پودمان سوم

تحلیل ماشین‌های الکتریکی سه فاز (موتورهای القایی)

واحد یادگیری ۱

آیا می‌دانید

۱ـ ساختمان موتورهای آسنکرون رتور قفسی از چه اجزایی تشکیل شده است؟
۲ـ میدان دّوار در موتورهای الکتریکی سه فاز چگونه تشکیل می‌شود؟
۳ـ تغییرات بار مکانیکی چه تأثیری بر لغزش موتور الکتریکی دارد؟
۴ـ مشخصه‌های موتورهای الکتریکی کدام‌اند؟
۵ـ روش‌های راه‌اندازی موتورهای الکتریکی سه فاز کدام است؟

استاندارد عملکرد

پس از پایان این پودمان هنرجویان قادر خواهند بود مراحل تشکیل میدان دوار در موتور الکتریکی سه فاز را شرح داده و تغییرات رفتار ماشین الکتریکی دوار را با تغییرات لغزش تشریح کنند. همچنین راه‌اندازی‌های متفاوت موتورهای الکتریکی و دیاگرام توان و تلفات موتور الکتریکی را توضیح دهند.

۱ـ۳ـ مقدمه

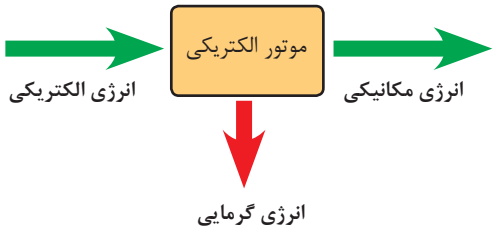
ماشین‌های الکتریکی می‌توانند انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی یا انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند.

در واقع ماشین الکتریکی یک رابط بین سیستم الکتریکی و سیستم مکانیکی می‌باشد. این ارتباط در ماشین‌های الکتریکی برمبنای میدان الکترومغناطیسی صورت می‌گیرد.

سیستم الکتریکی شامل کمیت‌هایی مانند ولتاژ، جریان، ضریب قدرت و توان‌های الکتریکی می‌باشد. اما سیستم مکانیکی شامل کمیت‌هایی از قبیل سرعت، گشتاور و توان مکانیکی است.

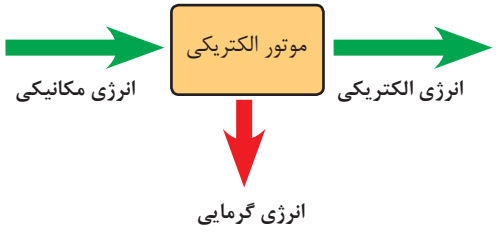
ماشین‌های الکتریکی به دو صورت موتورها و ژنراتورهای الکتریکی استفاده می‌شوند.

ماشین‌های الکتریکی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند **موتورهای الکتریکی** گویند. شکل (۱)



شکل ۱ـ بلوک دیاگرام تبدیل انرژی در موتورهای الکتریکی

ماشین‌هایی که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند **ژنراتورهای الکتریکی** گویند. شکل (۲)



شکل ۲ـ بلوک دیاگرام تبدیل انرژی در ژنراتورهای الکتریکی

تقسیم‌بندی کلی از ماشین‌های الکتریکی در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳ـ تقسیم‌بندی کلی از ماشین‌های الکتریکی

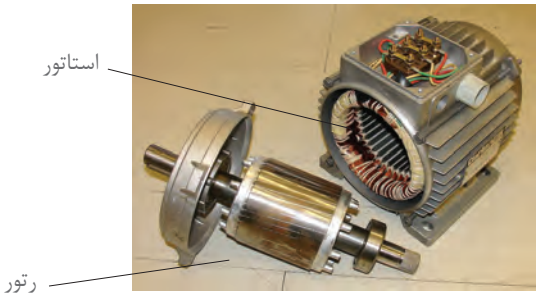
موتورهای الکتریکی آسنکرون از پرکاربردترین موتورهای AC هستند. این موتورها در به‌حرکت در آوردن چرخ‌های صنعت نقش بسزایی دارند. توان موتورهای الکتریکی آسنکرون از چند وات تا چند ده مگا وات ساخته و بهره‌برداری می‌شوند.

فعالیت

دسته‌بندی توان موتورهای الکتریکی برحسب اسب بخار وکیلووات را در جدولی بنویسید؟

۲ـ۳ـ ساختمان موتورهای آسنکرون

ساختمان موتورهای آسنکرون از دو بخش اصلی استاتور و رتور تشکیل شده است. استاتور بخش ثابت و رتور بخش متحرک موتور می‌باشد. در شکل (۴) ساختمان موتور الکتریکی آسنکرون نشان داده شده است.

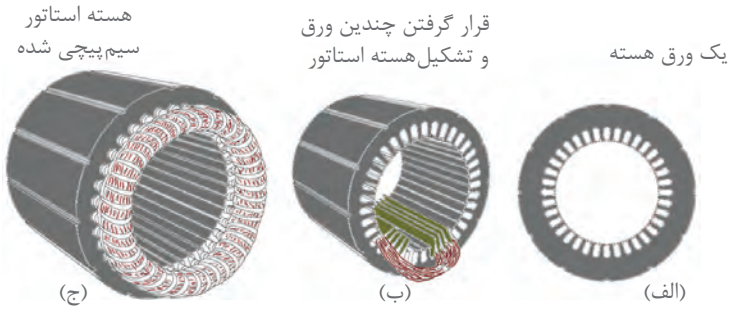


شکل ۴ـ اجزای کلی ساختمان موتورهای آسنکرون

الف) استاتور

استاتور یا قسمت ساکن موتورهای الکتریکی آسنکرون شامل بدنه، هسته مغناطیسی، سیم‌پیچ‌ها و یاتاقان‌ها می‌باشد.

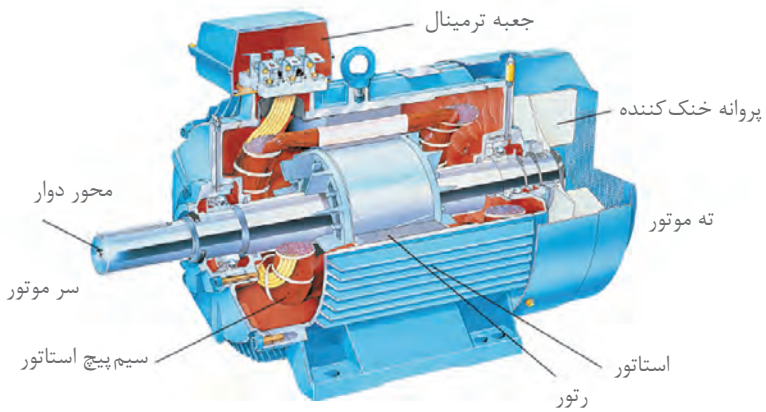
هسته استاتور، مجموعه‌ای از ورق‌های فولادی است که در سطح داخلی آن برش‌هایی مطابق شکل (۵ـ الف) ایجاد شده است. پس از قرار گرفتن این ورق‌ها در کنار هم، حجم استوانه‌ای با شیارهایی در سطح داخلی آن ایجاد خواهد شد. شکل(۵ـ ب) سیم‌پیچ‌های سه فاز موتور الکتریکی آسنکرون مطابق شکل (۵ـ ج) در داخل شیارها قرار می‌گیرند.



شکل ۵ـ اجزای استاتور موتورهای آسنکرون

در موتورهای آسنکرون نیز مشابه ترانسفورماتورها برای کاهش تلفات هیسترزیس، جنس هسته از فولاد

مغناطیسی با پسماند کم انتخاب می‌شود تا تلفات هیسترزیس کم شود. همچنین برای کاهش تلفات فوکو، هسته استاتور از ورق‌های فولادی با روکش عایق ساخته می‌شود. بدنهٔ موتورهای الکتریکی از جنس چدنی یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. سطح خارجی بدنه موتورها به‌صورت پره پره ساخته می‌شود تا سطح تماس بیشتری با هوای محیط داشته باشد و عمل تهویه و خنک‌سازی سیم‌پیچی بهتر انجام شود. وظیفهٔ بدنه موتور محافظت از هسته و سیم‌پیچ‌ها در برابر ورود اجسام خارجی است. برای اتصال سیم پیچ‌های استاتور به شبکه الکتریکی بر روی بدنه موتور جعبه ترمینالی تعبیه شده است. به این جعبه ترمینال «تخته کلم» نیز می‌گویند. درپوش‌ها و یاتاقان‌های موتور به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که قسمت متحرک موتور (رتور) به‌راحتی در داخل استاتور بچرخد و تکیه‌گاه مکانیکی مناسبی برای رتور فراهم شود. درپوش‌ها، یاتاقان‌ها و پروانه خنک‌کننده جزو تجهیزات مکانیکی ماشین محسوب می‌شوند. (شکل ۶)

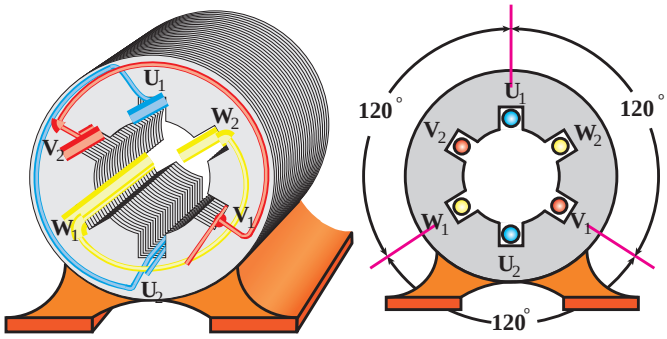


شکل ۶ـ اجزای مختلف استاتور ماشین الکتریکی

در موتورهای سنگین که جابه‌جایی آن برای افراد میسر نیست، یک قلاب در بالای بدنه ماشین پیش‌بینی می‌شود که بتوان با جرثقیل آن را جا به‌جا نمود. (شکل ۷) اجزای مختلف استاتور را نمایش می‌دهد.

