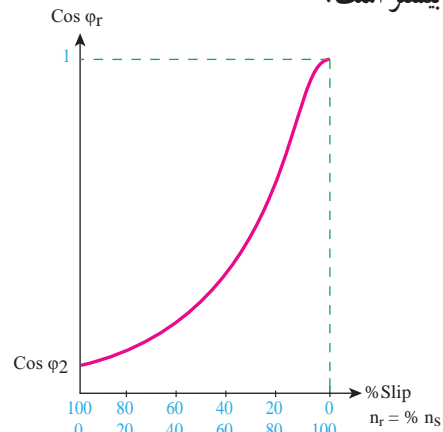
۱-۰-۳- ضریب قدرت مدار رتور: ضریب قدرت مدار R-L سری شکل (۲۶- الف) با رابطه (۳-۱۴) تعریف می‌شود.

$$\cos \phi_r = \frac{R_r}{Z_r} \quad (3-14)$$

که با جایگذاری مقدار Z_r در رابطه فوق می‌توان نوشت:

$$\cos \phi_r = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (S X_r)^2}} \quad (3-15)$$

در لحظه راه‌اندازی ضریب قدرت ماشین مقداری ثابت خواهد داشت ولی با افزایش بی در پی سرعت (کاهش لغزش)، راکتانس سلفی مدار رتور (X_r) به طور غیر خطی کاهش می‌یابد به طوری که در سرعت سنکرون امپدانس مدار رتور برابر با مقدار R_r می‌شود و در نتیجه ضریب قدرت مدار رتور به مقدار واحد می‌رسد. ضریب قدرت مدار رتور در لحظه راه‌اندازی را با $\cos \phi_r$ نمایش می‌دهند. هر چه ضریب قدرت رتور موتور القایی در زمان راه‌اندازی بیشتر باشد، گشتاور راه‌اندازی موتور به نسبت بیشتر است.



شکل ۲۸- منحنی تغییرات ضریب قدرت بر حسب تغییرات لغزش و سرعت

میدان‌های استاتور و رتور و اختلاف فاز بین آن دو می‌باشد.

بیشتر بدانید



$$T \propto B_s B_r \cos \varphi_r \quad (3-16)$$

تقابل دو میدان استاتور (B_s) و رتور (B_r) را برای ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می‌توان به صورت رابطه (۳-۱۷) نوشت.

$$T = K_s B_s B_r \cos \varphi_r \quad (3-17)$$

B_s چگالی میدان مغناطیسی استاتور

B_r چگالی میدان مغناطیس رتور

T گشتاور کار ماشین القایی

\propto علامت تناسب

وابستگی ولتاژ القایی رتور به میدان مغناطیسی استاتور را می‌توان با رابطه (۳-۱۸) نشان داد.

$$E_r \propto B_s \Rightarrow E_r = K_s B_s$$

$$B_s = \frac{1}{K_s} E_r \Rightarrow$$

$$B_s = K_r E_r \quad (3-18)$$

چگالی میدان مغناطیس رتور نیز متناسب با جریان رتور می‌باشد بنابراین:

$$B_r \propto I_r \Rightarrow B_r = K_r I_r \quad (3-19)$$

از جایگزینی روابط (۳-۱۸) و (۳-۱۹)

در رابطه (۳-۱۷) خواهیم داشت:

$$T = K_s B_s B_r \cos \varphi_r \Rightarrow T = \frac{K_s K_r K_r}{K} E_r I_r \cos \varphi_r$$

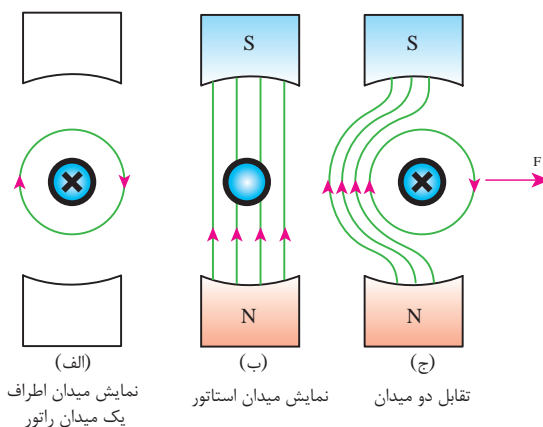
$$T = K E_r I_r \cos \varphi_r$$

$$T = K S E_r \times \frac{E_r}{\sqrt{R_r^2 + (S X_r)^2}} \times \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (S X_r)^2}}$$

$$T = K E_r^2 \times \frac{S R_r}{R_r^2 + (S X_r)^2} \quad (3-20)$$

برای چرخش رتور در ماشین‌های القایی نیز به گشتاور احتیاج است. این گشتاور بر اثر نیروی الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. همانطور که در شکل (۳-۰) الف و ب) نشان داده شده است میدان استاتور و یارتور به تنهایی برای وارد شدن نیرو به رتور کافی نیست و لازم است برای ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی دو میدان مغناطیسی برهم اثر نمایند.

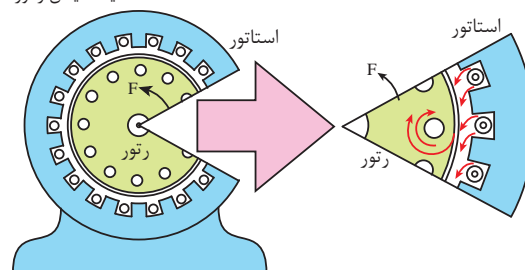
در شکل (۳-۰) ج و د)، مشاهده می‌شود که گشتاور وارد شده به رتور و گردش آن، با اثر متقابل دو میدان ایجاد شده است. این دو میدان یکی توسط جریان استاتور و دیگری ناشی از جریان رتور می‌باشد.



نمایش میدان اطراف یک میدان رتور

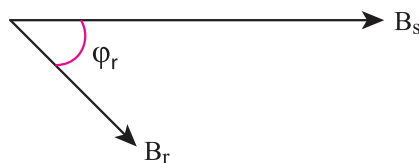
نمایش میدان استاتور

تقابل دو میدان



شکل ۳-۰ نحوه تولید گشتاور در موتور القایی

میدان‌های استاتور و رتور هر یک دارای اندازه و جهت مشخصی می‌باشند، پس می‌توان آنها را با بردار نمایش داد از طرفی این دو بردار با هم به میزان φ_r اختلاف فاز دارند.



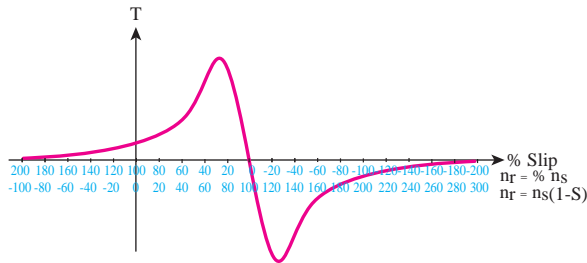
بنابراین عوامل تعیین کننده گشتاور ماشین القایی، اندازه

(۱) رابطه تناسب گشتاور با اندازه میدان‌های استاتور و رتور و اختلاف فاز بین آنها را می‌توان با ضرب یک مقدار ثابت نظیر K_s به تساوی تبدیل نمود.

نتیجه ۱ :

رابطه (۲۰-۳) نشان می دهد که گشتاور ماشین القایی با مجذور نیروی محرکه القایی رتور در حالت سکون (E_p) نسبت مستقیم دارد. از طرفی نیروی محرکه القایی رتور وابسته به ولتاژ ورودی ماشین (ولتاژ استاتور) می باشد. بنابراین گشتاور ماشین القایی با مجذور ولتاژ استاتور نسبت مستقیم دارد.

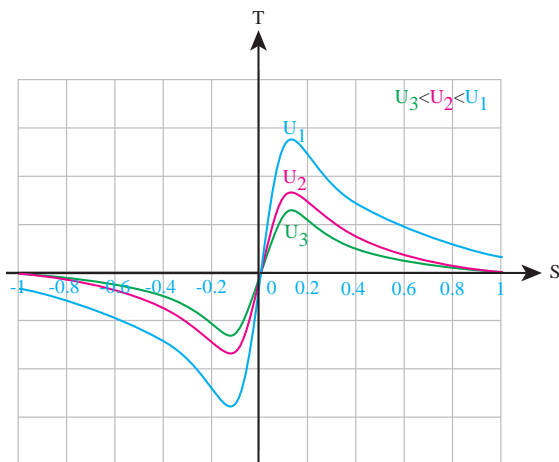
البته از آنجا که در تحلیل ماشین القایی تصور تغییرات سرعت راحت تر است، لذا در اغلب اوقات بجای مشخصه گشتاور بر حسب لغزش شکل (۳۱) از مشخصه گشتاور بر حسب دور شکل (۳۲) استفاده می شود.



شکل ۳۲- منحنی تغییرات گشتاور ماشین القایی بر حسب لغزش و سرعت رتور

نتیجه ۳ :

منحنی شکل (۳۱ و ۳۲) در ولتاژ مشخصی ترسیم شده است. یعنی ولتاژ استاتور ماشین القایی ثابت لحاظ گردیده است. اما با توجه به رابطه (۲۰-۳)، گشتاور ماشین القایی با مجذور ولتاژ استاتور نیز نسبت مستقیم دارد بنابراین با تغییر ولتاژ استاتور، منحنی (گشتاور- دور) $T = f(n_p)$ یا (گشتاور- لغزش) $T = f(S)$ با نسبت مجذوری جابه جا خواهند شد.



شکل ۳۳- اثر تغییرات ولتاژ بر منحنی گشتاور- لغزش ماشین القایی

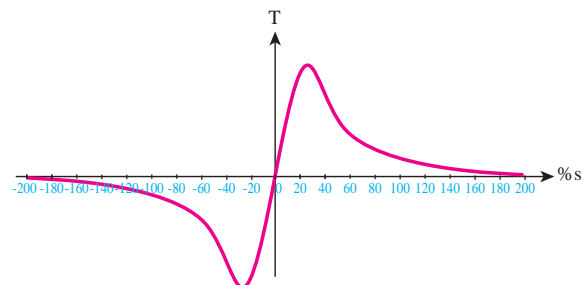
سوال

می توانید بگویید ۲۰ درصد افزایش ولتاژ ورودی باعث چه میزان افزایش در گشتاور ماشین القایی می شود؟

نتیجه ۲ :

از آنجا که کمیت های R_p و X_p همواره مقداری ثابت دارند، با توجه به رابطه (۲۰-۳) اگر ماشین القایی در یک ولتاژ مشخص استفاده شود، تنها عامل تغییر دهنده گشتاور ماشین القایی، لغزش می باشد. لذا با ترسیم تابع تغییرات گشتاور بر اساس تغییرات لغزش در روی صفحه مختصات، منحنی شکل (۳۱) به دست می آید که به عنوان منحنی تغییرات تابع گشتاور نسبت به لغزش $T = f(S)$ شناخته می شود.

توجه: از دانش آموزان انتظار می رود شکل کیفی منحنی های زیر را به خاطر بسپارند.



شکل ۳۱- نمودار تغییرات گشتاور ماشین القایی بر حسب لغزش

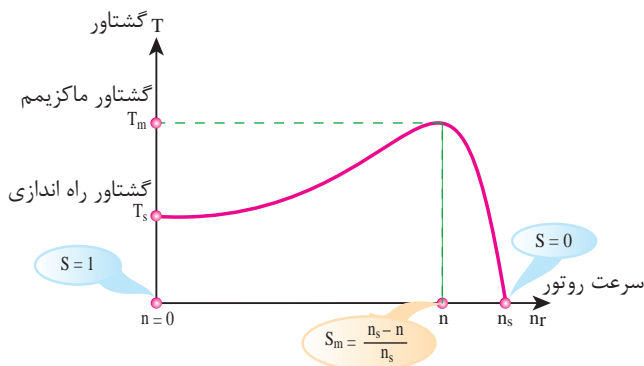
خود را بیازمایید



- ۱- عوامل تعیین کننده گشتاور در ماشین های القایی کدامند؟
- ۲- تنها عامل تغییر دهنده گشتاور ماشین القایی که با ولتاژ ثابت کار می کند چیست؟
- ۳- در یک ماشین القایی، ولتاژ شبکه ۵ درصد کاهش می یابد. گشتاور ماشین چقدر تغییر می کند؟
- ۴- منحنی مشخصه گشتاور - لغزش یک ماشین القایی را در فاصله $(-1 \leq S \leq 0)$ ترسیم نمایید.

۱۳-۳- مشخصه گشتاور - دور موتور القایی

با توجه به شکل (۳۵)، ناحیه عملکرد موتوری ماشین القایی در سرعت $0 < n_r \leq n_s$ و یا $0 \leq S \leq 1$ می باشد. لذا در تحلیل رفتار موتوری فقط همین ناحیه را ترسیم نموده و مورد بررسی قرار می دهند. شکل (۳۵) مشخصه گشتاور - دور موتور القایی را نشان می دهد.



شکل ۳۵- منحنی گشتاور - دور موتور القایی

از مشخصه شکل (۳۵) نکات زیر به دست می آید.

با توجه به وابستگی گشتاور به مجذور ولتاژ ورودی می توان رابطه تناسبی (۳-۲۱) را نوشت.

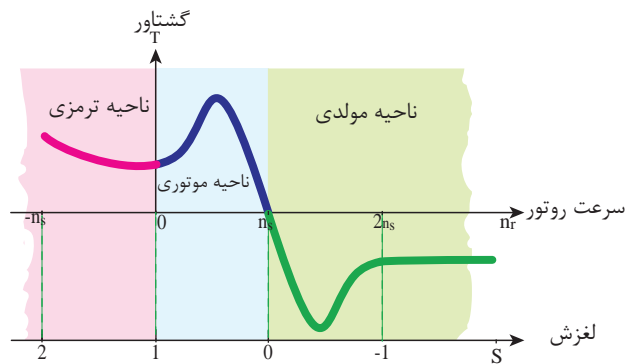
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} \quad (3-21)$$

در رابطه (۳-۲۱)

- T_1 گشتاور ماشین القایی در ولتاژ U_1
 - T_2 گشتاور ماشین القایی در ولتاژ U_2
 - U_1 ولتاژ استاتور ماشین القایی در حالت اول
 - U_2 ولتاژ استاتور ماشین القایی در حالت دوم
- آیا حالا می توانید به سؤال مربوط به نتیجه ۱ به راحتی پاسخ دهید؟

۱۲-۳- ناحیه بندی ماشین القایی بر اساس مشخصه گشتاور - دور

مطابق آنچه در توصیف رفتار ماشین های القایی با توجه به مقادیر مختلف لغزش «بند ۱۰» بیان شد می توان نواحی عملکرد ماشین القایی را بر روی منحنی (گشتاور - دور) و (گشتاور - لغزش) ماشین القایی مشخص نمود. این تقسیم بندی در شکل (۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۴- نواحی مختلف ماشین القایی



نکته ۱: در لحظه راه‌اندازی ($n_r = 0$) و یا $S = 1$) گشتاور برابر مقدار « T_s » است که به عنوان گشتاور راه‌اندازی شناخته می‌شود.



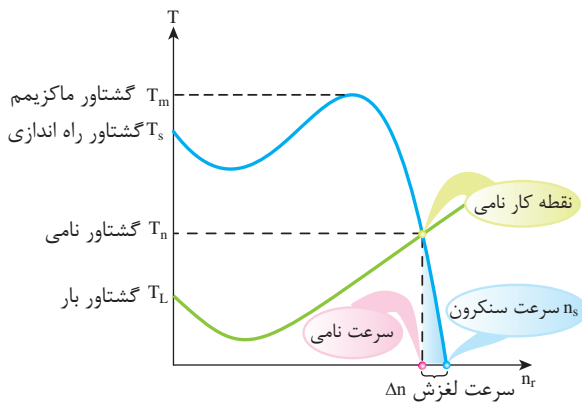
نکته ۲: با کمک روابط ریاضی ثابت می‌شود بیشترین مقدار گشتاور « T_m » در لغزشی معادل با نسبت مقاومت اهمی مدار رتور به راکتانس القایی حالت سکون آن ($\frac{R_2}{X_2}$) اتفاق می‌افتد که آن را لغزش بحرانی می‌نامند.



نکته ۳: از آنجا که در فاصله نقطه T_s تا T_m روی مشخصه گشتاور-دور موتور، افزایش گشتاور و سرعت با هم رخ می‌دهند، بنابراین در این فاصله امکان تثبیت سرعت وجود ندارد. یا به عبارتی موتور در حال افزایش سرعت است.



نکته ۴: هر موتور القایی مقدار مشخصی گشتاور راه‌اندازی « T_s » دارد که به طراحی آن وابسته است. برای چرخاندن هر بار مکانیکی باید به این مقدار گشتاور دقت ویژه داشت. زیرا گشتاور راه‌اندازی موتور القایی باید بیش از گشتاور راه‌اندازی بار مکانیکی باشد تا موتور بتواند آن را به حرکت درآورد.