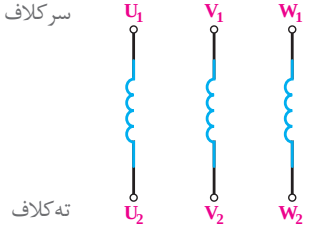
شکل ۷ـ موتورالقایی آسنکرون با توان بالا دارای حلقه جابه‌جایی

استاتور موتورهای آسنکرون سه فاز از سه گروه کلاف سیم‌پیچی تشکیل شده است. با توجه به فضای ۳۶۰° دایره‌ای شکل استاتور، سیم‌پیچ‌ها به گونه‌ای جاسازی می‌شوند که سیم‌پیچی هر فاز با سیم‌پیچی فاز دیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی داشته باشند. در مباحث تئوری برای تحلیل آسان‌تر معمولاً استاتوری با ۶ شیار جهت جازدن این سه گروه کلاف سیم‌پیچی در نظرگرفته می‌شود (شکل ۸). اما در واقعیت تعداد شیارهای استاتور موتورهای آسنکرون می‌تواند بیشتر از این تعداد باشد.



شکل ۸ــ سه گروه سیم‌پیچ

سر سه گروه کلاف سیم پیچ موتور با حروف (U_1 , V_1 , W_1) وته گروه کلاف را با حروف (U_2 , V_2 , W_2) نشان داده می‌شوند. شکل (۹)



شکل ۹ــ نام‌گذاری سیم‌پیچی موتورهای الکتریکی سه فاز

ب) رتور

به قسمت گردان موتورهای الکتریکی «رتور » گویند. روتورموتورهای آسنکرون بر دو نوع است:

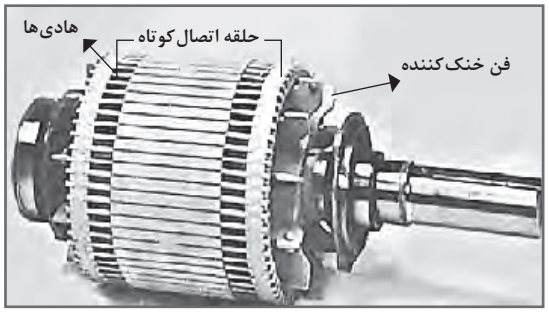
۱ـ رتور قفسی

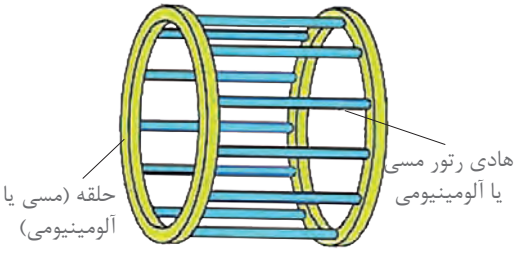
۲ـ رتور سیم پیچی شده

هر دو نوع رتور دارای هسته مغناطیسی استوانه شکلی هستند که محور فولادی از مرکز هسته مغناطیسی عبورکرده است.

۱ــ رتور قفسی: رتورقفسی از تعدادی مفتول، دو حلقه‌هادی و هسته آهنی تشکیل شده است. ابتدا و انتهای مفتول‌ها توسط دو حلقه‌هادی به‌یکدیگر متصل شده‌اند. چون شکل ایجاد شده شبیه قفس است به همین دلیل به این رتورها «رتور قفسی » می‌گویند.

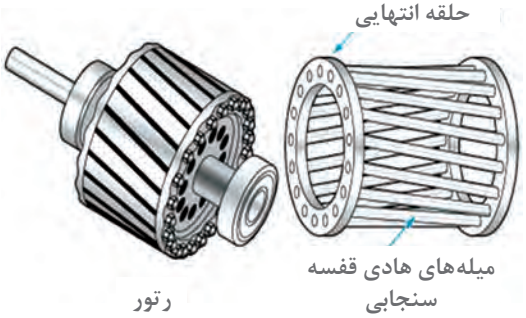
برای ایجاد این مفتول‌ها در رتور چنین عمل می‌شود که پس از چیدمان ورقه‌های هسته، آلومینیوم مذاب را در داخل شیارهای هسته رتور تزریق می‌کنند. آلومینیوم مذاب پس از سرد شدن در داخل شیارهای هسته مانند شمش یا مفتول درمی‌آید (شکل ۱۰).





شکل ۱۰ــ ساختمان رتور قفسی

در برخی رتورهای قفسی از مفتول‌های مسی استفاده می‌شود. در اغلب موتورهای آسنکرون شیارهای رتور با محور رتور موازی نیستند یعنی شیارها نسبت به محور رتور مورب قرار می‌گیرند. علت این کار این است تا به هنگام راه‌اندازی، موتور سر و صدای کمتری داشته باشد. معمولاً انحراف شیارهای رتور به اندازهٔ پهنای یک شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۱)



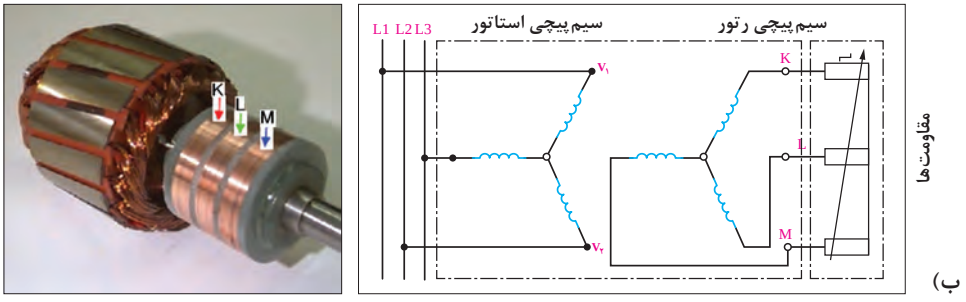
شکل ۱۱

۲ـ رتور سیم‌پیچی شده: رتور سیم‌پیچی از سه گروه کلاف تشکیل شده است. این سه گروه کلاف با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی دارند.

سه گروه سیم‌پیچی رتور به‌صورت ستاره به یکدیگر اتصال دارند. سر کلاف‌ها به سه حلقه که بر روی محور رتور سوار شده‌اند متصل هستند. به این سه حلقه «رینگ» نیز گفته می‌شود. شکل (۱۲ـ الف) تصویر یک نمونه رتور سیم‌پیچی را نشان می‌دهد.

برای برقراری ارتباط الکتریکی با سیم‌پیچی رتور از جاروبک‌هایی استفاده می‌شود که بر روی رینگ‌ها می‌لغزند.

در موتورهای رتور سیم‌پیچی با قرار دادن مقاومت در مسیر سیم‌پیچی رتور می‌توان جریان جاری در سیم‌پیچی رتور را کنترل کرد. (شکل۱۲ـ ب)



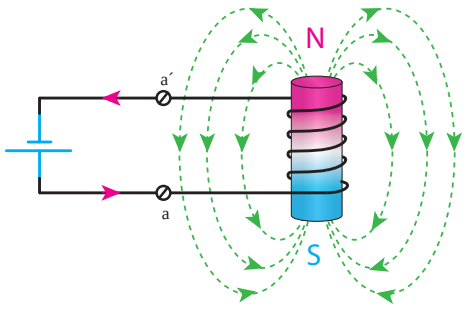
شکل ۱۲ـ رتور سیم‌پیچی

پرسش

۱ـ ماشین‌هایی که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند چه نام دارد؟
الف) ژنراتور ب) موتور ج) ترانسفورماتور د) رتورسیم‌پیچی
۲ـ بدنه استاتور موتورهای سه فاز آسنکرون از کدام جنس ساخته می‌شود؟
الف) مس ب) سرب ج) آلومینیوم د) چدن
۳ـ علت انحراف شیارهای رتور در موتورهای القایی چیست؟
الف) کاهش سرو صدا در زمان گردش موتور ب) افزایش راندمان موتور
ج) کاهش اصطکاک قطعات مکانیکی د) افزایش دامنه تغییرات سرعت موتور
۴ـ با رسم شکل ساختمان داخلی رتورهای قفسی را شرح دهید.
۵ـ با رسم کلاف‌های موتور و نام‌گذاری سر وته آنها اتصال‌های ستاره و مثلث را رسم کنید.
۶ـ مدار الکتریکی رتور سیم‌پیچی را رسم کنید.
۷ـ حلقه‌های طرفین رتور قفسی باعث اتصال کوتاه شدن مفتول‌ها می‌شود.
☐ صحیح ☐ غلط
۸ـ به منظورکاهش تلفات هیسترزیس، هسته‌های استاتور را ورق ورق می‌سازند.
☐ صحیح ☐ غلط
۹ـ وظیفه درپوش موتور حفاظت سیم‌پیچی استاتور در برابر ورود اجسام خارجی است.
☐ صحیح ☐ غلط
۱۰ـ سیم‌پیچی‌های موتور با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی دارد.
☐ صحیح ☐ غلط

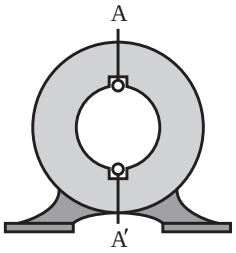
۳ـ۳ـ پدیده میدان دوار مغناطیسی در موتورهای الکتریکی

اگر یک سیم پیچ به جریان DC متصل شود میدان مغناطیسی درون آن ایجاد می‌شود که مقدار و جهت آن تغییر نمی‌کند. این میدان مغناطیسی را «**میدان ثابت**» گویند. جهت این میدان را با قانون دست راست می‌توان تعیین کرد. در شکل ۱۳ این مطلب قابل مشاهده است.



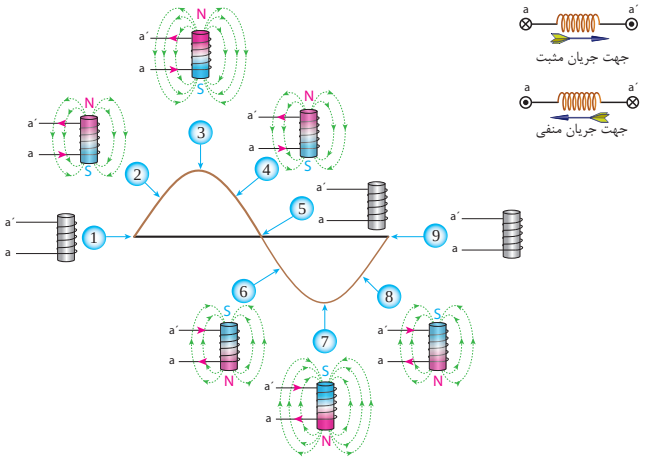
شکل ۱۳ـ میدان مغناطیسی ثابت

اگر همین سیم پیچ را مانند شکل ۱۴ در داخل استاتور یک موتور آسنکرون قرار گیرد و به آن منبع AC تکفاز وصل شود.



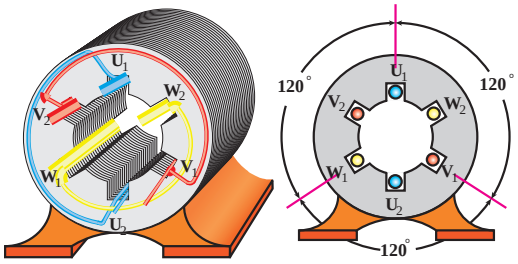
شکل ۱۴ــ قرارگرفتن سیم‌پیچی در داخل استاتور

با عبور جریان متناوب تک فاز، میدانی ایجاد می‌شود که مقدار آن متناسب با جریان تغییر می‌کند و جهت آن در هر نیم سیکل عوض می‌شود. این میدان را «**میدان نوسانی** » گویند. (شکل۱۵)



شکل ۱۵ــ چگونگی تولید میدان نوسانی

اکنون استاتوری با شش شیار را مطابق (شکل ۱۶) در نظر بگیرید به‌طوری که سه گروه کلاف با اختلاف فاز مکانی ۱۲۰° درون شیارها قرار داده شده است.

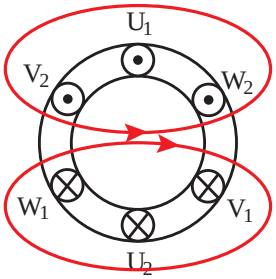


شکل ۱۶ــ نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچی‌های موتور سه فاز

با اتصال جریان‌های سه فاز متناوب به سیم‌پیچی‌های استاتور، سیم‌پیچی‌های هر کلاف میدان مغناطیسی تولید می‌کنند.

اندازه برآیند میدان مغناطیسی سه سیم‌پیچی در فضای درون استاتور در هر لحظه مقداری ثابت است.

با توجه به مقدار جریان سینوسی متناوب سه فاز و ترسیم برایند میدان مغناطیسی سیم پیچ‌ها در لحظات مختلف موقعیت میدان مغناطیسی درون استاتور مشخص خواهد شد (شکل۱۷).



شکل ۱۷ـ چگونگی میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچی‌های سه فاز

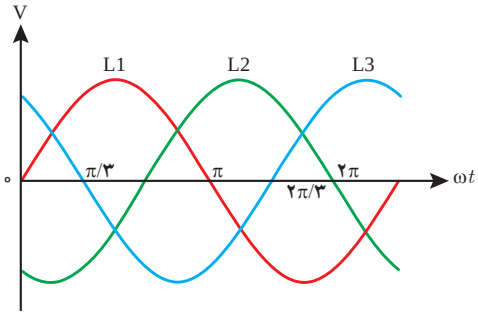
میدان مغناطیسی که با دامنه ثابت درون استاتور با سرعت ثابت می‌گردد را «**میدان دوار**» گویند.

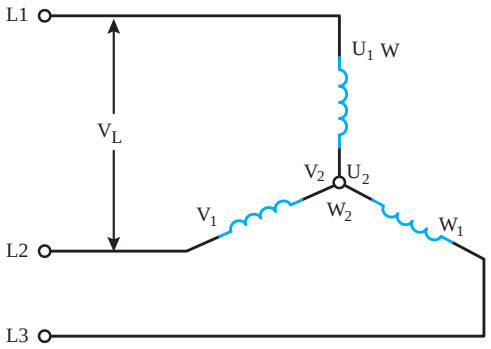
برای به‌دست آوردن وضعیت میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان الکتریکی سه فازه از سیم‌پیچ‌های استاتور چنین بایدعمل کرد.

۱ـ سیم‌پیچی‌های استاتور به‌صورت ستاره اتصال داده شوند.

۲ـ ولتاژهای سه فاز L_1، L_2 وL_3 به سر کلاف‌های W_1 ، V_1 و U_1 اعمال شود. (شکل ۱۸)

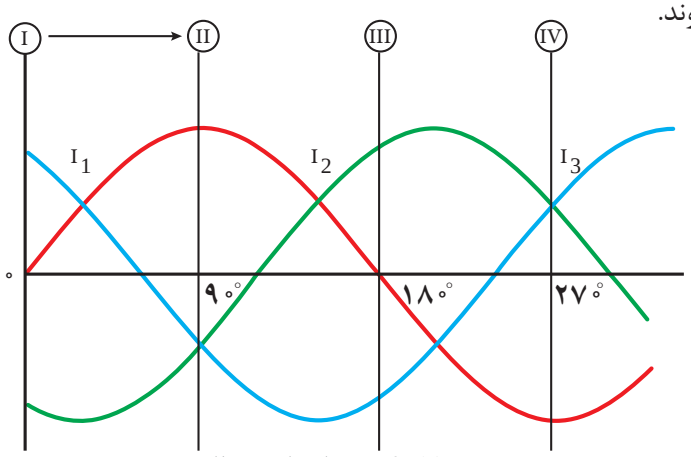
۳ـ شکل موج‌های سه فاز بر اساس زوایا و با رعایت دقیق اختلاف ۱۲۰ درجه‌ای بین فازها رسم شوند.





شکل ۱۸ـ نحوه اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور موتور به شبکه سه فاز

۴ـ درچند موقعیت از جریان متناوب سه‌فاز، جهت جریان سیم‌پیچ‌ها بررسی شوند تا مکان قطب‌ها درسطح استاتور مشخص شوند.



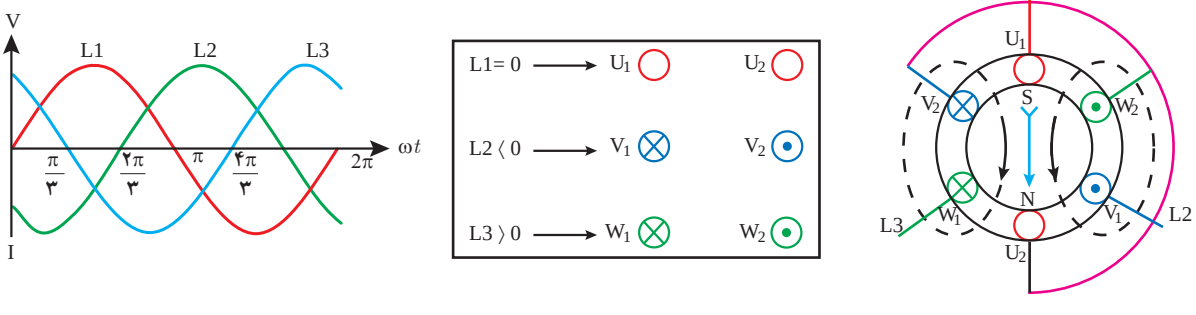
شکل ۱۹ـ جریان‌های سه فاز

برای بررسی و ترسیم وضعیت میدان مغناطیسی دوار ایجاد شده در استاتور از قواعد زیر باید استفاده کرد:
الف) برای تعیین جهت میدان مغناطیسی در سر و ته سیم‌پیچی‌ها از قاعده دست راست استفاده شود.
ب) لحظاتی که جریان جاری در سیم‌پیچی هر فاز استاتور در نیم سیکل مثبت باشد باید جریان از سر سیم پیچ وارد و از ته سیم پیچ خارج شود و طبق قاعده دست راست باید جهت جریان آن‌را با علامت ⊗ نشان داد شکل (۲۰ـ الف).
ج) لحظاتی که جریان جاری در سیم‌پیچی هر فاز استاتور در نیم سیکل منفی باشد باید جریان از سر سیم‌پیچ خارج و از ته سیم‌پیچ وارد شود و طبق قاعده دست راست باید جهت آن را با علامت (⊙) نشان داد. شکل (۲۰ ـ ب)

الف) جهت ورود جریان از سر سیم‌پیچ　　ب) جهت ورود جریان از ته سیم‌پیچ

شکل ۲۰ـ جهت جریان جاری در سیم‌پیچ‌ها

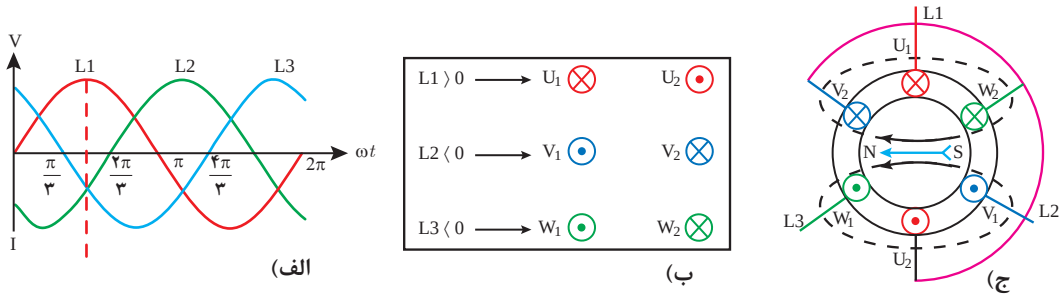
موقعیت ۱ ($\omega t = 0^\circ$): در این موقعیت مقدار جریان فاز L_1 برابر صفر و در نتیجه از سیم پیچ $U_1 U_2$ جریانی عبور نمی‌کند. فاز L_3 در نیم سیکل مثبت بوده و جریان از سر سیم پیچ سوم یعنی W_1 وارد و از انتهای سیم‌پیچ W_2 خارج می‌شود. پس ورودی W_1 علامت ⊗ و خروجی W_2 علامت (⊙) خواهد داشت. در همین موقعیت فاز L_2 در نیم سیکل منفی است، در نتیجه جریان الکتریکی ازسر سیم پیچ دوم (B) خارج شده و از ا نتهای سیم پیچ V_2 وارد می‌شود، پس ورودی V_1 علامت (⊙) و خروجی V_2 علامت ⊗ خواهد داشت. در انتها باید با توجه به قاعده دست راست جهت میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌هایی که دارای یک جهت جریان هستند را مشخص کرده و مطابق شکل (۲۱) میدان مغناطیسی پدید آمده در فضای داخلی استاتور را تعیین کرد جهت‌گیری عقربه مغناطیسی درون استاتور بیانگر این موضوع است.
برای تحلیل خلاصه‌تری از وضعیت جریان‌های جاری در سیم پیچ‌ها و جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده از روش اختصار شده شکل (۲۱ـ ب) می‌توان استفاده کرد.