شکل ۳۶- تقابل نمودار گشتاور-دور بار مکانیکی و گشتاور-دور موتور القایی و تشکیل نقطه کار

در شکل (۳۶) مشخصه گشتاور-دور موتور القایی و یک نوع بار مکانیکی^۱ ترسیم شده است^۲.



نکته ۵: در فاصله T_s تا T_m همراه با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور نیز مرتباً زیاد می‌شود. ولی با عبور از نقطه T_m (گشتاور ماکزیمم) این وضعیت تغییر نموده و گشتاور شروع به کاهش می‌نماید. بنابراین با رسیدن گشتاور موتور (گشتاور محرک) به مقدار گشتاور بار (گشتاور مقاوم) یعنی نقطه تلاقی مشخصه گشتاور-دور موتور القایی با مشخصه گشتاور-دور بار مکانیکی (نیروی مقاوم) مطابق شکل (۳۶) سرعت موتور تثبیت می‌گردد. این نقطه را نقطه کار موتور می‌گویند. در واقع برابری گشتاور موتور و بار مکانیکی سبب تثبیت سرعت موتور در نقطه کار می‌شود.

۱- مشخصه گشتاور-دور بپ

۲- چگونگی مشخصه‌های گشتاور-دور بارهای مقاوم وابسته به عملکرد مکانیکی آن می‌باشد و توصیف آن از حوصله کتاب خارج است.



نکته ۸: در موتورهای القایی رتور قفسی به جای سیم پیچ از هادی‌های مفتولی شکل در هسته رتور استفاده می‌شود. شکل شیپار رتورهای قفسی که مفتول‌ها در آنجا دارند، تأثیر بسزایی در نحوه عملکرد موتور و مشخصه گشتاور-دور آن دارد.

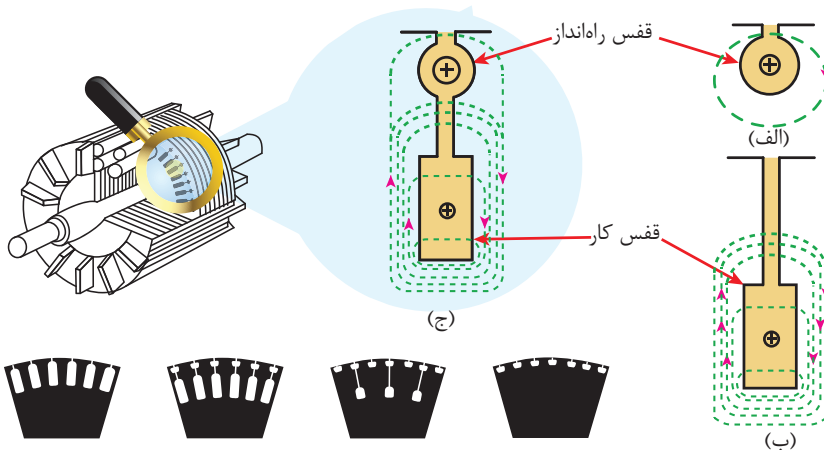


نکته ۶: گشتاور مورد نظر سازنده موتور القایی در نقطه کار را گشتاور نامی موتور می‌نامند و آن را با « T_n » نمایش می‌دهند. مسلماً این گشتاور در یک لغزش و سرعت مشخص اتفاق می‌افتد. که بر روی پلاک موتور نیز یادداشت می‌شود.



نکته ۷: برای تحلیل رفتار موتور القایی و به حرکت در آوردن بار مکانیکی مقادیر T_n ، T_m ، T_s از اهمیت بالایی برخوردار است که سازندگان موتورهای القایی، مقدار T_n و نسبت‌های $\frac{T_m}{T_n}$ و $\frac{T_s}{T_n}$ را در برگه مشخصات فنی^۱ در اختیار بهره بردار قرار می‌دهند.

میدان هادی‌هایی که در شیپارهای عمیق جای دارند توسط آهن رتور احاطه می‌شوند. در نتیجه مطابق شکل (۳۷-ب) موجب می‌شود که میدان اطراف آن پراکندگی کمتری داشته باشد لذا در مغناطیس نمودن هسته نقش بیشتری دارد که معادل خاصیت راکتانس سلفی بیشتر در رتور است. چنین موتورهایی در نقطه کار دارای لغزش کمتری هستند و خاصیت کار بهتری دارند. از آنجا که سطح مقطع نسبی مفتول‌های نزدیک‌تر به سطح رتور کوچکتر از مفتول‌های عمیق است در نتیجه مقاومت



به دلیل نزدیک بودن شیپار به سطح میدان به راحتی به دور آن گردش نمی‌کند. این نوع شیپارها اثر القایی کم دارند و چون سطح مقطع نسبی آن‌ها کمتر است خاصیت اهمی بیشتری دارند.

اطراف شیپارهای عمیق را آهن رتور قرار گرفته است پس راکتانس القایی آن نسبت به شیپارهای نزدیک به سطح بیشتر است.

- ۷ شیپارهای با قفس مقاومت زیاد
- شیپارهای با گشتاور راه‌اندازی زیاد و جریان راه‌اندازی کم
- شیپارهای با راکتانس زیاد
- شیپارهای مربوط به کاربرد عمومی

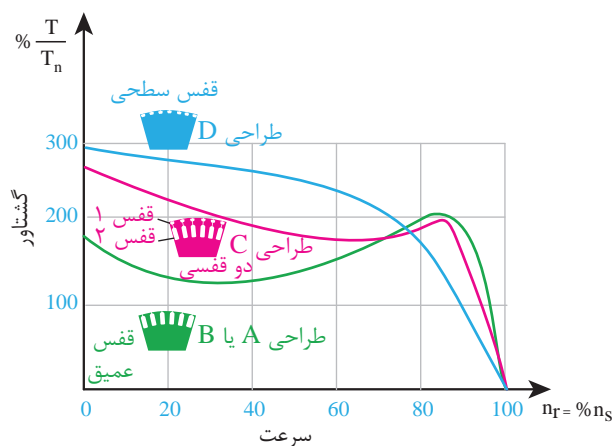
شکل ۳۷- انواع قفس رتور ماشین‌های القایی از لحاظ شکل و چگونگی استقرار

این نوع رتورها را رتور دو قفسی می‌نامند. موتورهای دو قفسی به دلیل داشتن هر دو خاصیت دارای گشتاور راه‌اندازی بالا و همچنین لغزش کم در نقطه کار می‌باشند. به طور کلی استاندارد NEMA^۱ مشخصه کارکرد انواع موتورهای رتور قفسی را به چهار دسته (A,B,C,D) تقسیم نموده که در جدول (۴) آمده است.

اهمی بیشتری نسبت به مفتول‌های درون شیار عمیق دارند. گشتاور موتورهایی که رتور آنها چنین خصوصیتی دارد در زمان راه‌اندازی بیشتر است ولی در نقطه کار با لغزش زیاد کار می‌کنند شکل (۳۷-الف). یکی از انواع موتورهای رتور قفسی که رتور آن دارای هر دو نوع شیار می‌باشد در شکل (۳۷-ج) نشان داده شده است.

* مقادیر بیشتر مربوط به موتورهایی با توان کمتر است.
جدول ۴- مشخصات انواع رتورهای قفسی طبقه‌بندی شده بر اساس استاندارد NEMA

کاربرد عمومی	لغزش	جریان راه‌اندازی (درصد نسبت به جریان نامی)	گشتاور ماکزیمم (درصد نسبت به جریان نامی)	گشتاور راه‌اندازی (درصد نسبت به جریان نامی)	نوع طراحی
فن، دمنده‌های هوا، پمپ‌های سانترفیوژ، کمپرسورها و هر جایی که گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز بار به نسبت کم باشد.	۵٪~۵٪	مشخص نشده	۱۷۵~۳۰۰	۷۰~۲۷۵*	طراحی A- گشتاور راه‌اندازی معمولی جریان راه‌اندازی زیاد
فن، دمنده‌های هوا، پمپ‌های سانترفیوژ، کمپرسورها و هر جایی که گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز بار به نسبت کم باشد.	۵٪~۵٪	۶۰۰~۸۰۰	۱۷۵~۳۰۰	۷۰~۲۷۵*	طراحی B- گشتاور راه‌اندازی معمولی جریان راه‌اندازی معمولی
تسمه نقاله‌ها سنگ شکن‌ها، ماشین‌های همزن و هر جایی که راه‌اندازی زیر بار مورد نیاز باشد.	۱~۵٪	۶۰۰~۸۰۰	۱۹۰~۲۲۵	۲۰۰~۲۸۵*	طراحی C- گشتاور راه‌اندازی زیاد جریان راه‌اندازی معمولی
ماشین پانچ، بالابرها، پمپ‌های چاه نفت و هر جایی که مقدار بار مکانیکی همراه یا بدون جرخ طیار زیاد باشد.	≥۵٪	۶۰۰~۸۰۰	۲۷۵	۲۷۵*	طراحی D گشتاور راه‌اندازی زیاد لغزش زیاد



شکل ۳۸- منحنی مشخصه گشتاور- دور انواع موتورهای قفسی بر اساس استاندارد NEMA



خود را بیازمایید

۱- منحنی گشتاور - دور موتور القایی را ترسیم نموده و بر روی آن نقطه گشتاور ماکزیمم را مشخص کنید. این گشتاور در چه لغزشی اتفاق افتاده و مقدار لغزش چگونه محاسبه می شود؟

۲- نقطه کار در منحنی گشتاور - دور، نشان دهنده چیست؟

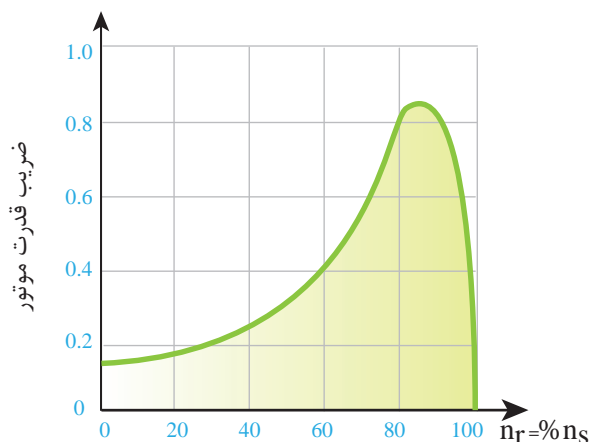
۳- چه عاملی سبب تثبیت سرعت موتور در زیر بار می گردد؟

۴- در رتورهای قفسی هر چقدر عمق شیارها بیشتر باشد، مقاومت القایی رتور.....(بیشتر/ کمتر) است چرا؟

۵- ساختمان رتور دو قفسی را توضیح

دهید.

البته لازم به ذکر است که ضریب قدرت در لحظه راه اندازی هر موتور به دلیل اهمیت ویژه ای که دارد در برگه مشخصات سازنده ارائه می شود.



شکل ۳۹ - منحنی تغییرات ضریب قدرت یک نوع موتور القایی بر حسب سرعت رتور

با توجه به شکل (۳۹) ملاحظه می شود که در زمان راه اندازی ضریب قدرت موتور بسیار کم است ولی با افزایش سرعت، مقدار آن افزایش یافته و پس از عبور از لغزش بحرانی مقدار آن رو به کاهش می گذارد و در سرعت سنکرون صفر می شود.

بنابراین در انتخاب موتور القایی برای چرخش بار مکانیکی مشخص نباید توان موتور را خیلی بالاتر از آن اختیار نمود، زیرا باعث هرزگردی (بی باری) و کاهش ضریب قدرت و در نتیجه دریافت توان راکتیو بیشتر موتور از شبکه برق می شود و اتلاف انرژی را در پی خواهد داشت و مقرون به صرفه نیست.

در استانداردهای مختلف، میزان متفاوتی برای بیشتر بودن توان موتور الکتریکی از توان مکانیکی بار مشخص شده است.

۱۴-۳- مشخصه ضریب قدرت - سرعت موتور القایی

یکی از مهمترین پارامترهای شبکه های برق، ضریب قدرت مصرف کننده می باشد. در واقع ضریب قدرت $\cos \phi$ (یا PF) ناشی از اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان است.

از آنجا که تغییر سرعت رتور باعث تغییر امپدانس مدار رتور می شود و همچنین به دلیل القای متقابل مدار رتور و تأثیر آن بر میدان استاتور، امپدانس کلی موتور نیز تغییر می کند. بنابراین تغییر سرعت رتور بر ضریب قدرت موتور نیز اثر گذار است. در شکل (۳۹) منحنی تغییرات ضریب قدرت بر حسب دور موتور القایی نمایش داده شده است.

در جدول (۵) توان موتور پمپ به نسبت بار مکانیکی آن بر اساس استاندارد API ۶۱۰ ارائه شده است.

جدول ۵- انتخاب توان موتور بر حسب توان مورد نیاز پمپ بر اساس استاندارد API

توان مکانیکی		انتخاب توان نامی موتور (%)
kw	hp	
<۲۲	<۳۰	۱۲۵
۲۲-۵۵	۳۰-۷۵	۱۱۵
>۵۵	>۷۵	۱۱۰

انتخاب موتور القایی که توان آن خیلی بیشتر از توان مکانیکی بار است، باعث مصرف بیهوده انرژی می‌گردد

۱۵-۳- تأثیر فاصله هوایی میان رتور و استاتور بر مقدار ضریب قدرت موتور

در موتورهای القایی با ثابت بودن ولتاژ و فرکانس، شار مغناطیسی عبوری از فاصله هوایی نیز ثابت خواهد ماند. اما اگر دو موتور با مشخصات کاملاً یکسان و با فاصله هوایی متفاوت بین استاتور و رتور هر دو به یک شبکه برق یعنی به ولتاژ و فرکانس یکسان متصل شوند، موتوری که دارای فاصله هوایی بیشتر است، برای عبور شار یکسان از فاصله هوایی خود به جریان مغناطیس کننده بیشتری احتیاج دارد. جریان مغناطیس کننده بیشتر به معنای دریافت توان راکتیو بیشتر از شبکه برق می‌باشد که باعث کاهش ضریب قدرت موتور می‌گردد.

موتورهای القایی که رتور و استاتور آن فاصله هوایی بیشتری دارند، انرژی الکتریکی بیشتری مصرف می‌کنند.

خود را بیازمایید



۱- با افزایش فاصله هوایی رتور و استاتور موتور القایی هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟

(الف) جریان مغناطیس کننده

(ب) ضریب قدرت

(ج) انرژی دریافتی از شبکه

۲- در موتورهای القایی، جریان راه‌اندازی حدوداً چند برابر جریان نامی می‌باشد؟

۳- در هر یک از حالات زیر عملکرد موتور القایی بر روی بار مکانیکی چگونه خواهد بود؟

(الف) بار مکانیکی بیشتر از توان موتور باشد.

(ب) بار مکانیکی بسیار کمتر از توان موتور باشد.

۴- منظور از جریان رتور قفل شده در موتور القایی چیست؟

۵- در یک موتور القایی جریان راه‌اندازی ۲۴ آمپر و جریان نامی ۴/۸ آمپر است. جریان رتور قفل شده چقدر است؟

۶- کاربرد منحنی زمان تحمل سیم پیچ استاتور را شرح دهید.

۱۶-۳- روش‌های راه‌اندازی موتورهای القایی

با توجه به تنوع بار (پمپ‌ها، کمپرسورها، بالابرها، نوارهای نقاله، همزن‌ها و...) موتورهای القایی و میزان بار آنها در شروع راه‌اندازی و همچنین نوع و یا شکل قفس رتور، جریان راه‌اندازی در این نوع موتورها نسبتاً زیاد و حدود ۵ تا ۸ برابر جریان نامی آنها است. بنابراین بررسی روش‌های راه‌اندازی از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد.

در زمان راه‌اندازی موتور، دو موضوع باید ملاحظه شود: الف) نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور نامی ($\frac{T_s}{T_n}$) این نسبت نشان می‌دهد که موتور القایی برای رسیدن به نقطه کار به چه مدت زمانی احتیاج دارد، هر چه مقدار این نسبت بیشتر باشد موتور شتاب بیشتری گرفته و زودتر به نقطه کار می‌رسد.

ب) نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی ($\frac{I_s}{I_n}$) مقدار این نسبت هر چه بیشتر باشد یعنی جریان راه‌اندازی بیشتر است. در طی زمان راه‌اندازی به دلیل ازدیاد جریان، شبکه برق، کابل و منبع تغذیه تحت فشار قرار می‌گیرند و لذا دچار افت ولتاژ می‌شوند.

بنابراین هرچه نسبت $\frac{I_s}{I_n}$ کمتر باشد، شرایط راه‌اندازی بهتر است.