الف)　　ب)　　ج)

شکل ۲۱ـ وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۱ ($\omega t = 0^\circ$)

موقعیت ۲ ($\omega t = ۹۰^\circ$): همان‌گونه که در شکل (۲۲ـ الف) مشاهده می‌شود فاز L_1 در مقدار حداکثری نیم سیکل مثبت و فاز L_2 و L_3 در نیم سیکل منفی هستند. پس جریان از سر سیم پیچ اول یعنی وارد U_1 و از سر کلاف‌های V_1 و W_1 خارج می‌شوند. در (شکل ۲۲ـ ب) وضعیت سیم پیچ‌ها به‌صورت خلاصه نشان داده شده است. همان‌گونه که در (شکل ۲۲ـ ج) عقربه مغناطیسی نشان می‌دهد با توجه به قطب‌سازی صورت گرفته میدان مغناطیسی به اندازه ۹۰ درجه چرخیده است.

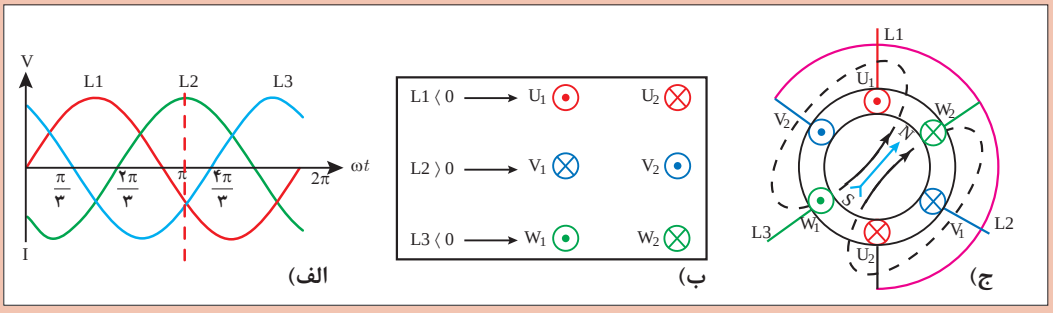


شکل ۲۲ـ وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۲ ($\omega t = ۹۰^\circ$)

موقعیت ۳ ($\omega t = ۲۱۰^\circ$): در این موقعیت فاز L_2 در مقدار حداکثری مثبت خود بوده و فازهای L_1 و L_3 در موقعیت نیم سیکل منفی هستند. پس مشابه موقعیت ۲، دو فاز در وضعیت نیم سیکل منفی قرار دارند. در (شکل ۲۳ـ ب) وضعیت ورود و خروج جریان در سیم پیچ‌ها به‌طور خلاصه نشان داده شده است. با کمی‌دقت و مقایسه دو شکل (۲۲ـ ج) و (۲۳ـ ج) می‌توان مشاهده کرد که میدان مغناطیسی به‌وجود آمده در این وضعیت به‌اندازه ۱۲۰ درجه تغییر مکان داشته است.

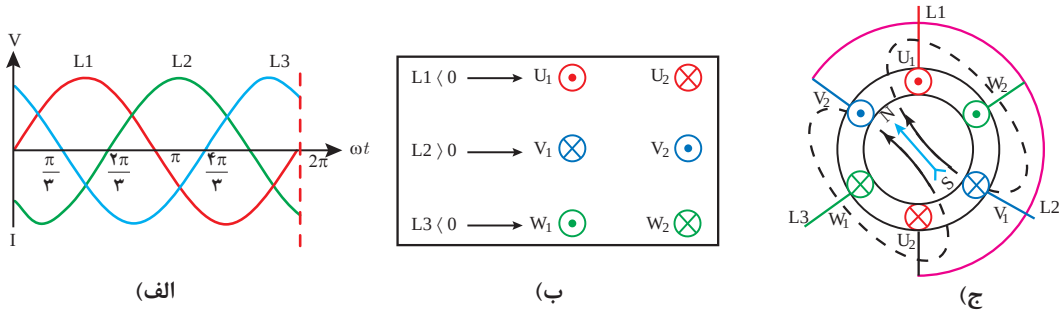
سؤال

چرا در موقعیت ۳ میدان به اندازهٔ ۱۲۰ درجه نسبت به موقعیت ۲ تغییر مکان داشته است؟



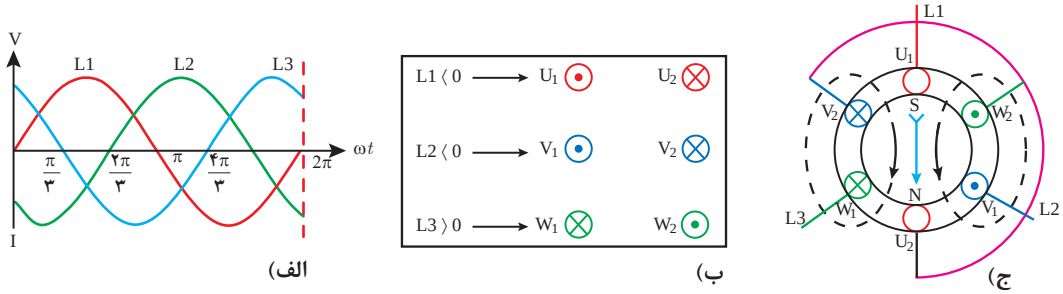
شکل ۲۳ـ وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۳ ($\omega t = ۲۱۰^\circ$)

موقعیت ۴ ($\omega t = ۲۷۰^\circ$): در این موقعیت فاز L_2 جای خود را به فاز L_3 داده است. به‌طوری که در شکل (۲۴) مشخص است فاز L_3 در مقدار حداکثری نیم سیکل مثبت خود اما دو فاز دیگر یعنی فازهای L_1 و L_2 در نیم سیکل منفی هستند. در (شکل ۲۴ـ ب) وضعیت ورود و خروج جریان در سیم پیچ‌ها و در شکل (۲۴ـ ج) وضعیت میدان مغناطیسی دوار نشان داده شده است.



شکل ۲۴ـ وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۴ ($\omega t = ۲۷۰^\circ$)

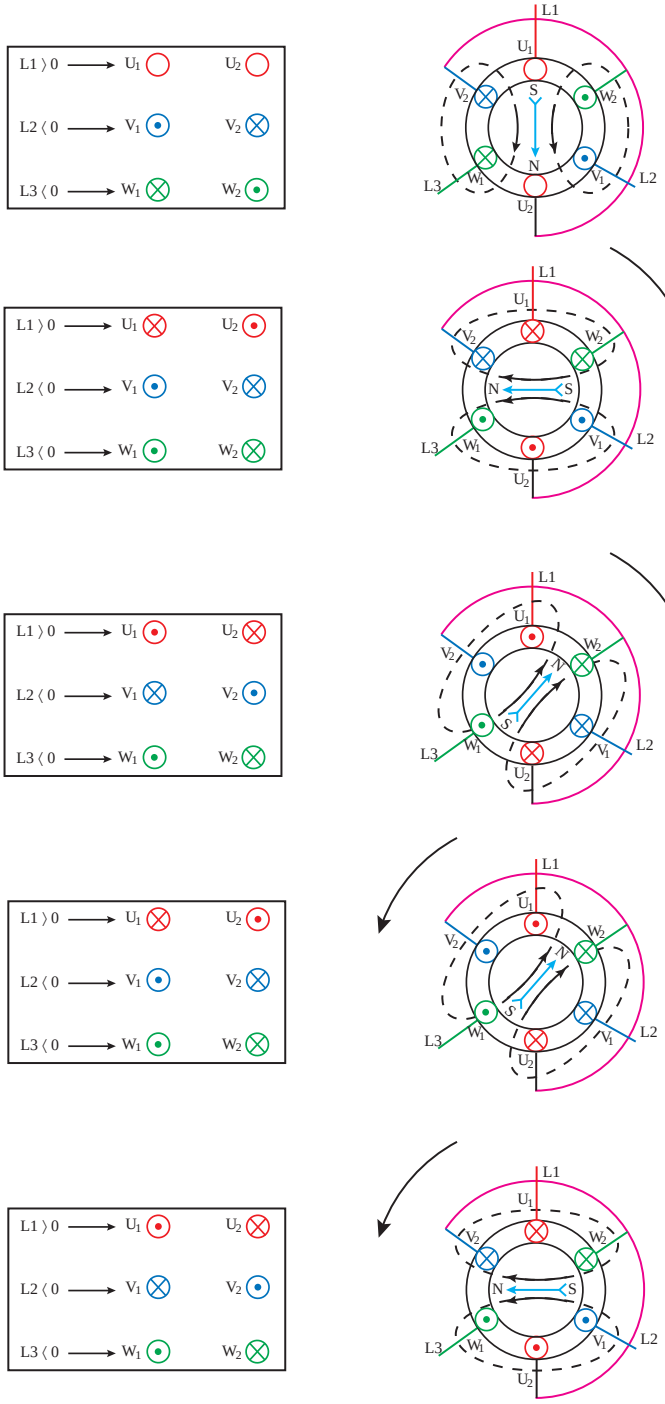
موقعیت ۵ ($\omega t = ۳۶۰^\circ$): این موقعیت مشابه موقعیت ۱ است چرا که در انتهای سیکل موقعیت فازها به همان موقعیت اول برگشته است. (شکل ۲۵ـ الف) لذا قطب‌های حاصل از میدان مغناطیسی در همان موقعیت ۱ قرار گرفته است. همان‌طوری که در شکل (۲۵ـ ب) مشاهده می‌کنید فاز L_1 برابر صفر، فاز L_2 در نیم سیکل منفی و فاز L_3 درنیم سیکل مثبت قرار دارند. بنابراین در طی یک سیکل جریان متناوب، قطب سازی‌های مختلف صورت گرفته و میدان مغناطیسی در فضای داخلی استاتور به گردش در آمده و با طی کردن یک دور کامل در نهایت به همان وضعیت اول بازگشته است. شکل (۲۵ـ ج)



شکل۲۵ـ وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۵ ($\omega t = ۳۶۰^\circ$)

۴ـ۳ـ تغییر جهت چرخشی میدان دوار

در صورتی که جای دو فاز از سه فاز متصل شده به موتورالکتریکی به اختیار عوض شود،جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار استاتور عوض می‌شود. برای تغییرجهت گردش موتورها ازکلید چپگرد ـ راستگرد یامدارهای کنتاکتوری استفاده می‌شود. برای نشان دادن تغییر جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار می‌توان از روش ترسیمی‌استفاده کرد. در اینجا برای مقایسه وضعیت میدان‌های مغناطیسی در دو حالت راستگرد و چپگرد، وضعیت میدان دوار در سه موقعیت $\omega t = ۰^\circ$، $\omega t = ۹۰^\circ$ و $\omega t = ۲۱۰^\circ$ نشان داده شده است. شکل ۲۵ـ الف وضعیت میدان دوار درشرایط راستگرد و شکل ۲۵ـ ب وضعیت میدان در شرایط چپگرد را نشان می‌دهد.



شکل ۲۶ـ وضعیت میدان مغناطیسی در شرایط جابه‌جایی دو فاز

همان‌گونه که در تصاویر شکل (۲۶) مشاهده می‌کنید با جابه‌جایی دو فاز، قطب‌سازی داخل استاتور و جهت گردش میدان مغناطیسی تغییر کرده است.

تمرین

وضعیت جریان‌های سه فاز متصل به سیم پیچ‌های استاتور یک موتور سه فاز و نحوه ایجاد میدان مغناطیسی ایجاد شده در دو حالت راست‌گرد و چپ‌گرد را در موقعیت‌های ($\omega t = ۶۰^\circ$، $\omega t = ۱۵۰^\circ$ و $\omega t = ۲۴۰^\circ$) را ترسیم کنید.

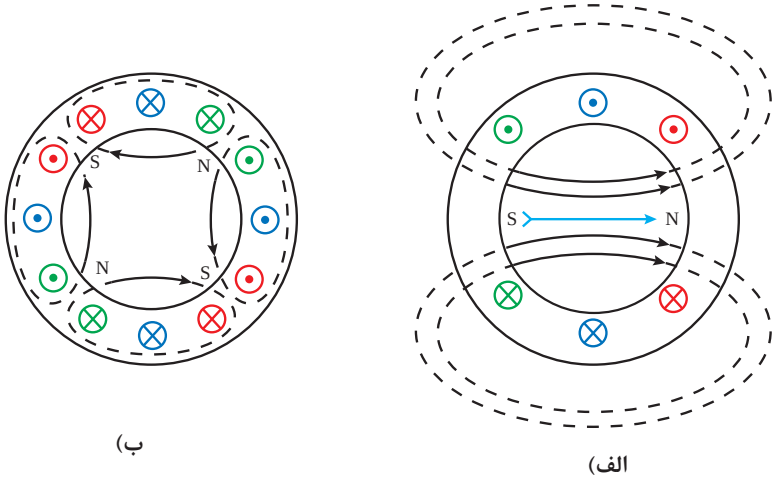
۵ـ۳ـ عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

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 موج جریان سریع‌تر باشد، و در زمان تناوب کوتاه‌تری تکرار شود سرعت گردش میدان دوار بیشتر خواهد شد. با افزایش زمان دوره تناوب موج جریان، سرعت گردش میدان دوار کندتر می شود.

سرعت میدان دوار با زمان تناوب رابطه عکس دارد. بین زمان تناوب و فرکانس رابطه ($f = \frac{۱}{T}$) برقرار است. با تغییر فرکانس، زمان تناوب موج جریان و سرعت گردش میدان دوار تغییر می‌کند.

$$n_s \propto f$$

سرعت میدان دوار موتورآسنکرون را «سرعت سنکرون » می‌نامند و با n_s نمایش می‌دهند.
با افزایش تعداد کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور موتورهای سه فاز، فاصله بین قطب‌ها کم می شود و در نتیجه سرعت میدان دوار کاهش می‌یابد. (شکل ۲۷ـ ب)
در میدان دوار چهار قطبی فاصله بین قطب‌ها نصف فاصله بین قطب‌های میدان دوار دو قطبی است.



ب) الف)

شکل ۲۷ـ افزایش تعداد قطب

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت عامل دیگر تعیین کننده سرعت میدان دوار، تعداد قطب‌های سیم‌بندی موتورآسنکرون می‌باشد.

جریان عبوری از سیم پیچ‌ها در یک دوره تناوب موج جریان فقط یکبار تغییر جهت می دهد، لذا قطب N و S میدان دوار در یک دوره تناوب جابه‌جا می‌شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی، قطب‌ها ۳۶۰ درجه محیط استاتور را اشغال می‌کند. در یک دوره تناوب، میدان دوار کل محیط استاتور را طی می‌کند در حالی که در یک ماشین چهار قطبی که هر دو قطب آن ۱۸۰ درجه محیط استاتور را اشغال می‌کند در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها ۱۸۰ درجه محیط استاتور را طی می‌کند. پس ۲ دوره تناوب طول می کشد تا میدان دوار تمام محیط استاتور را طی نماید. به همین ترتیب افزایش تعداد قطب سبب می‌شود تا زمان بیشتری صرف شود تا میدان دوار بتواند تمام محیط استاتور را بپیماید. بنابراین افزایش تعداد قطب‌های استاتور باعث کند شدن سرعت میدان دوار می‌شود. هر دو قطب N و S تشکیل یک میدان مغناطیسی را می‌دهند و به آنها زوج قطب (P) می گویند (جدول ۱)

جدول ۱ـ محیط اشغال شده توسط قطب

چرخش میدان در محیط استاتور برای یک دوره تناوب	محیط اشغال شده توسط زوج قطب	تعداد زوج قطب $\frac{P}{2}$	تعداد قطب P
طی محیط کامل	$\frac{۳۶۰}{۱} = ۳۶۰$	۱	۲
طی نصف محیط = $\frac{۱}{۲}$	$\frac{۳۶۰}{۲} = ۱۸۰$	۲	۴
طی ثلث محیط = $\frac{۱}{۳}$	$\frac{۳۶۰}{۳} = ۱۲۰$	۳	۶
طی ربع محیط = $\frac{۱}{۴}$	$\frac{۳۶۰}{۴} = ۹۰$	۴	۸
...	...	...	...
عبور از مقابل P در محیط = $\frac{۱}{\frac{P}{۲}}$	$\frac{۷۲۰}{P}$	$\frac{P}{۲}$	P

سرعت میدان دوار ازاین رابطه به‌دست می‌آید.
در این رابطه:

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P}$$

n_s ـ سرعت میدان دوار برحسب RPM
f ـ فرکانس شبکه برق بر حسب Hz
P ـ تعداد قطب‌های میدان دوار می‌باشد.
سرعت میدان دوار با فرکانس جریان برق نسبت مستقیم و با تعداد قطب‌های میدان دوار رابطه عکس دارد.

مثال

سرعت میدان دوار یک ماشین ۲ قطبی در شبکه برق ایران با فرکانس ۵۰ Hz چند RPM است؟

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P} \rightarrow ns = \frac{۱۲۰\times ۵۰}{۲} = ۳۰۰۰RPM$$

تمرین

با توجه به رابطه سرعت سنکرون و براساس تعداد قطب یا سرعت داده شده جدول (۲) را تکمیل کنید.

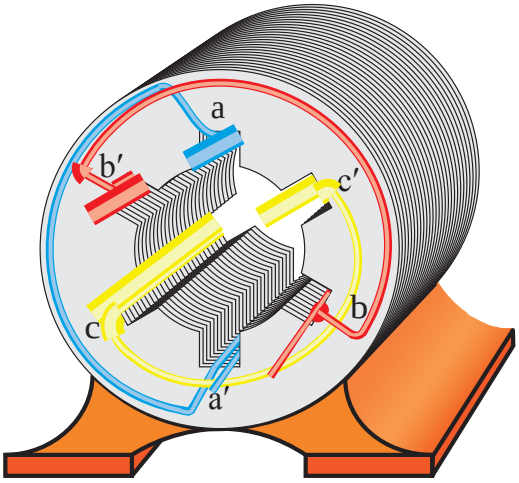
جدول ۲ـ محاسبه سرعت میدان دوار در ماشین القایی

سرعت میدان دوار (RPM)	تعداد زوج قطب $\frac{P}{۲}$	تعداد قطب‌ها P	فرکانس برق شهر Hz
?	۱	۲	۵۰
?	۲	۴	
?	۳	۶	
۷۵۰	?	۸	
۶۰۰	?	۱۰	
۵۰۰	?	۱۲	

۶ـ۳ـ طرز کارموتورهای آسنکرون

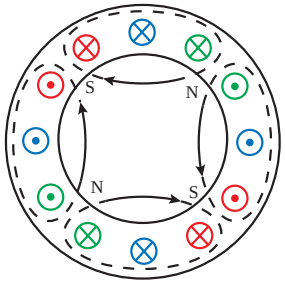
با اتصال جریان متناوب سه فاز به سیم‌پیچی استاتور موتور آسنکرون میدان مغناطیسی دوار درون استاتور تولید می‌شود (شکل ۲۸).