با در نظر گرفتن این دو موضوع می‌توان راه‌اندازی موتور

القایی را به‌طور کلی با دو روش انجام داد:

- روش راه‌اندازی استاتوری (قابل کاربرد در کلیه موتورهای القایی)

- روش راه‌اندازی رتوری (قابل کاربرد در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی)

انواع روش‌های راه‌اندازی استاتوری عبارت‌اند از:

- راه‌اندازی مستقیم (DOL) Direct On Line

- راه‌اندازی ستاره – مثلث (Star Delta) (OYD)

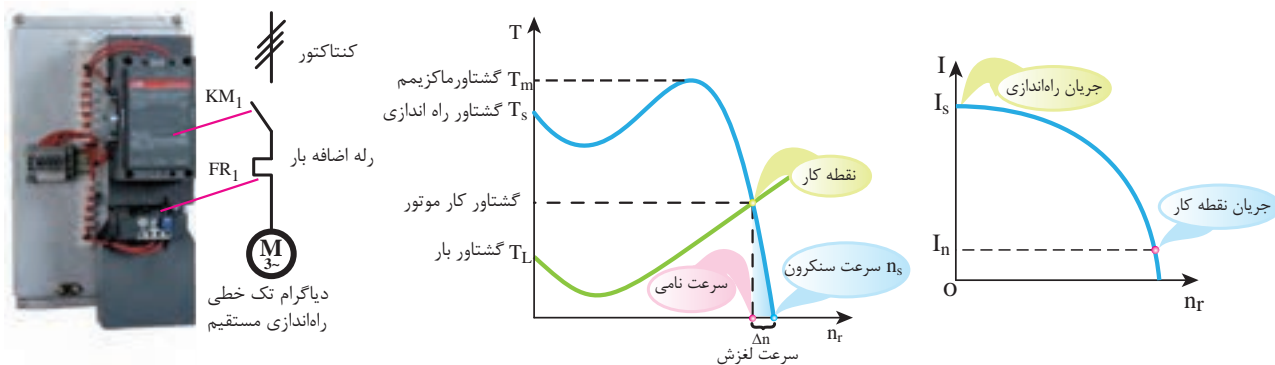
- راه‌اندازی با اتو ترانسفورماتور

- راه‌اندازی نرم (با تجهیزات الکترونیک قدرت) Soft Starter

۱-۱۶-۳- راه‌اندازی مستقیم DOL: در این

روش تنها (از یک کلید قطع و وصل (کنتاکتور) مطابق شکل (۴۰) استفاده می‌شود. این روش ساده‌ترین راه برای راه‌اندازی موتور القایی و در عین حال به دلیل مقرون به صرفه بودن رایج‌ترین روش می‌باشد.

با اتصال مستقیم موتور به شبکه هیچ تغییری در منحنی مشخص گشتاور – دور شکل (۴۰) ایجاد نمی‌شود. بنابراین از معایب این روش، جریان بالای راه‌اندازی پس از وصل کلید است. هر چند وقتی از این روش استفاده می‌شود، کابل، شبکه برق (ترانسفورماتور یا ژنراتور و دیگر تجهیزات متصل به شبکه)



شکل ۴۰ – مدار قدرت و نمودارهای مربوط به راه‌اندازی مستقیم DOL

فشار ضعیف برق ایران بتواند $7 \times 38^\circ$ ولتاژ خط را تحمل نماید زیرا در اتصال مثلث سیم‌پیچ‌های هر فاز به ولتاژ خط متصل می‌شوند.

راه‌اندازی هر موتور القایی به صورت ستاره - مثلث امکان‌پذیر نیست.

در راه‌اندازی به صورت ستاره - مثلث ابتدا برای کاهش جریان راه‌اندازی، موتور را با اتصال ستاره به برق متصل می‌کنند سپس بعد از عبور جریان اولیه راه‌اندازی که در اتصال ستاره $\frac{1}{\sqrt{3}}$ جریان راه‌اندازی با اتصال مثلث است، اتصال سیم‌پیچ‌ها را به مثلث تبدیل می‌نمایند. زمان راه‌اندازی در این روش گاهی به ۱۵ ثانیه می‌رسد. در صورتی که عمل تغییر اتصال به موقع انجام نشود، ممکن است موتور در زیر بار بماند زیرا توان حالت مثلث ۳ برابر توان در حالت ستاره است و موتور برای غلبه بر نیروی مقاوم بار به توان حالت مثلث احتیاج دارد. به همین خاطر برای تغییر اتصال این روش راه‌اندازی در مدار فرمان از تایمر استفاده می‌شود.

با این روش راه‌اندازی، جریان و گشتاور راه‌اندازی به حدود 30% جریان راه‌اندازی حالت مستقیم (DOL) می‌رسد. شکل (۴۱) مدار قدرت و نمودارهای مربوط به راه‌اندازی ستاره - مثلث را نشان می‌دهد. از معایب (راه‌اندازی ستاره - مثلث) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از سه کلید قطع و وصل (کنتاکتور) به جای یک کلید در راه‌اندازی مستقیم DOL
- بالا رفتن هزینه کابل و کابل‌کشی (زیرا باید سر و ته کلاف‌های سه فاز موتور به تابلو منتقل شوند).
- کاهش گشتاور راه‌اندازی که باید پیش از انتخاب این روش از بالاتر بودن آن نسبت به گشتاور راه‌اندازی بار اطمینان حاصل کرد.
- مدار کنترل پیچیده‌تر نسبت به راه‌اندازی مستقیم DOL

باید تحمل عبور جریان بالای راه‌اندازی^۱ (۵ تا ۸ برابر جریان نامی) و افت ولتاژ حاصل از این جریان را تا چند ثانیه داشته باشند.

به‌علاوه در این روش گشتاور راه‌اندازی موتور بسیار زیاد است که در صورت اختلاف خیلی زیاد با گشتاور بار در زمان راه‌اندازی، نیروی بیشتری به اتصالات مکانیکی موتور و تجهیزات متصل به آن وارد می‌شود که با گذشت زمان باعث کاهش عمر مکانیکی تجهیزات می‌گردد.

جریان راه‌اندازی موتور القایی در روش اتصال مستقیم (DOL) زیاد است. ساده‌ترین راه برای کاهش جریان راه‌اندازی، کم کردن ولتاژ ورودی در زمان راه‌اندازی می‌باشد. در بخش‌های قبل تأثیر تغییر ولتاژ برگشتاور موتور القایی بحث گردید. با توجه به شکل (۳۳) باید توجه داشت که کاهش ولتاژ استاتور در زمان راه‌اندازی، علاوه بر کاهش جریان راه‌اندازی موتور، باعث کاهش گشتاور راه‌اندازی نیز می‌شود. بنابراین نمی‌توان بدون مطالعه بار متصل به موتور ولتاژ ورودی موتور را کاهش داد.

برای کاهش ولتاژ استاتور شیوه‌های مختلفی وجود دارد که هریک دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند که در ذیل معرفی شده است.

● قرار دادن مقاومت پر قدرت در مسیر جریان موتور (این روش به دلیل کاهش راندمان موتور و اتلاف انرژی منسوخ شده است).

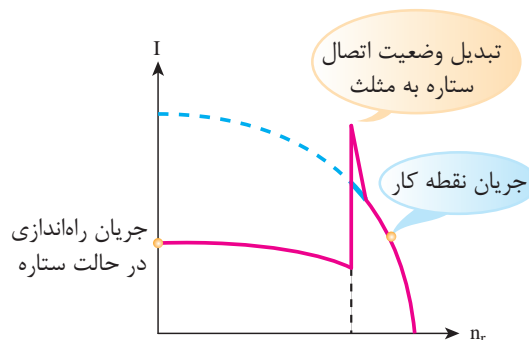
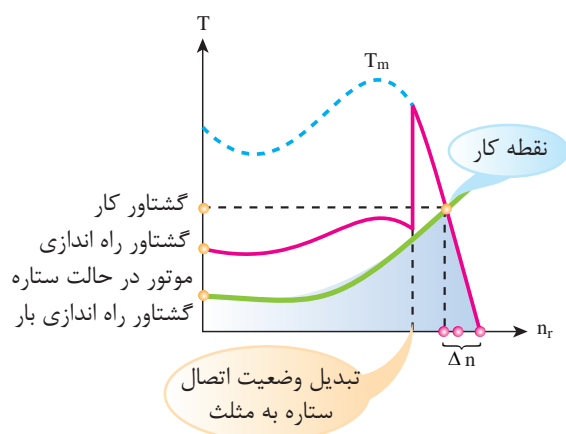
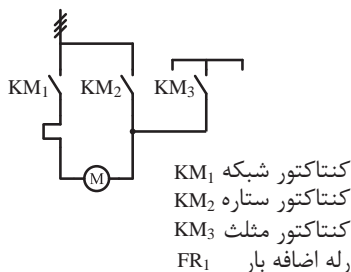
- روش ستاره - مثلث
- استفاده از اتوترانسفورماتور
- استفاده از راه‌انداز نرم

۲-۱۶-۳- راه‌اندازی ستاره - مثلث: مهمترین مشکل راه‌اندازی مستقیم (DOL)، عبور جریان زیاد در زمان راه‌اندازی است. لازم به توضیح است که فقط موتورهایی را می‌توان با روش ستاره مثلث راه‌اندازی نمود که بدون بار باشند و سیم‌پیچ هر فاز آنها تحمل اتصال به ولتاژ خط (U_L) را داشته باشد. یعنی در شبکه

۱- نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی موتورهای کوچک‌تر، بیشتر از موتورهای با قدرت بالا می‌باشد.



توجه: به دلیل ایجاد تلفات هارمونیکی در اتصال مثلث توصیه می‌شود موتورهای با توان بالا را با اتصال مثلث به برق متصل نکنند.



شکل ۴۱- مدار قدرت و نمودارهای مربوط به راه اندازی ستاره-مثلث

۳-۱۶-۳- راه اندازی با اتو ترانسفورماتور:

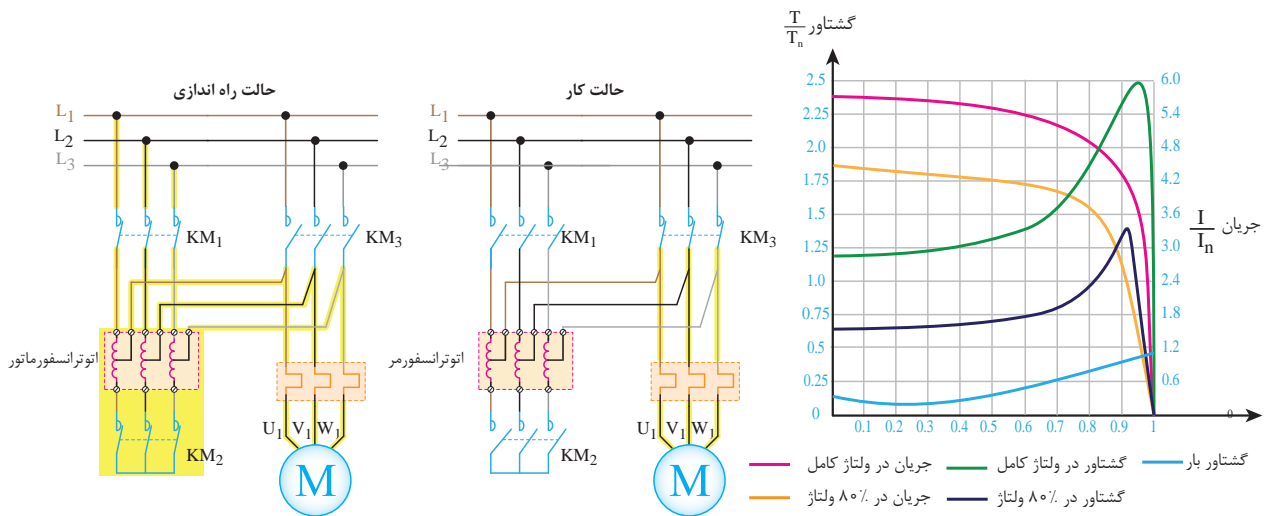
جریان راه اندازی کنترل شده و در ادامه با عبور از مرحله راه اندازی، مدار کنترل عمل تغییر اتصال را انجام می‌دهد و ولتاژ شبکه به طور کامل به موتور می‌رسد.

این روش به سه کلید قطع و وصل (کنتاکتور) و یک اتو ترانسفورماتور متناسب با توان راه اندازی موتور احتیاج دارد. در راه اندازی موتورهای توان زیاد که امکان راه اندازی آنها به صورت ستاره-مثلث وجود ندارد، از این روش می‌توان استفاده نمود.

در شکل (۴۲) راه اندازی موتور سه فاز القایی به کمک اتو ترانسفورماتور سه فاز نشان داده شده است. در این روش برای کم کردن جریان راه اندازی از کاهش ولتاژ به کمک اتو ترانسفورماتور استفاده می‌شود. اتو ترانسفورماتورهای راه انداز موتور القایی مطابق شکل (۴۲) دارای دو سر خروجی هستند که در این نمونه ولتاژ برای راه اندازی در ۸٪ ولتاژ نامی تأمین شده است.

در شروع راه اندازی، سر وسط اتو ترانسفورماتور، ولتاژی متناسب با راه اندازی موتور را در اختیار موتور قرار می‌دهد. لذا

۱- تلفات هارمونیکی از گردش یک جریان در داخل حلقه اتصال مثلث ایجاد می‌شود. این تلفات در اتصال ستاره وجود ندارد.



شکل ۴۲- مدار قدرت راه‌اندازی موتور القایی توسط اتوترانسفورماتور و اثر کاهش جریان راه‌اندازی با استفاده از اتوترانسفورماتور در منحنی گشتاور- دور (الف) حالت راه‌اندازی (ب) حالت کار

۴-۱۶-۳- راه‌اندازی با تجهیزات الکترونیک

قدرت - راه‌اندازی نرم: یکی دیگر از روش‌های مفید راه‌اندازی، استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت موسوم به راه‌اندازی نرم^۱ می‌باشد که در حال حاضر بسیار پر کاربرد است. این تجهیز ساختار متفاوتی نسبت به دیگر روش‌های راه‌اندازی دارد.

یک نمونه راه‌انداز نرم در شکل (۴۳) نشان داده شده است. در راه‌انداز نرم از تجهیزات الکترونیک قدرت نظیر ترستور و مدارهای کنترل استفاده شده است. وظیفه المان‌های الکترونیک قدرت و مدارات کنترلی، تنظیم ولتاژ مناسب جهت راه‌اندازی موتور می‌باشد، به طوری که در زمان راه‌اندازی جریان راه‌اندازی کاهش یابد.

در این روش ابتدا موتور با ولتاژ کم راه‌اندازی می‌شود سپس به طور هم‌زمان جریان موتور نیز توسط المان‌های الکترونیک قدرت کنترل می‌شود و افزایش ولتاژ به گونه‌ای است که جریان راه‌اندازی به آرامی به جریان نامی برسد.

افزایش ولتاژ ورودی موتور به صورت تدریجی تا ولتاژ نامی ادامه می‌یابد. در نتیجه گشتاور خروجی موتور نیز به تدریج اضافه می‌شود. بدین ترتیب از ایجاد ضربه (شوک)‌های مکانیکی

در زمان راه‌اندازی جلوگیری می‌گردد. یعنی در زمان راه‌اندازی مقدار گشتاور به اندازه‌ای است که تنها بر نیروی اصطکاکی و ایستایی موتور غلبه می‌کند. به همین خاطر به این روش راه‌اندازی، راه‌اندازی نرم می‌گویند.

در این روش جریان راه‌اندازی، حدوداً بین ۲ تا ۵ برابر جریان نامی می‌باشد.

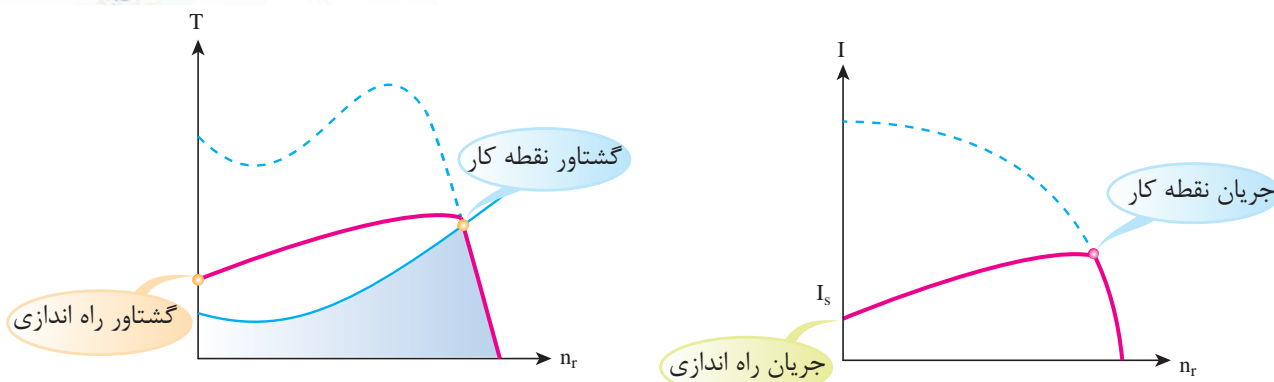
یکی از مزایای این روش امکان تنظیم دقیق گشتاور موردنیاز در هر لحظه است که هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات مکانیکی را کاهش می‌دهد.

کلیه دستگاه‌های راه‌انداز نرم (Soft Starter) دارای سیستم توقف نرم (Stop-Soft) نیز می‌باشند.

از آنجا که اینرسی یا لختی یک جسم متحرک پس از فرمان خاموشی موتور می‌تواند باعث ادامه حرکت شود لذا ممکن است باعث ایجاد آسیب در تجهیزات مکانیکی متصل شده گردد. به همین خاطر کارشناسان مکانیک ترجیح می‌دهند که فرمان ایستادن موتور نیز به صورت نرم صورت گیرد تا در زمان ایستادن نیز تنش‌های مکانیکی به حداقل ممکن برسد.



استفاده از راه انداز نرم باعث افزایش طول عمر موتور می‌شود. شاید تنها عیب آن گران تر بودن آن نسبت به دیگر روش‌های راه اندازی است. البته با افزایش تولید و فراگیر شدن تجهیزات الکترونیک قدرت به نظر می‌رسد در آینده نزدیک قیمت آن به طور قابل توجهی کاهش یابد.



شکل ۴۳- مدار راه اندازی نرم موتورهای القایی (بالا) - نمودار جریان راه اندازی نرم (سمت راست) و گشتاور- دور موتور القایی با راه انداز نرم (سمت چپ)

بیشتر بدانیم

برای یافتن گشتاور ماکزیمم کافست در رابطه گشتاور (۳-۲۰):

$$T = KE_v^2 \frac{SR_v}{R_v^2 + (SX_v)^2}$$

رابطه $S_m = \frac{R_v}{X_v}$ جایگزین شود، در این صورت خواهیم داشت:

$$T_m = KE_v^2 \frac{\frac{R_v}{X_v} \times R_v}{R_v^2 + \left(\frac{R_v}{X_v} \times X_v\right)^2} \Rightarrow$$

$$T_m = KE_v^2 \frac{R_v^2}{2R_v^2 X_v}$$

$$T_m = KE_v^2 \frac{1}{2X_v} \quad (3-22)$$

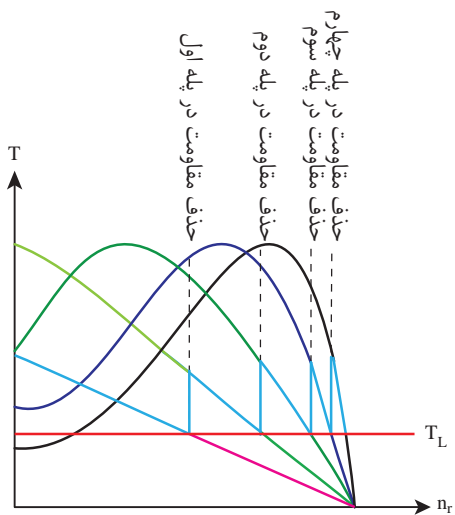
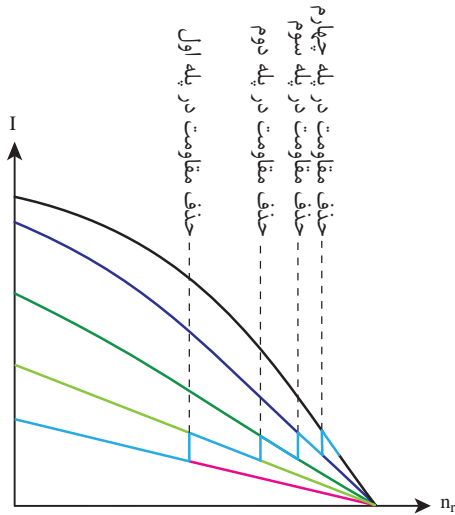
۳-۱۶-۵- روش راه اندازی رتوری: با توجه به

آنکه تنها در موتور رتور سیم پیچی امکان دسترسی به مدار رتور وجود دارد، این روش راه اندازی فقط در این موتورها قابل استفاده است.

برای کاهش جریان راه اندازی موتور در این روش، با استفاده از یک مقاومت اهمی متغیر سه فاز و اتصال آن از طریق رینگ‌ها به مدار رتور مقاومت اهمی مدار رتور را افزایش می‌دهند. در واقع افزایش مقاومت اهمی مدار رتور باعث افزایش امپدانس مدار رتور و به دنبال آن کاهش جریان و افزایش ضریب قدرت مدار رتور می‌شود. از طرفی با کاهش جریان مدار رتور میدان مغناطیسی حاصل از آن ضعیف تر می‌گردد. یکی از مزیت‌های این روش راه اندازی، افزایش گشتاور راه اندازی همراه با کاهش جریان راه اندازی است. اندازه گشتاور راه اندازی به مقدار مقاومت اضافه شده به مدار رتور (R_r) وابسته است.

موتور القایی رتور سیم‌پیچی به صورت راه‌انداز چهار مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

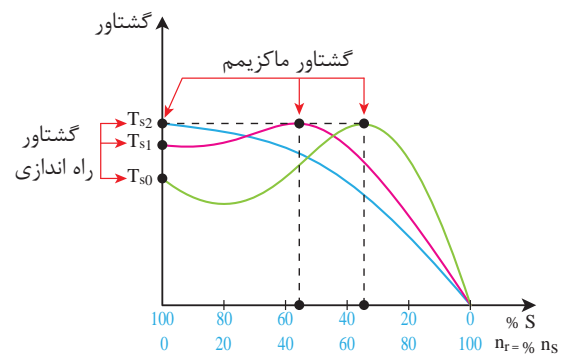
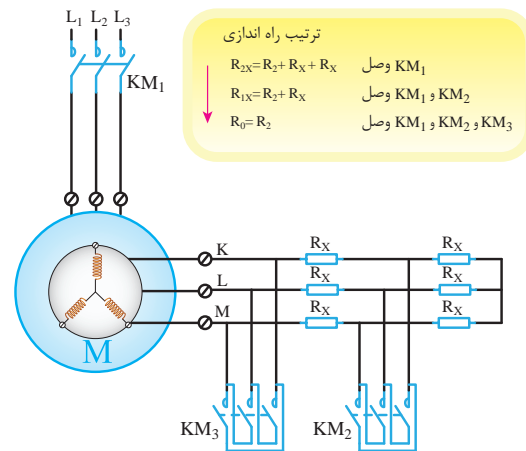
مهمترین کاربرد موتور القایی رتور سیم‌پیچی در مواردی است که بار مکانیکی به گشتاور راه‌اندازی زیاد و قطع و وصل بی‌دری موتور احتیاج داشته باشد. البته قیمت این موتورها و



شکل ۴۵- راه‌انداز چهار پله‌ای موتور القایی رتور سیم‌پیچی و نمایش چگونگی مهار جریان راه‌اندازی

هزینه تعمیر و نگهداری آن در مقایسه با موتور القایی رتور قفسی زیاد است همچنین به دلیل اتصال جاروبک و احتمال ایجاد جرقه نمی‌توان از آن در مکان‌هایی نظیر پالایشگاه استفاده نمود.

گشتاور ماکزیمم موتور القایی از رابطه (۲۲-۳) به دست می‌آید. در رابطه (۲۲-۳) پیداست که گشتاور ماکزیمم موتور القایی به مقاومت اهمی مدار رتور وابسته نیست ولی با توجه به رابطه $S_m = \frac{R_r}{X_p}$ مقدار مقاومت اهمی مدار رتور می‌تواند مقدار لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم را تغییر دهد. از رابطه $S_m = \frac{R_r}{X_p}$ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت مدار رتور باعث جابه‌جاشدن مختصات گشتاور ماکزیمم، در نمودار گشتاور-لغزش می‌شود و آن را به مختصات لحظه راه‌اندازی می‌تواند نزدیک‌تر کند این موضوع در شکل (۴۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۴- مدار راه‌اندازی موتور القایی به روش تغییر مقاومت رتور (شکل بالا) و اثر تغییر مقاومت مدار رتور بر منحنی گشتاور- دور (شکل پایین)

البته باید توجه داشت که بخشی از انرژی الکتریکی در مقاومت اضافه شده به مدار رتور به حرارت تبدیل و تلف می‌شود. شکل (۴۵)، منحنی گشتاور لغزش و جریان - سرعت



خود را بیازمایید

- ۱- روش‌های راه‌اندازی موتورهای القایی را نام ببرید.
- ۲- برداشت شما از نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور نامی چیست؟
- ۳- معایب استفاده از روش راه‌اندازی مستقیم چیست؟
- ۴- در روش‌های راه‌اندازی استاتوری ساده‌ترین راه کاهش جریان راه‌اندازی چیست؟
- ۵- روش راه‌اندازی ستاره - مثلث برای کدام یک از موتورهای القایی قابل اجرا می‌باشد؟
- ۶- اگر در روش راه‌اندازی ستاره - مثلث فاصله زمانی بین اتصال ستاره و مثلث بیش از حد باشد چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟
- ۷- کاربرد روش راه‌اندازی با اتوترانسفور ماتور در کجاست؟
- ۸- روش راه‌اندازی نرم چه مزیت‌هایی نسبت به دیگر روش‌های استاتوری دارد؟
- ۹- روش راه‌اندازی رتوری فقط در موتورهای القایی قابل اجرا می‌باشد.
- ۱۰- افزایش مقاومت رتور چه اثری بر گشتاور ماکزیمم و لغزش نظیر گشتاور ماکزیمم دارد؟
- ۱۱- مهمترین کاربرد موتور القایی با رتور سیم‌پیچی شده در چه نوع بارهایی می‌باشد؟

۱۷-۳- تغییر سرعت موتورهای القایی

گاهی در صنایع لازم است، سرعت موتور قابل کنترل باشد. در گذشته یکی از ضعف‌های موتور القایی را دشواری تنظیم سرعت آن و تنها برتری موتورهای DC را کنترل پذیری آسان سرعت آن می‌دانستند. در حال حاضر با رشد صنعت الکترونیک و توسعه تجهیزات الکترونیک قدرت، کنترل سرعت موتورهای القایی به سهولت امکان پذیر شده است.

به‌طور کلی برای تغییر سرعت موتورهای القایی روش‌های زیر به کار گرفته می‌شود.

تغییر سرعت میدان دوار (n_p) با :

- روش کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ
- تغییر قطب‌های سیم‌بندی
- تغییر مقدار لغزش (S) با :
- تغییر ولتاژ
- تغییر مقاومت مدار رتور (مخصوص موتورهای رتور سیم‌پیچی)

۱۷-۳-۱- کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ : با توجه

به رابطه (۲-۳) می‌توان با تغییر فرکانس، سرعت میدان دوار را تغییر داد. اما لازمه استفاده از این روش داشتن یک مبدل فرکانس است. شکل (۴۶) نمای ظاهری یک نمونه از مبدل‌های فرکانسی را نشان می‌دهد. مبدل فرکانسی را VSD^1 یا VFD نیز می‌گویند.



شکل ۴۶- نمای ظاهری یک نمونه از مبدل فرکانسی کنترل‌کننده سرعت موتور

القایی

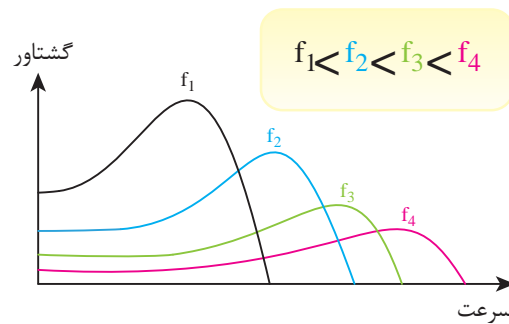
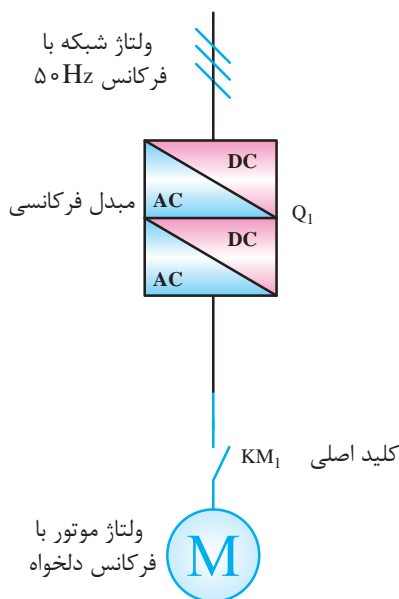
۱- (Variable Speed Drive Or Variable Frequency Drive)

(۴۷) ملاحظه می‌شود که با افزایش فرکانس، گشتاور موتور مرتب کاهش یافته و با کاهش فرکانس گشتاور موتور افزایش می‌یابد. این موضوع بسیار با اهمیت است. زیرا با افزایش بیش از حد فرکانس ممکن است گشتاور موتور از گشتاور بار کمتر شود و موتور زیر بار بماند. از طرفی با کاهش فرکانس موتور، هسته ماشین به ناحیه اشباع مغناطیسی وارد می‌شود، لذا برای جلوگیری از سوختن سیم‌پیچ ماشین در هر دو حالت باید به‌طور همزمان ولتاژ و فرکانس تغییر نماید، به طوری که نسبت $\frac{E}{f}$ ثابت بماند.

هر مبدل فرکانسی دارای دو بخش می‌باشد. ابتدا ولتاژ AC (۵۰ یا ۶۰ هرتز) در این دستگاه به ولتاژ DC تبدیل می‌شود سپس ولتاژ DC را به ولتاژ AC، با فرکانس قابل کنترل معمولاً بین ۲۵۰ Hz ~ تبدیل می‌کند.

نکته قابل توجه اینکه، تغییر فرکانس علاوه بر تغییر سرعت سنکرون بر روی نیروی محرکه القاء شده رتور و همچنین سایر کمیت‌های مغناطیسی موتور و گشتاور نیز اثر می‌گذارد.

مشخصه گشتاور - دور موتور القایی در فرکانس‌های مختلف در شکل (۴۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل



شکل ۴۷- شمای تک خطی اتصال مبدل فرکانسی به موتور القایی (شکل سمت چپ) اثر تغییر فرکانس بر گشتاور و سرعت (شکل سمت راست)

یابد. و از آنجا که تقابل دو میدان باعث ایجاد گشتاور در موتور القایی می‌شود لذا تغییرات شار مغناطیسی به تغییر گشتاور مفید موتور می‌انجامد.

رابطه (۳-۲۴) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۲۵) نوشت، بنابراین برای تثبیت مقدار شار مغناطیسی مطابق رابطه (۳-۲۵) لازم است مقدار ولتاژ و فرکانس با یک نسبت تغییر کنند.

$$\frac{E}{f} = \frac{4}{44} N \phi \quad (3-25)$$

در فصل اول بیان گردید که ولتاژ القایی در یک سیم‌پیچ از رابطه (۳-۲۳) به دست می‌آید.

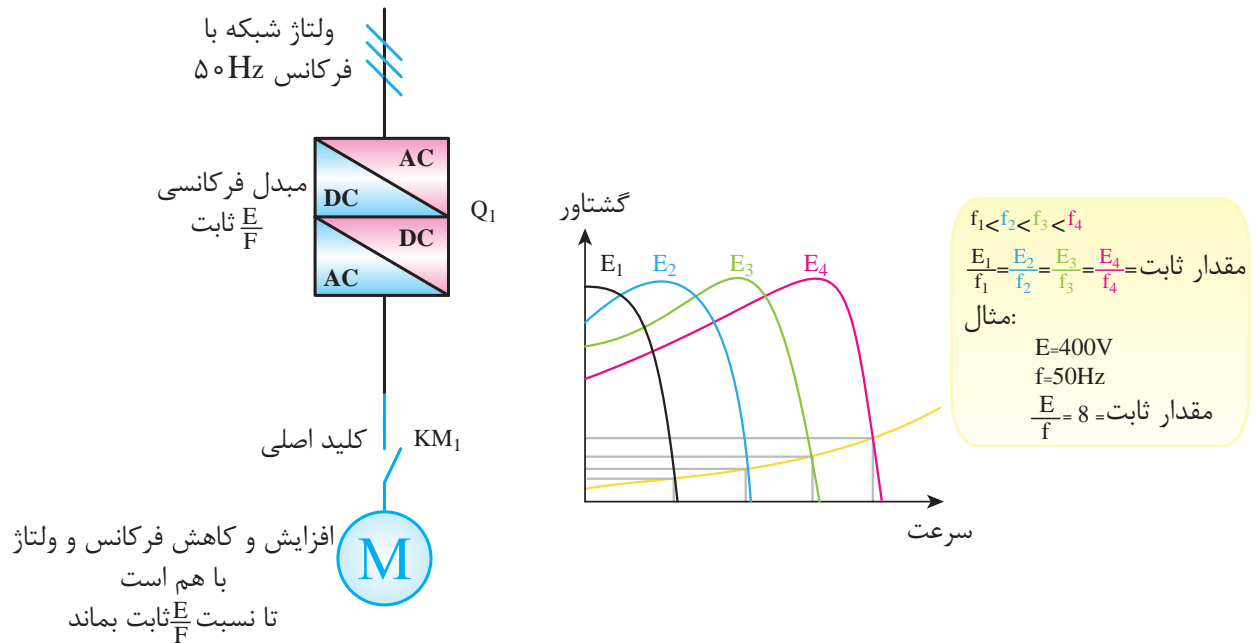
$$E = \frac{4}{44} N B A f \quad (3-23)$$

به عبارتی

$$E = \frac{4}{44} N \phi f \quad (3-24)$$

در صورتی که فرکانس به تنهایی افزایش یا کاهش یابد، برای برقراری رابطه (۳-۲۴) باید شار فاصله هوایی کاهش یا افزایش

در شکل (۴۸) شمای تک خطی راه اندازی و کنترل دور موتور القایی به وسیله یک مبدل ولتاژ-فرکانس نشان داده شده است.