با قرار گرفتن رتورقفسی درون استاتور، میدان دوار هادی‌های رتور را قطع می‌کند وطبق قانون القای فارادی در آنها نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. ($E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$)



شکل ۲۸ـ موتور آسنکرون

به‌دلیل القای نیروی محرکه القایی، درهادی‌های رتور که توسط حلقه‌های انتهایی به یکدیگر وصل شده‌اند جریان جاری می‌شود که این جریان را «**جریان القایی** » گویند. طبق قانون لورنس به هر هادی حامل جریان رتور توسط میدان مغناطیسی دوار نیرو وارد می‌شود. این نیرو حول محور رتورگشتاور تولید می‌کند. این گشتاور باعث گردش رتور حول محورش خواهد شد. ($T = F.r$)



شکل ۲۹ـ تصویر رتور داخل استاتور با نشان دادن نیروی میدان و شعاع رتور

عامل گردش رتور در موتورهای الکتریکی آسنکرون، جریان القایی‌هادی‌های رتور است. از این رو موتورالکتریکی آسنکرون را «**موتورهای القایی** » نیز گویند. در موتورالکتریکی آسنکرون هیچگاه سرعت چرخش رتور به سرعت میدان نمی‌رسد زیرا در این شرایط نیروی محرکه‌ای در هادی‌ها القا نخواهد شد.

پرسش

۱ـ اندازه نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی با ۵۰۰ حلقه و تغییرات فوران ۲۰۰ میلی و در محدوده زمان ۴۰۰ میلی ثانیه چندولت است ؟

الف) ۲۰۰ ب) ۲۵۰ ج) ۴۰۰ د) ۵۵۰

۲ـ درموقعیت ۲۷۰ درجه میدان دوار به‌ترتیب فاز L_3 و فاز L_3 در چه شرایطی از سیکل جریان متناوب قرار دارد؟

الف) منفی، مثبت ب) مثبت، منفی ج) مثبت، مثبت د) منفی، منفی

۳ـ درنیم سیکل منفی جریان از ..... سیم پیچ وارد شده و جهت جریان در سر سیم پیچ به‌صورت ..... درنظرگرفته می‌شود.

الف) انتها، ⊙ ب) انتها، ⊗ ج) سر، ⊙ د) سر، ⊗

۴ـ وضعیت میدان مغناطیسی در موقعیت‌های 120° و 135° و 300° را رسم کنید.

۵ـ چگونه می‌توان جهت گردش موتورهای الکتریکی را عوض کرد؟ با رسم شکل در یک موقعیت آن را توضیح دهید.

۶ـ چگونگی چرخش رتور موتورهای القایی را شرح دهید.

۷ـ جنس میله‌های رتور موتورهای القایی از چه ماده‌ای است و چرا مورب ساخته می‌شوند؟

۸ـ با سه برابر شدن فرکانس و نصف شدن تعداد قطب یک موتور سه فاز القایی سرعت آن $\frac{1}{6}$ می‌شود.

☐ صحیح ☐ غلط

۹ـ درماشین‌های رتور قفسی‌هادی‌های رتور نسبت به هسته عایق هستند.

☐ صحیح ☐ غلط

۱۰ـ برای تغییر جهت گردش موتور باید جای دو فاز فرد را با فازهای زوج عوض کرد.

☐ صحیح ☐ غلط

۷ـ۳ـ لغزش در موتورهای القایی

با اتصال سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور موتور القایی به جریان متناوب سه فاز میدان دوار با سرعت سنکرون می‌گردد. اما رتور نمی‌تواند با سرعت میدان دوار بچرخد و همیشه با آن اختلاف سرعت دارد.

اختلاف سرعت میدان دوار (n_S) با سرعت رتور (n_r) را «**سرعت لغزش** Δn » می‌گویند.

$$\Delta n = n_S - n_r$$

در یک ماشین القایی نسبت سرعت لغزش به سرعت میدان دوار را «لغزش » می‌گویند و آن را با S نمایش می دهند.

$$S = \frac{\Delta n}{n_s}$$

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

مقدار لغزش را به‌صورت درصد نشان می‌دهند.

$$\%S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times ۱۰۰$$

در موتورهای القایی شرط ایجاد گشتاور جاری شدن جریان درهادی‌های رتور است و شرط جاری شدن جریان، وجود نیروی محرکه القایی در دو سرهادی‌های رتور می‌باشد. ازطرفی شرط القا نیروی محرکه نیز وجود اختلاف سرعت بین میدان دوار و سرعت رتور است. لذا اختلاف سرعت درموتورهای القایی رتور قفسی از اهمیت بسزایی برخوردار است.به‌طور کلی در موتورهای القایی هرگاه سرعت چرخش میدان دوار با سرعت چرخش رتور اختلاف داشته باشد آن گروه از موتورها را «**آسنکرون**» یا غیرهم‌زمان می‌گویند و به موتورهای القایی جریان متناوب که سرعت چرخش میدان دوار با سرعت چرخش رتور در آنها یکی باشد آن گروه از موتورها را «**سنکرون**» یا هم‌زمان گویند.

مثال

رتور یک موتور القایی چهار قطب در فرکانس ۵۰ HZ با سرعت ۱۴۵۰ RPM می‌چرخد مطلوب است:
سرعت لغزش و لغزش این موتور القایی را به‌دست آورید.

$$n_s = \frac{f \times ۱۲۰}{P} = \frac{۵۰ \times ۱۲۰}{۴} = ۱۵۰۰ RPM$$

$$\Delta n = n_s - n_r = ۱۵۰۰ - ۱۴۵۰ = ۵۰ RPM$$

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{۵۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۳$$

و یا

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۵۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۳$$

با توجه به رابطه لغزش S برای محاسبه سرعت رتور رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \rightarrow s \times n_s = n_s - n_r \rightarrow n_r = n_s - S \times n_s \rightarrow \boxed{n_r = n_s(۱ - S)}$$

مثال

موتوری ۴ قطب با لغزش ۲۰ درصد مفروض است اگر فرکانس کار موتور ۵۰ هرتز باشد سرعت چرخش رتور چند دور بر دقیقه است؟

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P} \longrightarrow n_s = \frac{۱۲۰\times ۵۰}{۲} = ۱۵۰۰RPM$$

$$n_r = n_s(۱-S) = ۱۵۰۰(۱-۰/۲) = ۱۴۷۰RPM$$

مثال

بر روی پلاک موتور سه فازی سرعت چرخش و فرکانس به ترتیب ۸۵۰ RPM و ۵۰ Hz ذکر شده است سیم‌پیچی این موتور چند قطب است ؟

$n_r = ۸۵۰\ RPM \rightarrow n_s = ۱۰۰۰\ RPM$

$$n_s = \frac{۱۲۰\times f}{P} \rightarrow P = \frac{۱۲۰\times f}{n_s} \rightarrow P = \frac{۱۲۰\times ۵۰}{۱۰۰۰} = ۶$$

۸ـ۳ـ رفتار ماشین القایی

رفتار ماشین القایی در حالت‌های راه‌اندازی، بی‌باری، بارداری و ترمزی با توجه به سرعت رتور و مقدار لغزش تعیین می‌شود.

الف) راه‌اندازی: در حالت راه‌اندازی موتور القایی، سرعت رتور صفر است ولی میدان دوار با سرعت سنکرون می‌چرخد. بنابراین خواهیم داشت:

در زمان راه‌اندازی لغزش موتور S=۱ یا S=۱۰۰٪ است.

$$n_r = ۰ \Rightarrow S = \frac{n_s - ۰}{n_s} = ۱ \text{ یا } ۱۰۰٪$$

ب) بی‌باری: اگر رتور با سرعت سنکرون یا همان سرعت میدان دوار گردش کند لغزش موتور صفر می شود. در حالت بی‌باری موتورهای القایی سرعت رتور تقریبا نزدیک به سرعت میدان دوار است به‌همین دلیل سرعت رتور را برابر درنظر می‌گیرند.

درشرایط بی باری لغزش موتور S=۰ یا S = ۰٪ است.

$$n_r = n_s \Rightarrow S = \frac{n_s - n_s}{n_s} = ۰ \text{ یا } ۰٪$$

ج) بارداری: رتور موتور القایی پس از راه‌اندازی دور می‌گیرد و سرعت آن پی‌درپی افزایش می‌یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور و میدان دوار کمتر می‌شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است ادامه دارد.
با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یاتاقان‌ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی‌رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می‌شود. برهمین اساس لغزش این حالت دارای مقداری بین صفر و یک است.

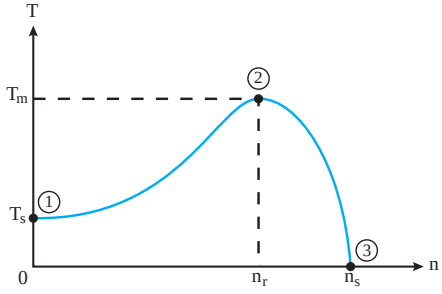
$$n_r < n_s \Rightarrow S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s} \Rightarrow 0 < \Delta n < 1 \Rightarrow 0 < S < 1$$

لغزش ماشین القایی در حین کار کمتر از لغزش زمان راه‌اندازی و بیش از لغزش در حالت بی‌باری (سرعت سنکرون) است. به این حالت کاری ماشین «موتوری » نیز گفته می‌شود.
د) ترمزی: در صورتی که بتوانیم با وارد کردن نیرویی، رتور درخلاف جهت چرخش میدان دوار حرکت کند در اینصورت توانسته‌ایم از ادامه حرکت رتور در شرایط قبلی جلوگیری کنیم. به این حالت کاری ماشین «ترمزی » گفته می‌شود و مقدار لغزش آن چنین به‌دست می‌آید.

$$n_r < 0 \Rightarrow S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} \Rightarrow \Delta n > 1 \Rightarrow S > 1$$

۹ـ۳ـ مشخصه گشتاور ـ دور موتور القایی

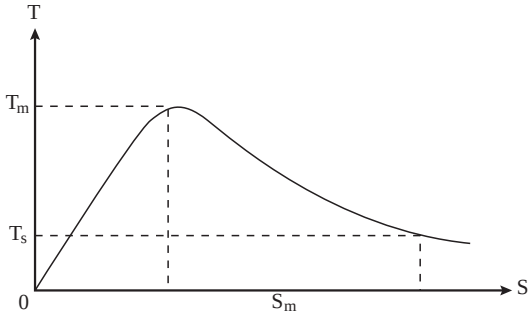
مشخصه گشتاور ـ دور موتورهای القایی را در شکل ۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۰ـ مشخصه گشتاور ـ دور موتورالقایی