شکل ۴۸- شمای تک خطی اتصال مبدل فرکانسی / ولتاژ به موتور القایی (شکل سمت چپ) اثر تغییر فرکانس و ولتاژ همزمان بر منحنی گشتاور- دور (شکل سمت راست)

۲-۱۷-۳- تغییر قطب‌های سیم‌بندی: یکی دیگر از راه‌های تغییر سرعت میدان دوار با توجه به رابطه (۲-۳) تغییر تعداد قطب‌های سیم‌بندی موتور القایی است. ولی تعداد قطب‌های موتور القایی:

اولاً به نوع سیم‌پیچی استاتور موتور وابسته است.

ثانیاً از لحاظ فیزیکی تعداد قطب‌ها مضرب زوج می‌باشند.

(۲, ۴, ۶, ...)

بنابراین تغییر تعداد قطب‌ها باعث تغییر پیوسته سرعت نمی‌شود بلکه سرعت به‌طور ناپیوسته و پله‌ای تغییر می‌کند. تغییر تعداد قطب‌های موتور القایی به روش‌های زیر امکان‌پذیر است.

(الف) استفاده از سیم‌پیچی دلاندر

(ب) قراردادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل استاتور

خود را بیازمایید



- ۱- روش‌های کنترل سرعت موتورهای القایی را نام ببرید.
- ۲- عملکرد مبدل فرکانس در کنترل سرعت موتور القایی چگونه است؟
- ۳- افزایش بیش از حد فرکانس شبکه چه اثری بر گشتاور موتور القایی دارد؟ چرا؟
- ۴- رابطه‌ای براساس محاسبه شار مغناطیسی بنویسید که نشان دهد برای ثابت ماندن آن بایستی ولتاژ و فرکانس همزمان تغییر کنند.

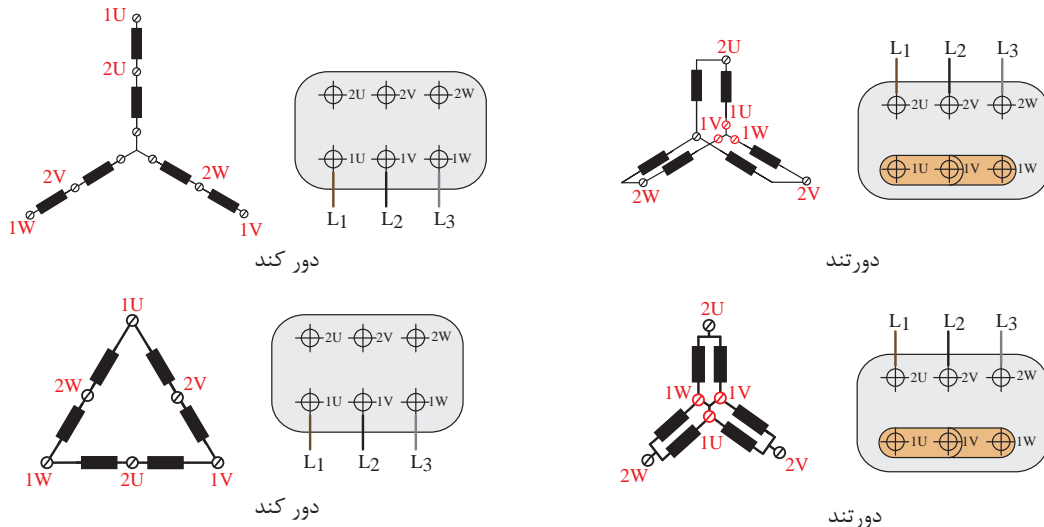
تغییر توان و گشتاور موتور در سرعت تند و یا کند می‌شود. به همین خاطر توان و گشتاور موتورهای دالاندر در اتصالات مختلف در برهه مشخصات فنی موتور توسط سازنده ارائه می‌گردد.

شکل (۴۹) چگونگی اتصال دو نوع از متداول‌ترین موتورهای دالاندر را به شبکه برق سه فاز نشان می‌دهد.

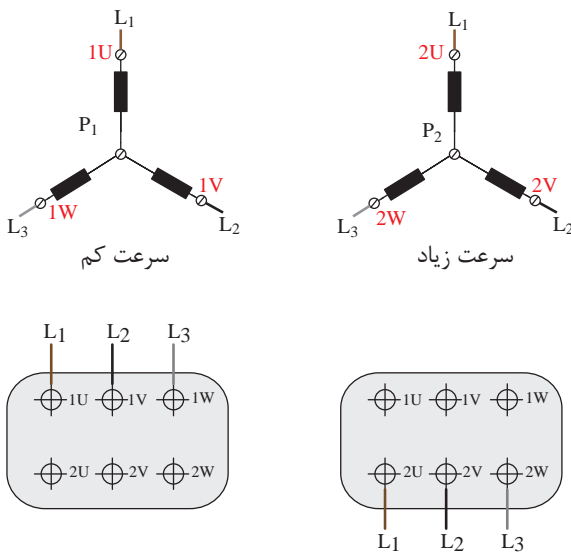
۳-۱۷-۳- موتور دالاندر: در موتورهای القایی

روشی برای سیم‌پیچی وجود دارد که به اتصال دالاندر معروف است. در اتصال دالاندر می‌توان تعداد قطب‌ها را با تغییر اتصال کلاف‌های موتور نصف و یا دو برابر نمود. بنابراین سرعت موتورهای دالاندر به نسبت ۱ به ۲ می‌باشد.

انتخاب نوع اتصالات داخلی موتور دالاندر باعث



شکل ۴۹ - جعبه ترمینال و نحوه اتصال دو نوع موتور دالاندر



شکل ۵۰ - جعبه ترمینال و نحوه اتصال یک نوع موتور با سیم‌پیچ جداگانه

۳-۱۷-۴- قرار دادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل

استاتور: اگر در استاتور موتور القایی دو گروه سیم‌پیچ کاملاً مستقل از هم قرار گیرند به طوری که هیچ ارتباط الکتریکی بین آنها وجود نداشته باشد، در این صورت آن را موتور القایی با سیم‌پیچ جداگانه یا مستقل می‌نامند.

در این موتور هر یک از سیم‌پیچ‌ها می‌توانند با تعداد قطب مشخصی طراحی و در استاتور موتور قرار داده شوند. که البته در یک زمان فقط یکی از آنها باید در مدار باشند. مثلاً با داشتن موتوری که دارای دو سیم‌پیچ ۴ و ۶ قطبی در فرکانس ۵۰ Hz است می‌توان به هر دو سرعت ۱۵۰۰ RPM و ۱۰۰۰ RPM دسترسی داشت.

تغییر سرعت به کمک تغییر مقاومت مدار رتور :

پیش از این گفته شد که افزایش در مقاومت مدار رتور باعث کاهش جریان راه اندازی می شود. ضمن اینکه منحنی گشتاور موتور به صورت شکل (۵۱-ب) تغییر می کند.

با توجه به شکل (۵۱-ب) تغییر مقاومت مدار رتور، باعث جابه جایی نقطه کار موتور می شود. از معایب این روش کنترل سرعت، می توان به موارد زیر اشاره نمود :

- افزایش مقاومت مدار رتور برای کاهش سرعت باعث افزایش تلفات و کاهش راندمان در موتور می شود.

خود را بیازمایید



۱- در موتور های القایی هر چقدر تعداد قطب بیشتر شود سرعت موتور می شود.
 ۲- موتوری دالاندر دارای ۶ قطب در یکی از سرعت های (کند یا تند) مفروض است، اگر فرکانس شبکه ۵۰HZ باشد، به نظر شما سرعت میدان دوار آن در دور کند و تند چقدر است؟

۳- مهمترین عیب موتور چند سرعتی با سیم پیچ مجزا را بنویسید.

۴- آیا می توان بدون تغییر سرعت میدان دوار، سرعت موتور القایی را تغییر داد؟ با استفاده از کدام روش؟

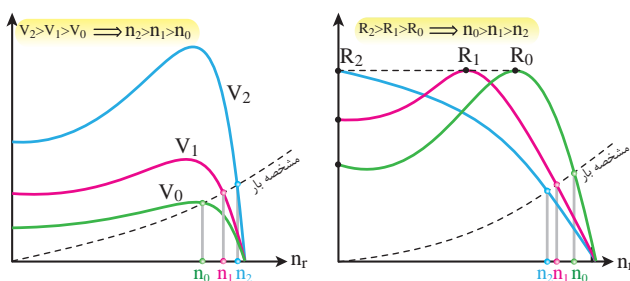
۵- آیا می توان برای کاهش سرعت موتور القایی از طریق کنترل ولتاژ، مقدار ولتاژ ورودی را تا هر سطح دلخواه کاهش داد؟ چرا؟
 ۶- کنترل سرعت موتور القایی از روش تغییر مقاومت رتور با چه عیب هایی همراه است؟

از این نمونه موتور در قدرت های کمتر از ۲۰KW در صنعت استفاده می شود. البته مدل تک فاز این نوع موتور در کولر های آبی استفاده می شود.

۵-۱۷-۳- تغییر مقدار لغزش :

در صورتی که در نظر باشد با تغییر مقدار لغزش، بدون تغییر سرعت میدان دوار، سرعت چرخشی بار مکانیکی تغییر کند، باید مطابق شکل (۵۱-الف) از تغییر ولتاژ و یا شکل (۵۱-ب) از تغییر مقاومت مدار رتور استفاده شود.

در هر دو نمودار شکل (۵۱) ملاحظه می شود، تغییر مقادیر ولتاژ و یا مقاومت رتور باعث تغییر دور و جابه جایی نقطه کار می گردد یعنی نسبت به حالت اول سرعت لغزش تغییر می کند.



شکل ۵۱- اثر تغییر ولتاژ (سمت چپ) و تغییر مقاومت رتور (سمت راست) بر سرعت موتور القایی

تغییر سرعت به کمک تغییر ولتاژ :

با توجه به رابطه (۲۰-۳) گشتاور موتور القایی با مجذور ولتاژ متناسب است. یعنی می توان با تغییر ولتاژ موتور القایی مطابق شکل (۵۱-الف) نقطه کار را جابه جا نمود و در نتیجه سرعت گردش رتور را تغییر داد. البته باید توجه داشت که :

اولاً: نمی توان ولتاژ را بیش از حد ولتاژ نامی افزایش داد. زیرا باعث اشباع مغناطیسی هسته موتور می شود و در ضمن ممکن است، عایق سیم پیچ ها تحمل این ولتاژ را نداشته باشند. ثانیاً: کاهش ولتاژ علاوه بر کم کردن سرعت باعث کم شدن گشتاور و توان موتور نیز می شود در این حالت امکان کم شدن گشتاور و موتور از گشتاور بار و زیر بار ماندن آن وجود دارد.

۱۸-۳- ترمز موتورهای القایی

رتور موتور الکتریکی در حال گردش به دلیل سرعتی که دارد، دارای انرژی جنبشی (اینرسی حرکتی) است و پس از خاموش شدن تمایل به ادامه چرخش دارد. مقدار این انرژی به وزن و ابعاد رتور بستگی دارد. بنابراین پس از فرمان خاموشی موتور، تا مدتی رتور به چرخش خود ادامه می‌دهد.

در بعضی از بارهای مکانیکی (مانند پمپ و فن) اصراری برای توقف سریع رتور وجود ندارد. چرا که بار متصل به آن نیاز به ایست فوری ندارد. اما در بارهایی نظیر بالابرها، ماشین‌های نساجی و ... زمان و محل ایستادن ماشین اهمیت دارد. در نتیجه لازم است به محض خاموش شدن موتور، رتور کاملاً متوقف شود. عمل توقف سریع رتور را در موتورهای الکتریکی، ترمز گویند.

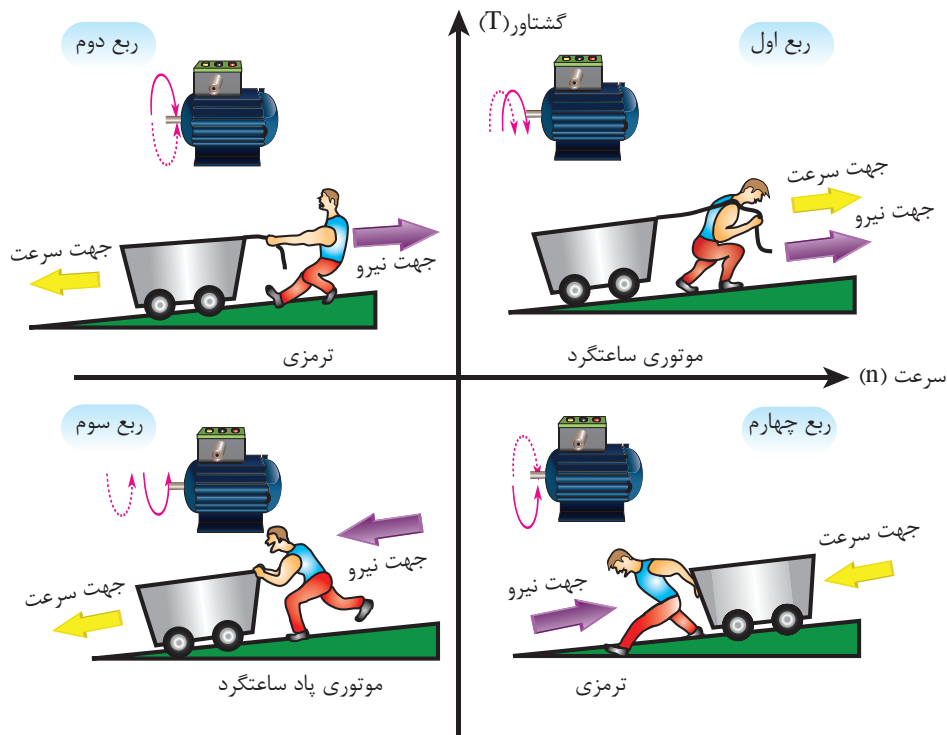
در شکل (۵۲) چهار ناحیه عملکردی موتور بر اساس محورهای گشتاور و دور مشخص شده است. با توجه به علامت سرعت و گشتاور در ناحیه دوم و چهارم شکل (۵۲)، که خلاف یکدیگر می‌باشند حالت ترمزی رخ می‌دهد.

برای توقف رتور، باید انرژی جنبشی محور دوار سریعاً مستهلک شود. برای رسیدن به این هدف لازم است انرژی جنبشی موتور به انرژی حرارتی تبدیل شود و یا آنکه با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی بتوان آن را به شبکه برق برگرداند.

اکثر روش‌های ترمزی، انرژی جنبشی رتور را به حرارت تبدیل می‌کنند اما در روش برگرداندن انرژی به شبکه برق، حرارت داخلی موتور افزایش نمی‌یابد و در نتیجه عمر کاری موتور طولانی‌تری می‌شود.

به‌طور کلی برای ترمز موتورهای القایی روش‌های زیر وجود دارد:

- ترمز جریان مخالف
- ترمز با جریان مستقیم
- ترمز ژنراتوری
- ترمز الکترومکانیکی



شکل ۵۲ - چهار ناحیه عملکردی موتور الکتریکی با توجه به جهت سرعت رتور و گشتاور

۱-۱۸-۳- ترمز جریان مخالف : می توان با تغییر

جای دو فاز جهت چرخش میدان دوار در استاتور را تغییر داد. حالا فرض کنید، موتوری با سرعت n_r در یک جهت در حال چرخش است. اگر به محض خاموش کردن موتور جای دوفاز ورودی آن عوض شود، میدان دوار سریعاً تغییر جهت می دهد ولی رتور به دلیل انرژی ذخیره شده در آن می خواهد همچنان در جهت قبلی به چرخش ادامه دهد. اما تقابلی میدان رتور با میدان دوار استاتور منجر به توقف آنی حرکت رتور می شود.



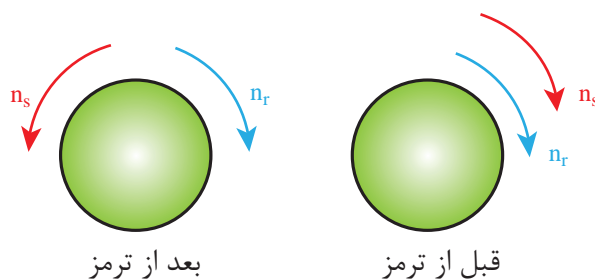
نکته ۱ : به دلیل اینکه لغزش در این روش بزرگ تر از واحد است لذا جریان ترمزی از جریان راه اندازی بیشتر می شود. پس در انتخاب موتور و تجهیزات قطع و وصل کننده آن باید توجه ویژه داشت.