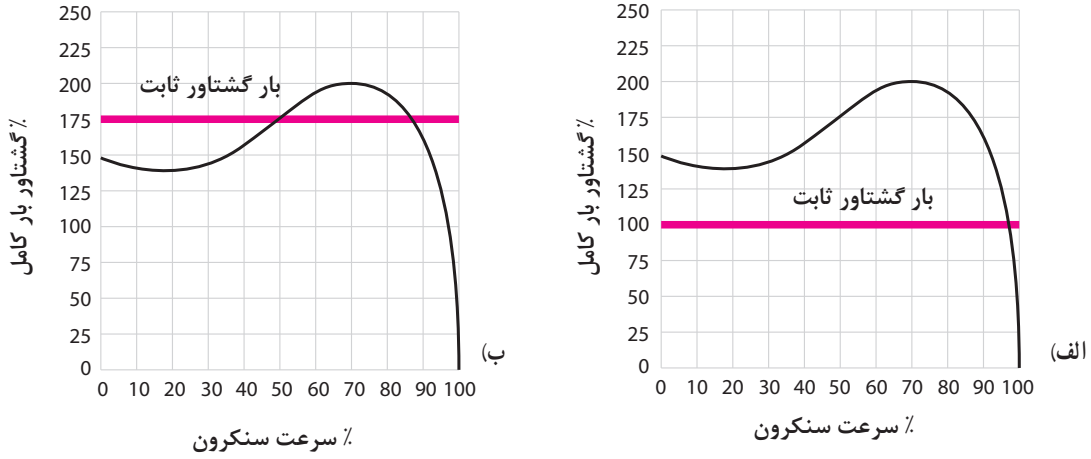
در مشخصه گشتاور ـ دور نقاط مهمی وجود دارد که به‌ترتیب عبارت‌اند از:
نقطه (۱) لحظه راه‌اندازی موتور است و سرعت رتور برابر صفر و گشتاور موتور دارای مقدار T_s است. مقدارگشتاور موتور در لحظه شروع به کار را «**گشتاور راه‌اندازی** » گویند و با T_s نشان می‌دهند. مقدار گشتاور راه‌اندازی را با T_s نشان می‌دهد که موتور چه مقدار گشتاور بار را می‌تواند به راه بیاندازد.
با افزایش سرعت رتور، گشتاور موتور افزایش می یابد تا در نقطه ۲ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بیشترین مقدار گشتاور تولیدی موتور را که به ازای سرعت n_{rm} تولید می شود گشتاور «ماکزیمم » گویند و با «T_m »

نشان می‌دهند. با افزایش سرعت رتور به بیش از n_{rm}، گشتاور تولیدی موتور کاهش می یابد و با رسیدن سرعت رتور به سرعت سنکرون گشتاور تولیدی موتور صفر خواهد شد. چون لغزش در موتورهای القایی با سرعت ارتباط دارد و رفتار ماشین براساس تغییرات لغزش بیان می‌شود به همین دلیل مشخصه گشتاور ـ لغزش نیز ارائه شده است (شکل ۳۱) تصویر مشخصه گشتاور ـ لغزش موتورهای القایی را نشان می‌دهد.



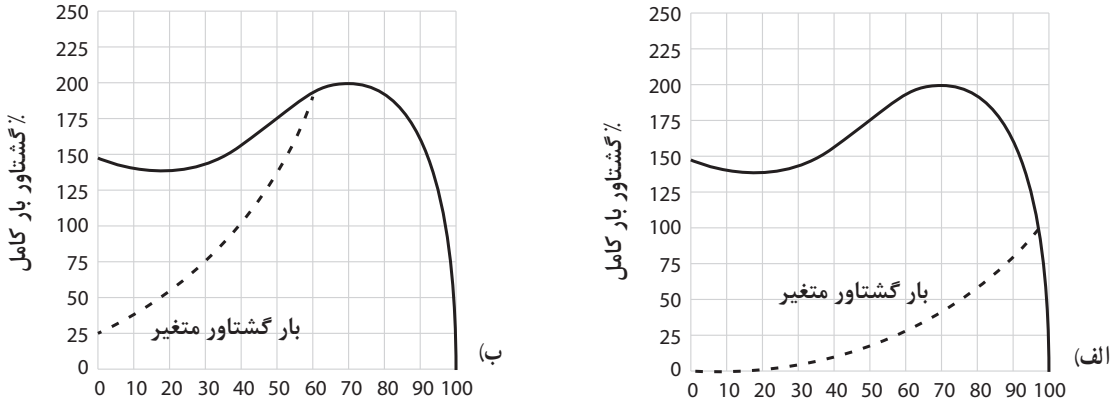
شکل ۳۱ـ مشخصه گشتاور ـ لغزش موتورهای القایی

هر بارمکانیکی که روی محور موتور قرار می‌گیرد مشخصه گشتاور ـ دور خاص خود را دارد که به آن «**مشخصه بار** » گویند. مشخصه گشتاور بار نشان دهنده چگونگی تغییرات بار نسبت به تغییرات سرعت موتور است. برخی بارها دارای مشخصه گشتاور بار ثابت هستند یعنی به‌ازای تغییرات سرعت موتور گشتاور آنها تغییر نمی‌کند. شکل‌های (۳۲ـ الف) و (۳۲ ـ ب) دو نمونه مشخصه گشتاور بار ثابت را نشان می‌دهند.



شکل ۳۲ـ دو نمونه مشخصه گشتاور ـ بار ثابت

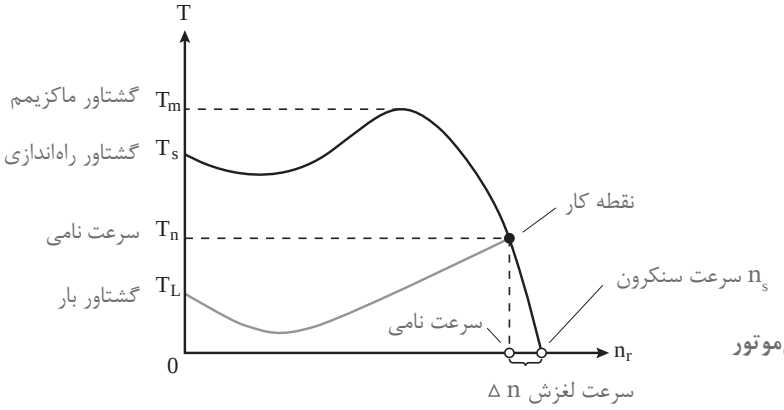
اما بارهای دیگری وجود دارند که دارای مشخصه گشتاور بار ثابت نبوده و به‌ازای تغییرات سرعت موتور مقدار گشتاور آنها تغییر می‌کند. در شکل (۳۳ـ الف) و (۳۳ـ ب) چند نمونه مشخصه گشتاور بار را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۳ـ دونمونه مشخصه گشتاور ـ بار متغیر

هر موتور القایی دارای مقدار مشخصی گشتاور راه‌اندازی (T_s) است که به طراحی رتور آن بستگی دارد. برای به گردش درآوردن بار مکانیکی، گشتاور راه‌اندازی موتور القایی باید بیش از گشتاور راه اندازی بار مکانیکی باشد (شرط راه‌اندازی موتورها $T_S > T_L$)

هرگاه مقدارگشتاور موتور (گشتاور محرک) با مقدار گشتاور بار (گشتاور مقاوم) در سرعت بیش از n_{rm} برابر شود در این صورت سرعت موتور تثبیت می‌شود و موتورالقایی، بار موردنظر را با سرعتی ثابت به‌حرکت در می‌آورد. برای تعیین این سرعت باید مشخصه گشتاور ـ دور موتور ومشخصه گشتاور بار را روی یک صفحه دکارتی رسم کرد. سپس محل تلاقی این دو منحنی را مشخص نمود. نقطه‌ای که مشخصه گشتاور ـ دور موتور القایی با مشخصه گشتاور ـ دور بار مکانیکی تلاقی می نماید، را «**نقطه کار موتور** » می‌گویند. از نقطه کار می‌توان سرعت و گشتاور موتور در حالت پایدار را به‌دست آورد. گشتاور موتور در نقطه کار را «**گشتاور نامی موتور** » گویند و با T_n نشان می‌دهند. در (شکل ۳۴) نحوه به‌دست آوردن نقطه کار موتور نشان داده شده است.



شکل ۳۴ـ نحوه تعیین نقطه کار نامی‌موتور القایی سه فاز

سازندگان موتورهای الکتریکی مقادیر گشتاور راه‌اندازی T_s، ماکزیمم T_m و نامی T_n و نسبت‌های آنها را در برگه مشخصات فنی موتور القایی ارائه می کنند.

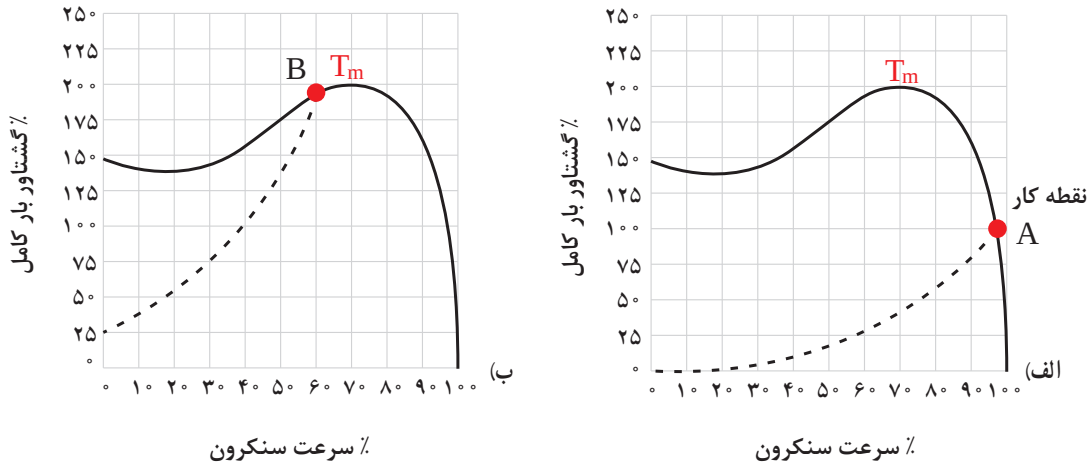
نکته ۱

در فاصله نقطه T_s تا T_m مشخصه گشتاور ـ دور، افزایش گشتاور و سرعت در موتور با هم رخ می‌دهد. در این فاصله امکان تثبیت سرعت موتور وجود ندارد به همین دلیل هیچ‌گاه نقطه کار موتور را نباید در محدوده **Ts** تا **Tm** انتخاب کرد.