نکته ۲ : تمهیدات لازم برای معکوس نشدن جهت گردش رتور پس از انجام ترمز باید پیش بینی شود.



نکته ۳ : انتخاب این روش برای ترمز موتورهای کوچک به دلیل اینرسی بسیار کمی که دارند توصیه نمی شود زیرا پس از ترمز، جهت چرخش در آن سریعاً عکس گردیده و پس از گردش در جهت مخالف متوقف می شود.



شکل ۵۳- جهت سرعت میدان دوار و سرعت رتور در حالت موتوری و ترمزی

با توجه به تعریف لغزش، مطابق شکل (۵۳) و به دلیل آنکه n_r و n_s خلاف جهت یکدیگر هستند^۱، می توان نوشت :

$$S = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} > 1$$

به یاد دارید که در ماشین های القایی هرگاه لغزش بزرگتر از واحد ($S > 1$) شود، ماشین در ناحیه عملکرد ترمزی قرار می گیرد. البته در استفاده از این روش ترمزی نکات زیر باید مد نظر قرار گیرند :

۲-۱۸-۳- ترمز با جریان مستقیم : در این روش

ابتدا سیم پیچ های استاتور موتور، از شبکه برق جدا می شوند و بلافاصله به یک منبع ولتاژ مستقیم (DC) وصل می گردند. این روش را ترمز با جریان مستقیم موتور القایی می گویند.

۱- اهمیتی ندارد n_s را مثبت و n_r را منفی در نظر گرفت و یا بالعکس، مهم این است که این دو در خلاف جهت یکدیگر می باشند زیرا حالت ترمزی به این مفهوم است :

$$S = \frac{-n_s - n_r}{-n_s} > 1$$



نکته ۱: ولتاژ منبع DC به مراتب باید کمتر از ولتاژ شبکه باشد. معمولاً برای تأمین این ولتاژ مطابق شکل (۵۴) از یک ترانسفورماتور کاهنده به همراه یکسوساز استفاده می‌شود.



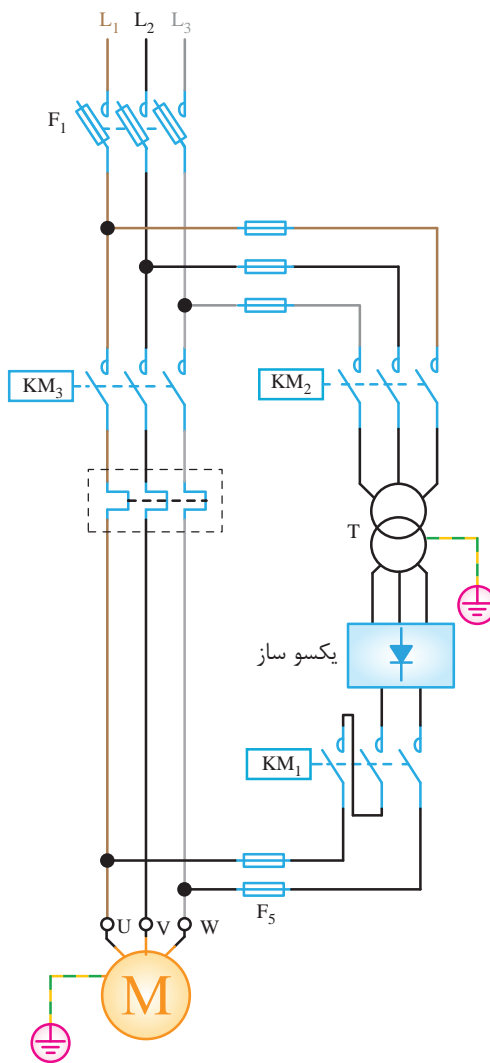
نکته ۲: برای انجام ترمز آرام، جریان DC اعمال شده به سیم پیچ باید تقریباً $\frac{1}{3}$ برابر جریان نامی موتور باشد بدین لحاظ نسبت به ترمز جریان مخالف برتری دارد. (جریان ترمزی آن کمتر است)



نکته ۳: جریان DC اعمال شده به سیم پیچ‌ها با توقف موتور باید قطع شود. چون در این روش تغییر جهت چرخش رخ نمی‌دهد، می‌توان از آن در موتورهای کوچک القایی نیز استفاده کرد.



نکته ۴: برای افزایش گشتاور ترمزی در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی، علاوه بر اتصال جریان DC، می‌توان از اضافه کردن مقاومت الکتریکی به مدار سیم‌پیچی رتور نیز استفاده نمود.



شکل ۵۴ - ترمز با جریان مستقیم موتور القایی

شکل (۵۴) مدار قدرت ترمز با جریان مستقیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵۴) ملاحظه می‌گردد کلید KM_2 اتصال مدار یکسوساز را برعهده دارد. در این روش پس از قطع ولتاژ AC ورودی توسط کلید KM_3 کلید KM_1 وصل گردیده و برق یکسو شده را به کلاف‌های موتور می‌رساند. با اتصال ولتاژ مستقیم به کلاف‌های موتور میدان ساکن در استاتور تولید می‌شود که در نتیجه القای این میدان ساکن رتور سریعاً متوقف می‌گردد. نکات قابل توجه در این روش عبارتند از:

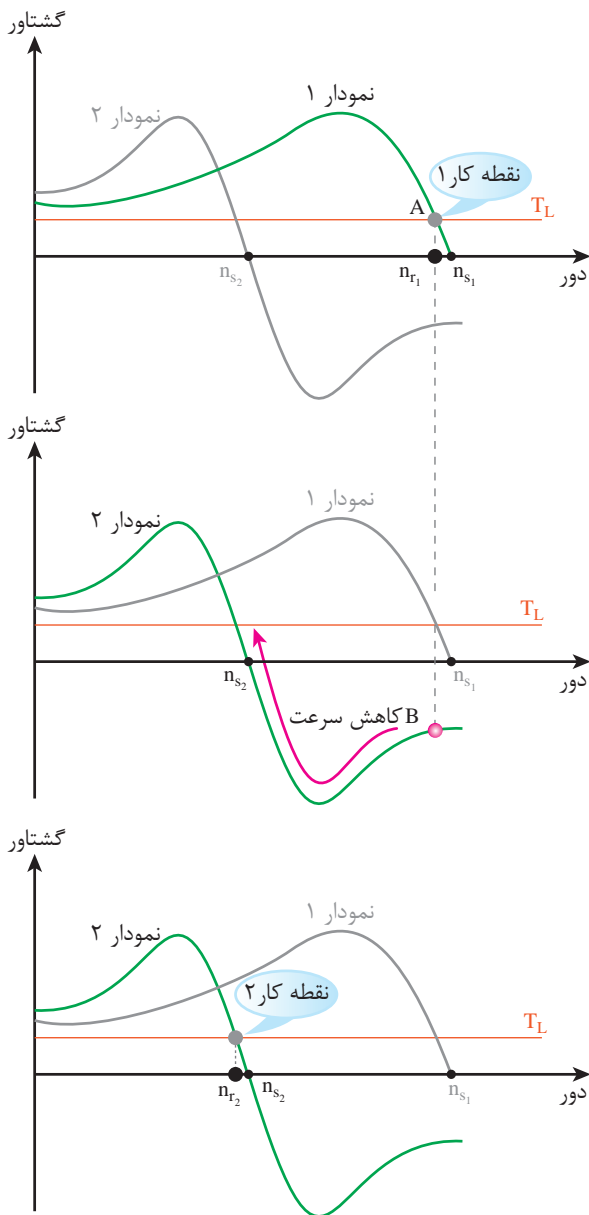
۳-۱۸-۳- ترمز ژنراتوری: شکل (۵۵) نمودار

گشتاور- دور موتور القایی دالاندر را نشان می‌دهد. در موتورهای دالاندر، سرعت میدان دوار در حالت دور کند نصف حالت دور تند می‌باشد. لذا نمودار (۱) مربوط به دور تند و نمودار (۲) مربوط به دور کند موتور دالاندر است. فرض کنید موتور با سرعت n_{r1} در حال چرخش است برای انجام عمل ترمز می‌توان اتصال موتور را از دور تند به دور کند تغییر داد. این موضوع سبب می‌شود که سرعت میدان دوار بلافاصله از n_{s1} به n_{s2} کاهش یابد. به این ترتیب در مشخصه گشتاور- دور، وضعیت موتور از نقطه A، روی نمودار (۱) به نقطه B، روی نمودار (۲) شکل (۵۸) جا به جا می‌شود. ولی به دلیل اینرسی بار و رتور، سرعت رتور هنوز به این حد کاهش نیافته است. در این حالت تا زمان رسیدن سرعت رتور به نقطه کار جدید، مقدار گشتاور موتور مسیر نشان داده شده در نمودار (۲) را طی می‌نماید تا سرعت آن در نقطه کار جدید تثبیت شود.

فاصله بین نقطه B تا نقطه کار (۲) ناحیه ژنراتوری ماشین در دور کند می‌باشد ولی چون تداوم نیروی مکانیکی مانند مولدها روی محور ماشین وجود ندارد، سرعت محور سریعاً رو به کاهش می‌گذارد. تا سرعت آن روی نقطه کار (۲) تثبیت شود. بنابراین با این روش ترمزی توقف کامل حاصل نمی‌شود بلکه کاهش سریع سرعت تا زمان وارد شدن ماشین به ناحیه موتوری و رسیدن موتور به نقطه کار جدید ادامه می‌یابد که روی نمودار (۲) شکل (۵۵) نشان داده شده است. آیا چنین کاهش سرعتی را در هنگام اتومبیل سواری و استفاده راننده از دنده معکوس در سرعت بالا دیده‌اید؟

این روش ترمزی برای موتور بالابرها و جرثقیل‌ها کاربرد دارد.

باید توجه داشت که در کنار این روش ترمزی لازم است از سایر روش‌های ترمزی نیز استفاده شود.



شکل ۵۵- تشریح عملکرد ترمز مولدی در موتور دالاندر

۴-۱۸-۳- ترمز الکترومکانیکی : در این شیوه به

کمک اصطکاک میان قسمت ثابت با یک دیسک عمل ترمز انجام می‌شود. رتور الکتروموتورهایی که از این روش ترمز استفاده می‌کنند به همراه دیسک به صورت یکپارچه ساخته می‌شوند.

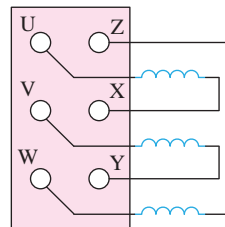
این روش ترمزی به دو صورت انجام می‌شود :
الف) ترمز الکترومکانیکی که در زمان نبود جریان برق عمل می‌کند.

در شکل (۵۷) مشاهده می‌شود که در هنگام قطع برق موتور، فنر به صفحه مغناطیسی یا همان دیسک فشار آورده و آن را محکم به محور می‌چسباند ولی به محض برقرار شدن موتور، بوبین الکترومغناطیسی، دیسک را از روی محور جدا می‌نماید.

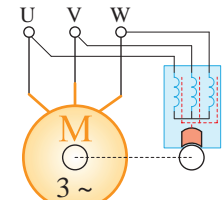
ب) ترمز الکترومکانیکی که با عبور جریان عمل می‌کند.
شکل (۵۸) نمونه‌ای از یک موتور الکتریکی با این نوع ترمز را نشان می‌دهد.

در این روش برای برقرار نمودن بوبین الکترومغناطیسی باید از مدار فرمان استفاده شود. زیرا قفل شدن محور موتور با اعمال جریان الکتریکی به بوبین الکترومغناطیسی مربوط به دیسک صورت می‌گیرد.

الف) ترمز با تغذیه از خود



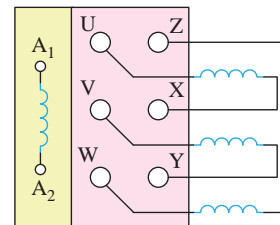
شمای اتصالات در روی پلاک ترمینال‌ها



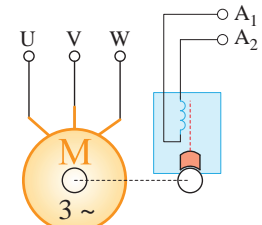
نماد ترمز موتوری که در نبود جریان فعال می‌شود.

قابل اجرا فقط در موتورهایی که ترمز آنها در نبود جریان عمل می‌کند.

ب) ترمز با تغذیه مستقل (۱ یا ۳ سیم پیچ)



شمای اتصالات در روی پلاک ترمینال‌ها



نماد ترمز موتوری که در نبود جریان فعال می‌شود.

در هر دو روش ترمز الکترومکانیکی قابل اجرا است.

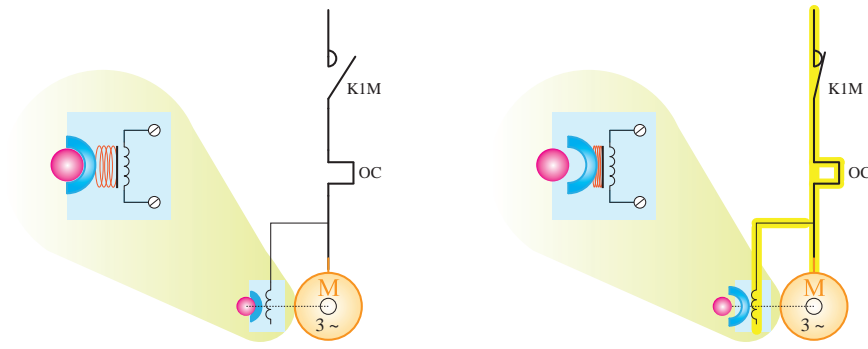
شکل ۵۶- انواع موتورهای القایی با ترمز الکترومکانیکی



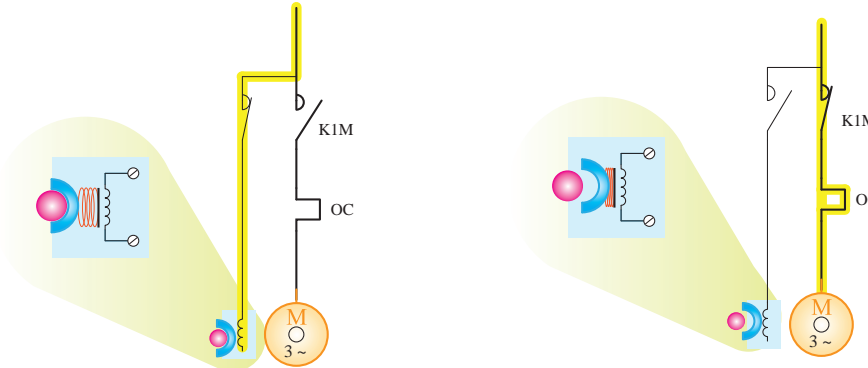
نکته ۱ : برخی سازندگان موتور، ولتاژ تغذیه ترمز را متفاوت با ولتاژ اصلی موتور در نظر می‌گیرند که باید مورد توجه بهره بردار قرار گیرد.



نکته ۲ : ترمز الکترومکانیکی گزینه خوبی جهت ترمز مکمل بارهای ثقلی نظیر آسانسورها و جرثقیل محسوب می‌شود.



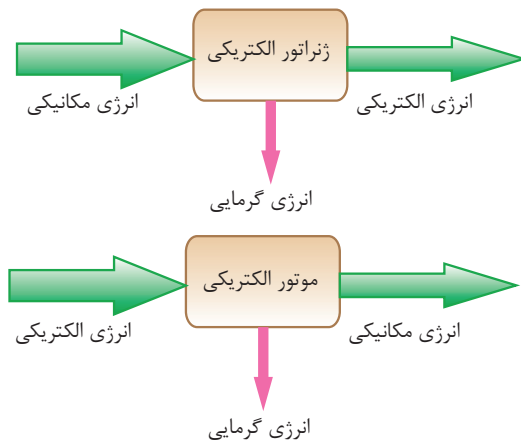
شکل ۵۷ - با خاموش شدن موتور، دیسک به محور می چسبد



شکل ۵۸ - با فرمان ترمز الکترومکانیکی موتور خاموش و دیسک به محور می چسبد

۱۹-۳- رفتار ژنراتوری ماشین القایی

ماشین الکتریکی به عنوان موتور، انرژی الکتریکی را از طریق میدان مغناطیسی به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. همچنین به ماشینی که انرژی مکانیکی را با کمک میدان مغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل می کند ژنراتور می گویند. بنابراین عملکرد ژنراتور دقیقاً عکس حالت موتور الکتریکی تعریف می شود. تعاریف ژنراتور و موتور به صورت طرح واره در شکل (۵۹) نشان داده شده است.



شکل ۵۹ - نمایش ژنراتور و موتور الکتریکی از نقطه نظر انرژی

خود را بیازمایید

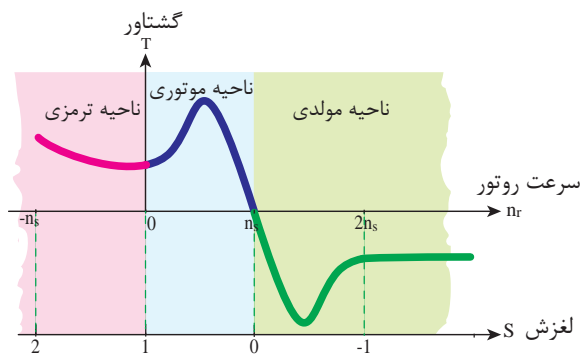


- ۱- انواع روش های ترمز در موتورهای القایی را نام ببرید.
- ۲- به نظر شما چرا در روش ترمز جریان مخالف، جریان ترمزی بیشتر از جریان راه اندازی است؟
- ۳- چگونگی عملکرد ترمز دینامیکی را توضیح دهید.
- ۴- دو مزیت روش ترمز دینامیکی نسبت به ترمز جریان مخالف چیست؟
- ۵- توضیح دهید، هنگامی که یک موتور دالاندر از سرعت تند به کند تغییر حالت می دهد، چه اتفاقی می افتد؟
- ۶- کاربرد مهم روش ترمز ژنراتوری در کجاست؟ چرا؟

۱-۱۹-۳- اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق :

در این حالت ژنراتور القایی، توان راکتیو (Q) را از شبکه برق سه فاز دریافت نموده و در نتیجه توان اکتیو (P) را به شبکه برق تحویل می‌دهد. البته نباید فراموش کرد که باید سرعت رتور از سرعت میدان دوار بیشتر باشد ($n_r > n_s$) در این صورت لغزش منفی است ($S < 0$) تا ماشین القایی در ناحیه ژنراتوری قرار گیرد.

با اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق، سرعت میدان دوار همواره ثابت و از رابطه (۲-۳) تبعیت می‌کند و چون سرعت رتور به سرعت محرک مکانیکی وابسته می‌باشد، تأثیری بر فرکانس ندارد. اما از آنجا که ژنراتور با فرکانس ثابت شبکه کار می‌کند، توان اکتیو تحویلی به شبکه فقط به سرعت رتور بستگی دارد.



شکل ۶۱- یادآوری نواحی مختلف ماشین القایی



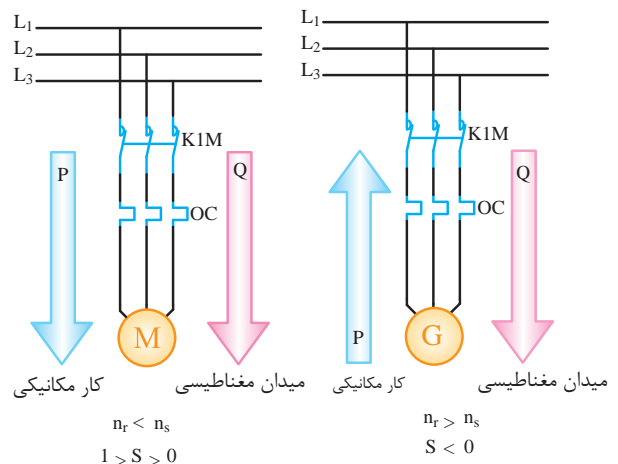
نکته: هر چه سرعت رتور ژنراتور سریع‌تر باشد توان اکتیو تولید شده بیشتر است و بالعکس با کاهش سرعت، توان اکتیو کمتری به شبکه تحویل می‌شود.

بنابراین ژنراتور القایی، ژنراتوری است که می‌تواند با دور متغیر کار کند بدون آنکه تأثیری روی فرکانس شبکه ایجاد نماید کاربرد این نوع ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی است. زیرا سرعت باد را نمی‌توان کنترل نمود.

ماشین القایی، می‌تواند هم به صورت ژنراتور و یا به عنوان موتور استفاده شود. ماشین القایی در حالت موتوری از شبکه برق توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) جذب می‌کند. که توان اکتیو (P) را به مصرف خروجی جهت غلبه بر بار مکانیکی می‌رساند و البته بخشی از آن نیز تلف می‌شود. توان راکتیو را موتور القایی برای ایجاد میدان دوار مغناطیسی نیاز دارد.

شکل (۶۰) این واقعیت را نمایش می‌دهد. البته سمت انتقال توان اکتیو و راکتیو (P,Q) در موتورها از شبکه برق به طرف موتور می‌باشند.

اما در حالتی که ماشین القایی به عنوان ژنراتور استفاده شود، قدرت مکانیکی (ورودی) به محور ماشین القایی مطابق شکل (۶۰) به صورت توان اکتیو (P) به شبکه برق تحویل می‌شود البته به شرطی که توان راکتیو (Q) مورد نیاز ماشین تأمین شود.



شکل ۶۰- موتور و ژنراتور القایی متصل به شبکه برق

برای تأمین توان راکتیو (Q) دو راه وجود دارد :
الف) اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق
ب) استفاده از خازن

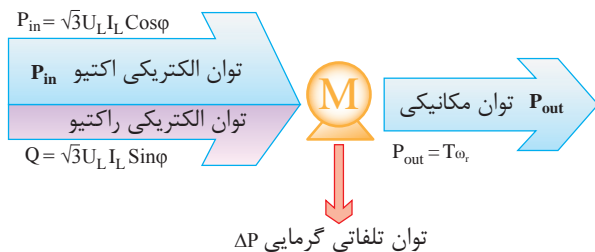
خود را بیازمایید



- ۱- نقش توان‌های اکتیو و راکتیو دریافتی از شبکه توسط موتورهای القایی را توضیح دهید.
- ۲- اگر بخواهیم یک ماشین القایی به صورت مولد کار کند چه نوع توانی را از شبکه دریافت و چه نوعی از توان را به شبکه تحویل می‌دهد؟
- ۳- یک ماشین القایی سه فاز به شبکه برق متصل است و در ناحیه ژنراتوری کار می‌کند: الف) سرعت رتور را با سرعت میدان دوار مقایسه کنید ب) اگر سرعت رتور در حال تغییر باشد چه اثری بر فرکانس شبکه دارد؟

۲-۳- تلفات و راندمان

از آنجا که ماشین‌های القایی بیشتر به عنوان موتور استفاده می‌شوند در این بخش تلفات و راندمان موتور القایی مورد بحث قرار می‌گیرد. موتور القایی توان الکتریکی از شبکه دریافت می‌نماید و توان مکانیکی را به خروجی تحویل می‌دهد. نمودار دریافت توان الکتریکی و تحویل توان مکانیکی در شکل (۶۳) نشان داده شده است.

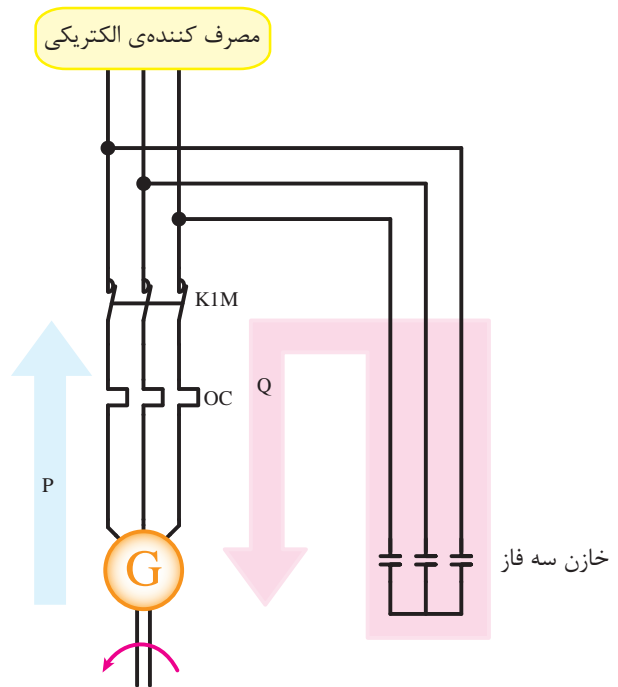


شکل ۶۳- دیگران توان در موتورهای القایی سه فاز

ملاحظه می‌شود، بخشی از توان دریافتی از شبکه برق مطابق شکل (۶۳)، توان راکتیو است؛ این بخش از توان برای تولید میدان دوار، وارد ماشین می‌شود و چون مجدداً به شبکه

۲-۱۹-۳- استفاده از خازن (مولد القایی در حالت

منفرد): هرگاه از ژنراتور القایی به صورت منفرد استفاده شود، باید توان راکتیو مورد نیاز آن را مطابق شکل (۶۲) توسط خازن تأمین نمود.



شکل ۶۲- مولد القایی در حالت منفرد

با توجه به وابستگی فرکانس به سرعت چرخش رتور و منفرد بودن ژنراتور، فرکانس برق تولید شده در این حالت کاملاً به سرعت رتور وابسته است. لازم به ذکر است که شرط ایجاد ولتاژ، وجود پسماند مغناطیسی در رتور این گونه ژنراتورها می‌باشد.

کاربرد این ژنراتورها در مواردی است که بار مصرفی فقط از نوع اکتیو باشد. (مانند ژنراتورهای جوشکاری)

تحقیق کنید: چرا باید مصرف‌کننده‌های ژنراتور القایی در حالت منفرد از نوع اکتیو باشد؟

راندمان را می‌توان به صورت درصد یا نسبت به واحد هم محاسبه کرد.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3-30)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} U_L I_L \cos \phi} \quad (3-31)$$

مطابق دیاگرام شکل (۶۳) می‌توان راندمان را به صورت رابطه (۳-۳۲) نیز نوشت:

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P \quad (3-32)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (3-33)$$

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_r \quad (3-34)$$

ΔP_s تلفات استاتور موتور القایی بر حسب (W)

ΔP_r تلفات رتور موتور القایی بر حسب (W)

ΔP در رابطه (۳-۳۴)، مجموعه تلفات موتور القایی است که شامل تلفات استاتور و رتور می‌باشد.

تلفات استاتور ΔP_s شامل تلفات اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور (P_{cus}) و تلفات هسته (P_{core}) می‌باشد. تلفات هسته موتور القایی جزو تلفات ثابت موتور بوده که به دلیل حضور جریان‌های گردابی و تلفات هیستریزس در هسته ایجاد می‌شوند.

$$\Delta P_s = P_{cus} + P_{core} \quad (3-35)$$

ΔP_r شامل تلفات اهمی سیم‌پیچ رتور در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی و یا تلفات اهمی حاصل از مفتول‌های به کار رفته در موتورهای رتور قفسی می‌باشد. لذا تلفات اهمی در رتور را تلفات مسی رتور^۱ می‌نامند. و آن را با P_{cur} نمایش می‌دهند.

برمی‌گردد، در محاسبات تلفات و راندمان ماشین به حساب نمی‌آید.

بخش دیگری از توان ورودی به موتور القایی، توان اکتیو است. این توان در موتورهای سه فاز از رابطه (۳-۲۶) محاسبه می‌شود.

$$P_{in} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi \quad (3-26)$$

در رابطه (۳-۲۶)

U_L ولتاژ خط بر حسب V

I_L جریان خط بر حسب V

$\cos \phi$ ضریب قدرت موتور

حداکثر توانی را که موتور می‌تواند به بار تحویل دهد توان نامی موتور تعریف می‌کنند و بر روی پلاک موتور درج می‌شود، همچنین در برگه مشخصات فنی موتور نیز ارائه می‌گردد. توان نامی موتور القایی سه فاز از رابطه (۳-۲۷) قابل محاسبه است.

$$P_n = T_n \omega_r \quad (3-27)$$

$$P_n = T_n \times \frac{2\pi n_r}{60} \quad (3-28)$$

در رابطه (۳-۲۸)،

T_n گشتاور نامی یا مفید بر حسب N-m

n_r سرعت نامی رتور بر حسب RPM

P_n توان نامی رتور بر حسب W

اگر بار مکانیکی روی محور با توان نامی موتور برابر باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$P_{out} = P_n$$

راندمان موتور القایی را مانند دیگر ماشین‌ها براساس نسبت

توان خروجی به توان ورودی مطابق با رابطه (۳-۲۹) می‌توان محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3-29)$$

۱- تلفات ایجاد کننده گرما

بخش دیگری از تلفات در رتور، تلفات مکانیکی است که به علت وجود اصطکاک هوا و یاتاقانها ایجاد می‌شود و چون سرعت موتور القایی ثابت است، تلفات مکانیکی نیز ثابت می‌باشد این تلفات را با P_{mis} نشان می‌دهند.

از آنجا که فرکانس رتور در حال چرخش کم است لذا از تلفات آهنی رتور می‌توان چشم‌پوشی کرد زیرا تلفات آهنی با مجذور فرکانس نسبت مستقیم دارد.

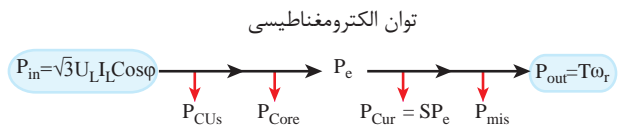
بنابراین تلفات رتور مطابق رابطه (۳-۳۶) به دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{Cur} + P_{mis} \quad (3-36)$$

با جایگزینی مقدار ΔP_r و ΔP_s می‌توان تلفات کل ماشین را از رابطه (۳-۳۷) به دست آورد.

$$\Delta P = P_{Cus} + P_{Core} + P_{jr} + P_{mis} \quad (3-37)$$

نمودار توازن توان در موتورهای القایی در شکل (۶۴) نمایش داده شده است.



شکل ۶۴- نمودار توازن توان در موتورهای القایی

توان الکترومغناطیسی (P_e) توانی است که از طریق میدان دوار استاتور در فاصله هوایی به رتور منتقل می‌شود. توان الکترومغناطیسی (P_e) را می‌توان به‌طور مستقیم از رابطه (۳-۳۸) نیز محاسبه نمود.

$$P_e = T_e \omega_s \quad (3-38)$$

$$P_e = T_e \times \frac{2\pi n_s}{60} \quad (3-39)$$

در رابطه (۳-۳۹):

T_e گشتاور الکترو مغناطیسی بر حسب N-m

n_s سرعت سنکرون موتور القایی بر حسب RPM

P_e توان الکترو مغناطیسی بر حسب W

همچنین با توجه به دیاگرام توان شکل (۶۴) داریم:

$$P_e = P_1 - (P_{Cus} + P_{Fe}) \quad (3-40)$$

$$P_e = P_{out} + P_{Cur} + P_{mis} \quad (3-41)$$

تلفات ژولی رتور را می‌توان از حاصلضرب لغزش در توان الکترومغناطیسی به دست آورد.

$$P_{Cur} = SP_e \quad (3-42)$$

در رابطه (۳-۴۲)،

S لغزش موتور

P_e توان الکترو مغناطیسی بر حسب W

P_{Cur} تلفات مسی رتور بر حسب W

رابطه (۳-۴۲) نشان می‌دهد که با افزایش لغزش، تلفات مسی در مدار رتور افزایش یافته و در نتیجه توان خروجی کاهش می‌یابد.

هم‌چنان‌که در بخش تغییر سرعت موتورهای رتور سیم‌پیچی عنوان شد، افزایش مقاومت مدار رتور به منظور کاهش سرعت و یا افزایش گشتاور راه‌اندازی باعث افزایش لغزش می‌گردد.

بنابراین طبق رابطه (۳-۴۲) افزایش لغزش، افزایش تلفات مسی در مدار رتور را در پی دارد و به دنبال آن راندمان موتور کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه تلفات مسی در استاتور و تلفات مسی رتور به جریان سیم‌پیچ استاتور و رتور وابسته هستند و این جریان نیز با تغییرات بار، تغییر می‌کند. لذا به مجموع تلفات مسی استاتور و تلفات مسی رتور تلفات متغیر موتور القایی می‌گویند.

$$P_{Cus} + P_{Cur} = \text{تلفات متغیر} \quad (3-43)$$

تلفات مکانیکی رتور و تلفات هسته در استاتور تلفات ثابت

۲۱-۳- مقایسه موتورهای رتور قفسی و رتور

سیم‌پیچی

از مزایای موتور القایی رتور قفسی به جای رتور سیم‌پیچی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- موتور رتور قفسی در یک توان مشخص، مقاومت اهمی کمتری در رتور داشته و لذا تلفات مسی رتور در آن کمتر است.
- موتور رتور سیم‌پیچی نیاز به حلقه‌های لغزان، جاروبک و سیم‌پیچی رتور دارد در نتیجه گرانترازی یک موتور رتور قفسی است.
- موتور رتور قفسی به دلیل نداشتن جاروبک و حلقه‌های لغزان، هزینه تعمیر و نگهداری کمتری دارد.
- از معایب موتور رتور قفسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- گشتاور راه‌اندازی کمتر نسبت به موتور رتور سیم‌پیچی
- ضریب قدرت کم در هنگام راه‌اندازی

با این حال چون موتورهای رتور قفسی ساختمان ساده‌ای دارند، تعمیر و نگهداری آنها ساده است و در هر مکانی قابل استفاده هستند و از نظر قیمت نیز در قدرت یکسان، ارزان‌تر از موتور رتور سیم‌پیچی می‌باشند بدین لحاظ امروزه جایگاه ویژه‌ای برای کاربرد در اکثر صنایع پیدا کرده‌اند.

هستند و به مجموع آنها تلفات ثابت موتور القایی می‌گویند. بنابراین داریم:

$$P_{\text{Core}} + P_{\text{mis}} = \text{تلفات ثابت} \quad (3-44)$$

پس تلفات کل موتور القایی برابر مجموع تلفات ثابت و تلفات متغیر است.

تلفات متغیر + تلفات ثابت = ΔP

$$\Delta P = P_{\text{Cus}} + P_{\text{Cur}} + P_{\text{Core}} + P_{\text{mis}} \quad (3-45)$$

روابط فوق در حل بسیاری از مسائل مربوط به محاسبه راندمان سودمند است.

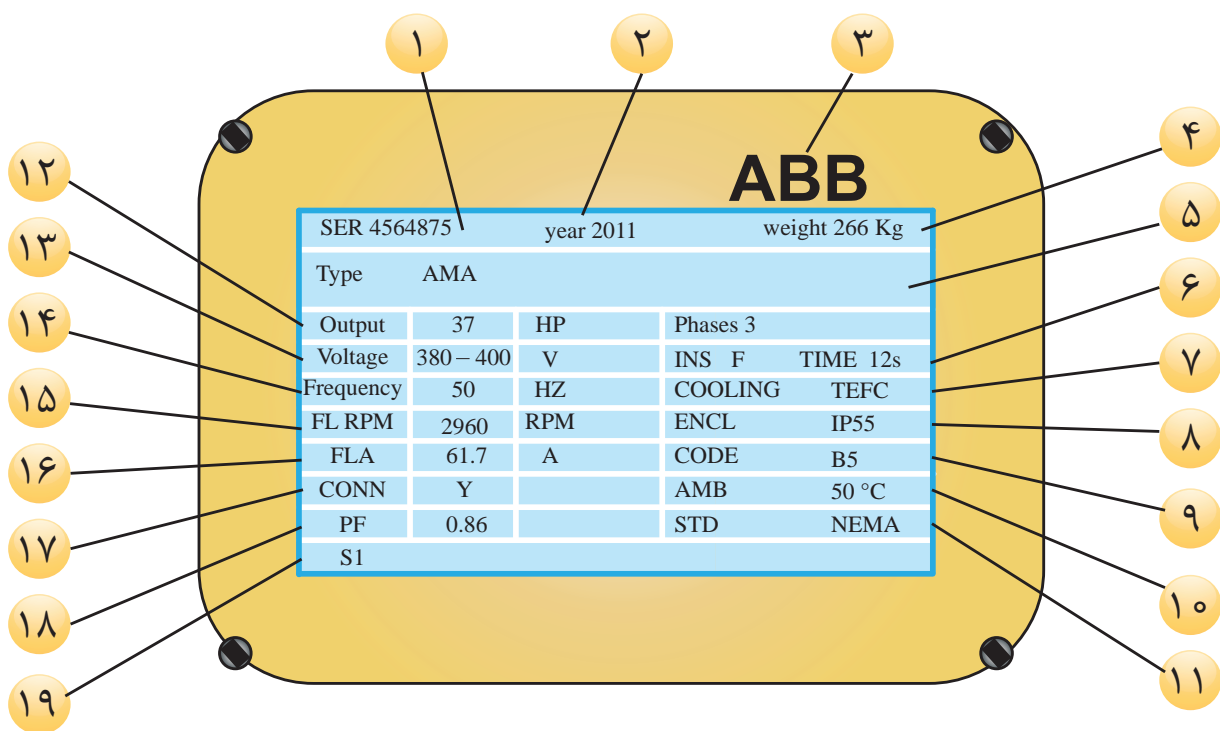
خود را بیازمایید



- ۱- چرا در محاسبات توان تلفاتی و راندمان ماشین‌های القایی از توان راکتیو استفاده نمی‌شود؟
- ۲- منظور از توان نامی موتور القایی چیست؟ رابطه آن را نوشته و کمیت‌های آن را معرفی کنید.
- ۳- چرا در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی شده با افزایش مقاومت رتور، راندمان کاهش می‌یابد؟
- ۴- منظور از تلفات ثابت و متغیر در ماشین‌های القایی چیست؟
- ۵- تلفات استاتور موتور القایی را تشریح کنید.
- ۶- تلفات رتور موتور القایی را تشریح کنید.
- ۷- به کمک نمودار توازن توان موتورهای القایی، توان الکترومغناطیسی را محاسبه کنید.

۲۲-۳- پلاک خوانی موتورهای القایی و استفاده از برگ مشخصات فنی

در شکل (۶۵) یک نمونه پلاک موتور القایی با توضیحات مربوطه نشان داده شده است. لازم به توضیح است که برگه مشخصات فنی همان موتور نیز در ادامه آمده است.



شکل ۶۵- نمونه پلاک موتور

مشخصه	توضیحات
۱_ Serial number	شماره سریال کارخانه ۴۵۶۴۸۷۵
۲_ Manufacturing year	سال تولید ۲۰۱۱ به میلادی
۳_ Manufacturer	سازنده [ABB]
۴_ Machine weight [Kg]	وزن ماشین به کیلوگرم (۲۶۶ کیلوگرم)
۵_ Type designation	نوع موتور با توجه به کد کارخانه
۶_ Insulation class	کلاس عایقی F با ۱۲ ثانیه تحمل در حالت قفل شدگی رتور
۷_ Type of cooling [IC code]	روش خنک سازی TEFC (تقسیم بندی با توجه به استاندارد NEMA)
۸_ Degree of protection [IP class]	درجه حفاظتی IP۵۵ (تقسیم بندی با توجه به استاندارد ۵-۳۴-۶۰)
۹_ Mounting arrangement [IM code]	چگونگی نصب B۵ (تقسیم بندی با توجه به استاندارد NEMA)
۱۰_ Ambient Temperature	دمای محیط ۵۰ درجه سانتی گراد
۱۱_ Standard	استاندارد ساخت NEMA
۱۲_ Output [Kw] or [Hp]	توان خروجی به کیلو وات یا اسب بخار ۳۷ کیلو وات
۱۳_ Stator voltage [V] & Number Of Phase	ولتاژ استاتور به ولت و تعداد فاز ۳۸۰/۴۰۰ ولت سه فاز
۱۴_ Frequency [Hz]	فرکانس منبع ۵۰ هرتز
۱۵_ [Rotating speed [rpm]	سرعت رتور ۲۹۶۰ دور در دقیقه
۱۶_ Stator current [A]	جریان استاتور به ۶۱/۷ آمپر
۱۷_ Type of connection	ستاره
۱۸_ Power factor [cosfi]	ضریب قدرت موتور ۰/۸۶
۱۹_ Duty	روش استفاده دائمی (تقسیم بندی با توجه به استاندارد ۱-۳۴-۶۰) [S۱]

توان خروجی	Output	: 37 kW
فرکانس	Frequency	: 50 Hz
تعداد قطب	Poles	: 2
سرعت نامی	Rated speed	: 2960 rpm
لغزش	Slip	: 1.33 %
ولتاژ نامی	Rated voltage	: 400V
جریان نامی	Rated current	: 67.1 A
جریان راه اندازی	L. R. Amperes	: 470 A
نسبت جریان راه اندازی به جریان نامی	II/In	: 7.0
جریان بی بار	No load current	: 25.0 A
گساور نامی	Rated torque	: 12.2 kgfm
گساور راه اندازی	Locked rotor torque	: 260 %
گساور ماکزیمم	Breakdown torque	: 280 %
کلاس عایقی	Insulation class	: F
زمان تحمل رتور قبل بسدن	Locked rotor time	: 12 s (hot)
ضریب افزایش دما	Service factor	: 1.00
ضریب قدرت نامی	Rated Power factor	: 0.86
ضریب قدرت در حالت رتور قفل شده	Locked rotor Power factor	: 0.17
روس استفاده	Duty cycle	: S1
دهای محیط	Ambient temperature	: 50°C
روس خشک سازی	Cooling method	: TEFC
درجه حفاظت در برابر آب و آسمان خارجی	Enclosure	: IP55
حگونگی نصب	Mounting	: B5
جهت چرخش	Rotation	: Counter clockwise
وزن تقریبی	Aprox. weight*	: 266 kg

خلاف عقربه ساعت

پرسش‌های پایان فصل (۳)

- ۱- نحوه تولید میدان دوار در ماشین‌های القایی را توضیح دهید.
- ۲- چگونه می‌توان جهت میدان را در ماشین القایی تغییر داد؟
- ۳- در یک ماشین القایی با رتور سیم‌پیچی شده؛ استاتور دارای ۲۴ شیار و ۶ قطب و با اتصال مثلث می‌باشد. در مورد تعداد شیار، تعداد قطب و نحوه اتصال سیم‌پیچی رتور توضیح دهید.
- ۴- چرا جریان رتور موتور القایی بعد از راه‌اندازی کاهش می‌یابد؟
- ۵- اجزای تشکیل دهنده رتور قفسی را نام برده و وظیفه هر یک را بیان کنید.
- ۶- استاتور موتور القایی دارای ۸ قطب می‌باشد، در یک سیکل کامل جریان عبوری از آن، رتور چند دور می‌زند؟
- ۷- رفتار ماشین القایی را در لغزش 0° و 1° با یکدیگر مقایسه کنید.
- ۸- مشخصه گشتاور- دور ماشین القایی را ترسیم نموده و نواحی موتوری، مولدی و ترمزی را در آن نشان دهید.
- ۹- یک رتور قفسی، شیارهای نزدیک به سطح با سطح مقطع کوچک دارد، مقاومت القایی و اهمی آن چگونه است؟
- ۱۰- چرا در رتور قفسی هر چه عمق شیار بیشتر باشد راکتانس القایی رتور بیشتر است؟
- ۱۱- در روش راه‌اندازی مستقیم چه نکاتی را باید در نظر داشت؟
- ۱۲- روش راه‌اندازی نرم را توضیح دهید.
- ۱۳- در لحظه راه‌اندازی موتور القایی رتور سیم‌پیچی شده هر چقدر مقاومت اهمی رتور بیشتر باشد، جریان راه‌اندازی و گشتاور راه‌اندازی خواهد بود.
- ۱۴- مزایا و معایب موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی را نسبت به موتورهای رتور قفسی بیان کنید.
- ۱۵- مشخصه گشتاور- دور موتور القایی جهت کنترل سرعت به روش همزمان ولتاژ و فرکانس را در ۳ مرحله ترسیم نمایید.
- ۱۶- تفاوت موتور دالاندر و موتور چند سرعتی با سیم‌پیچ مجزا را بیان کنید.
- ۱۷- آیا می‌توان در موتورهای از روش ترمز مولدی، به تنهایی استفاده نمود؟ چرا؟
- ۱۸- چرا ماشین القایی که به صورت ژنراتور کار می‌کند به توان راکتیو احتیاج دارد؟
- ۱۹- چرا در ماشین‌های القایی تلفات هسته و تلفات مکانیکی را در تمام مراحل کاری ثابت فرض می‌کنند؟
- ۲۰- مشخصات فنی موتور LD۴۱-۴۰۰ HXR را از کاتالوگ صفحه بعد استخراج نمایید.

Output kW	Motor type	Speed r/min	Efficiency		Power factor		Current			Torque			Motor weight kg
			Full load 100%	3/4 load 75%	Full load 100%	3/4 load 75%	I_N A	$\frac{I_s}{I_N}$	I_0 A	T_N Nm	$\frac{T_s}{T_N}$	$\frac{T_{max}}{T_N}$	
6000 V 50 Hz													
1500 r/min = 4 poles													
160	HXR 355LA4 1	1487	94.6	94.3	0.82	0.77	20	5.6	8	1028	0.9	2.2	1720
180	HXR 355LA4 2	1486	94.7	94.5	0.81	0.77	23	5.4	9	1157	0.8	2.0	1730
200	HXR 355LA4 3	1486	94.9	94.8	0.83	0.79	25	5.3	10	1285	0.8	2.1	1730
224	HXR 355LC4 1	1486	95.0	94.9	0.82	0.79	28	5.3	11	1440	0.8	2.1	1730
250	HXR 355LC4 2	1486	95.3	95.3	0.83	0.80	30	5.5	11	1606	0.8	2.1	1830
280	HXR 355LC4 3	1487	95.4	95.3	0.84	0.81	34	6.5	13	1798	1.1	2.3	1780
315	HXR 355LE4	1488	95.6	95.6	0.85	0.81	37	6.5	14	2021	1.1	2.3	1970
355	HXR 400LC4	1486	96.0	96.0	0.86	0.84	41	5.2	13	2281	0.7	2.0	2530
400	HXR 400LD4 1	1487	96.2	96.2	0.86	0.83	47	5.5	15	2568	0.8	2.1	2660
450	HXR 400LD4 2	1490	96.5	96.5	0.87	0.85	52	6.2	16	2884	0.9	2.2	2720
500	HXR 400LE4	1490	96.6	96.6	0.88	0.86	57	6.1	17	3204	0.9	2.1	2850
560	HXR 400LG4	1491	96.8	96.8	0.87	0.85	64	6.3	19	3587	0.9	2.2	3100
630	HXR 450LE4	1492	96.9	96.8	0.87	0.84	72	6.6	24	4031	0.8	2.4	3810
710	HXR 450LG4	1492	97.0	97.0	0.88	0.86	80	6.4	24	4545	0.8	2.3	4130
800	HXR 450LJ4	1492	97.2	97.2	0.88	0.87	90	6.3	25	5121	0.8	2.2	4450
900	HXR 500LF4	1491	97.1	97.1	0.89	0.87	100	6.1	28	5763	0.8	2.2	5430
1000	HXR 500LG4	1492	97.2	97.2	0.89	0.87	112	6.2	32	6401	0.8	2.2	5690
1120	HXR 500LJ4	1493	97.3	97.3	0.88	0.86	125	6.6	37	7165	0.8	2.3	6080
1250	HXR 500LP4	1493	97.5	97.5	0.88	0.86	140	6.5	42	7994	0.8	2.3	7030

مسائل پایانی فصل (۳)

۱- یک ماشین القایی شش قطب، 60 Hz با سرعت 880 RPM می‌چرخد. به دست آورید:

الف) سرعت میدان دوار

ب) سرعت لغزش

ج) مقدار لغزش

۲- کمیت‌های رتور یک موتور القایی 50 Hz در لحظه

راه‌اندازی به ترتیب:

$$E_r = 50\text{ V}, R_r = 0.5\ \Omega, X_r = 2\ \Omega$$

مطلوب است محاسبه هر یک از کمیت‌های فوق در لغزش

۱۵ درصد

۳- یک موتور القایی ۴ قطب 50 Hz هرگز در لحظه

راه‌اندازی دارای مقاومت اهمی $0.4\ \Omega$ و راکتانس $1/2\ \Omega$

می‌باشد. چنانچه ولتاژ القایی هر فاز رتور 45 V باشد، جریان

و ضریب قدرت رتور را در حالات زیر به دست آورید:

الف) در راه‌اندازی

ب) در سرعت 1350 RPM

۴- اگر در یک ماشین القایی مقادیر ولتاژ، مقاومت

القایی و مقاومت اهمی به ترتیب 40 V ، $1/5\ \Omega$ ، $0.6\ \Omega$ باشد

به دست آورید:

الف) در چه لغزشی جریان رتور $2/5$ آمپر خواهد شد؟

ب) در چه لغزشی اختلاف فاز رتور 45 درجه خواهد شد؟

ج) اگر سرعت میدان دوار 1000 RPM باشد در چه

سرعتی گشتاور ماکزیمم اتفاق می‌افتد؟

۵- توان الکترومغناطیسی یک موتور القایی 6400

وات و تلفات استاتور 360 وات و راندمان 89 درصد می‌باشد.

توان‌های ورودی و خروجی موتور را به دست آورید.

۶- توان دریافتی یک موتور القایی از شبکه 400 V ولت در

بار نامی برابر با 6850 W و توان الکترومغناطیسی آن 6340 وات

است. اگر تلفات آهنی موتور 230 W و ضریب قدرت موتور

0.87 باشد. به دست آورید:

الف) تلفات مسی استاتور

ب) جریان دریافتی موتور از شبکه

۷- یک موتور القایی 400 V ولت، در بار نامی 350 آمپر

از شبکه دریافت می‌کند. چنانچه مجموع تلفات 20 کیلووات و

ضریب قدرت آن 0.83 باشد، به دست آورید:

الف) توان دریافتی از شبکه

ب) توان خروجی

ج) راندمان موتور

۸- یک موتور القایی ۶ قطب در شبکه 400 V ، 50 Hz

بار مکانیکی نامی با توان 3500 W را می‌چرخاند. اگر تلفات ژولی

رتور 189 W و تلفات مکانیکی آن 81 W باشد به دست آورید:

الف) توان الکترومغناطیسی

ب) گشتاور الکترومغناطیسی

ج) لغزش موتور در نقطه کار و سرعت رتور

د) گشتاور خروجی