نکته ۲

بعد از T_m مشخصه گشتاور دور، افزایش سرعت رتور باعث کاهش گشتاور می‌شود. در این ناحیه امکان تثبیت سرعت موتور وجود دارد و نقطه کار در این ناحیه می‌باشد.

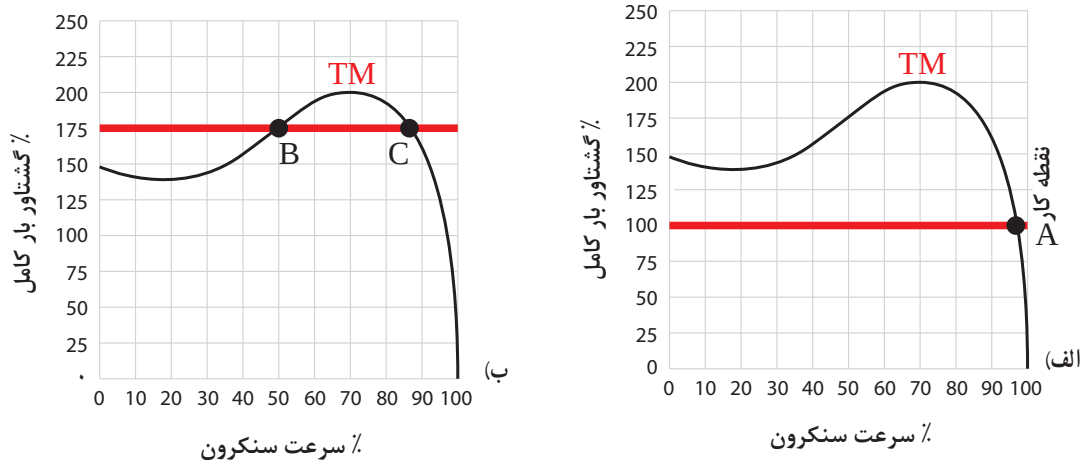
دو مشخصه بار در (شکل ۳۵) نشان داده شده است.
در شکل‌های (الف) و (ب) گشتاور بار از گشتاور راه‌اندازی موتور کمتر است. اما نقطه کار (A) در ناحیه‌ای از منحنی قرار گرفته که از نقطه (T_m) عبور کرده است و این نقطه را به‌عنوان نقطه کار می‌توان انتخاب کرد. اما نقطه کار (B) در ناحیه T_s تا T_m منحنی قرار گرفته در نتیجه این نقطه نمی‌تواند نقطه کار موتور باشد چرا که موتور گشتاور لازم برای ثابت نگهداشتن سرعت موتور را ندارد و در واقع موتور زیر بار می‌ماند و به سرعت پایدار نمی‌رسد.



شکل ۳۵ـ تعیین نقطه کار روی دو نمونه مشخصه گشتاور ـ سرعت بار متغیر

نقطه کار بارها با سرعت ثابت که در (شکل ۳۶) نشان داده شده است.در شکل (الف) یک نقطه A بین مشخصه گشتاور ـ دور موتور و مشخصه گشتاور بار ولی در شکل (ب) دو نقطه تلاقی B و C وجود دارد که می‌توان به‌عنوان نقطه کار انتخاب کرد.

با کمی‌دقت در شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت چون درمشخصه شکل (ب) مقدار گشتاور راه‌اندازی موتور از گشتاور بار کمتر است پس موتور راه‌اندازی نمی‌شود. اما در شکل (الف) چون مقدار گشتاور راه‌اندازی بیشتر از گشتاور بار است و نقطه کار پس از نقطه گشتاور ماکزیمم است و امکان تثبیت سرعت وجود دارد و بعد از راه‌اندازی موتور پایدار می‌شود.



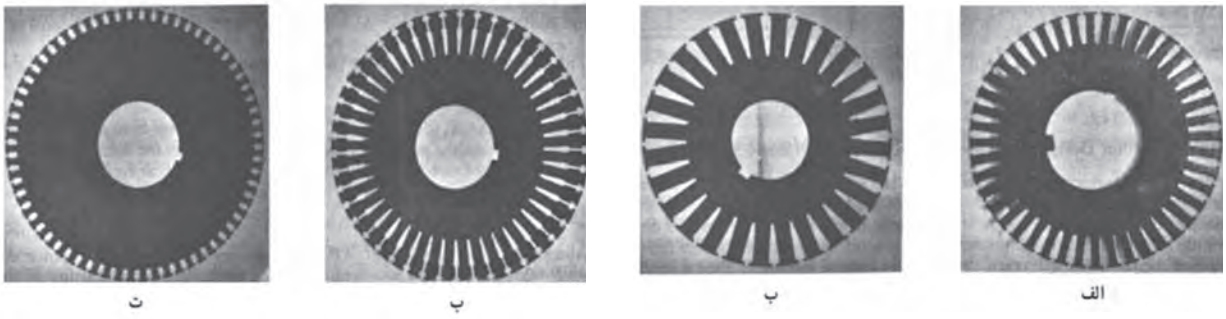
شکل ۳۶ـ تعیین نقطه کار روی دو نمونه مشخصه گشتاور ـ سرعت بار ثابت

۱۰ـ۳ـ رتورقفسی موتورهای القایی

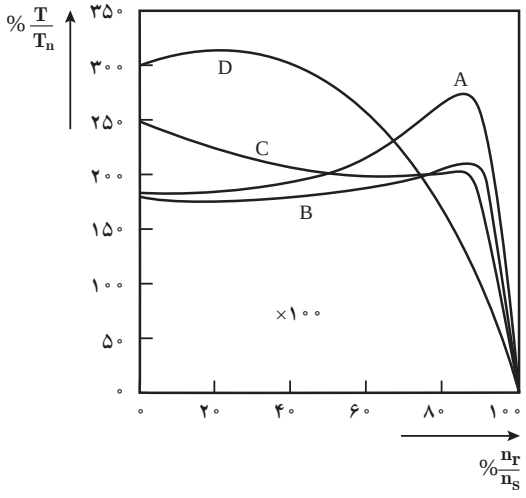
رتور موتورهای القایی رتورقفسی در ۴ نوع (۴ کلاس) A، B، C و D ساخته می‌شوند و تصویر شیارهای آنها در شکل ۳۷ نشان داده شده است.

تفاوت شکل شیار هسته رتور موتورهای القایی باعث می‌شود تا این رتورها از نظر عملکرد و تولید گشتاورهای راه‌اندازی T_s و گشتاور ماکزیمم T_m با یکدیگر تفاوت‌هایی داشته باشند. در شکل (۳۸) مشخصه گشتاور ـ دور هر یک از رتورها نشان داده شده است.

در اینجا و به‌اختصار وجوه تفاوت این چهار نوع رتورآمده تا با مقایسه بتوان به‌دلایل اختلاف مشخصه آنها پی برد.



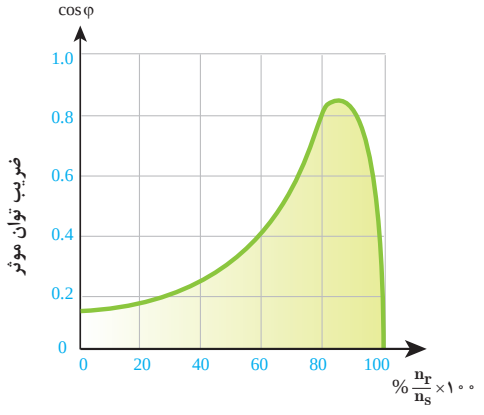
شکل ۳۷ـ شکل نمونه ورق‌های مغناطیسی رتور موتورهای قفس سنجابی



شکل ۳۸ـ مشخصه گشتاورـ دور چهارنمونه مشابه رتورقفسی استاندارد

۱۱ـ۳ـ ضریب توان مؤثر

ضریب توان مؤثر موتور القایی تابع سرعت رتور است. در زمان راه‌اندازی ضریب توان مؤثر موتور بسیار کم است ولی با افزایش سرعت، مقدار آن افزایش می‌یابد و پس از عبور از سرعت n_{rm} موتور مقدار آن رو به کاهش می‌گذارد و در سرعت سنکرون صفر می‌شود. (شکل۳۹)



شکل ۳۹ـ مشخصه ضریب قدرت ـ سرعت رتور موتور القایی

هر چند سرعت رتور در موتورهای القایی هیچ‌گاه به سرعت سنکرون نمی‌رسد ولی این موضوع بیانگر این است که موتور القایی در بی‌باری (سرعت نزدیک به سرعت سنکرون) ضریب توان مؤثر کوچکی خواهد داشت. در انتخاب موتور القایی نباید توان موتور را خیلی بالاتر از توان بار در نظر گرفت. زیرا باعث هرزگردی (بی‌باری) وکاهش ضریب توان مؤثر می‌شود و با دریافت توان غیرمفید (راکتیو) بیشتر موتور از شبکه برق می شود.

پرسش

۱ـ سرعت چرخش رتور موتور ۶ قطب با لغزش ۳۰ درصد در فرکانس ۵۰ هرتز، چند RPM است؟
الف) ۵۰۰ ب) ۹۷۰ ج) ۱۰۰۰ د) ۱۳۰۰
۲ـ در شرایط راه‌اندازی لغزش موتور کدام است؟
الف) $s = 1$ ب) $s = 0$ ج) $0 < s < 1$ د) $s > 1$
۳ـ در کدام‌یک ازحالات زیر مقدار لغزش بزرگ‌تر از واحد است؟
الف) بی‌باری ب) موتوری ج) ترمزی د) راه‌اندازی
۴ـ لغزش را با ذکررابطه تعریف کنید.
۵ـ موتورهای آسنکرون و سنکرون را تعریف کنید.
۶ـ در مورد نحوه به‌دست آوردن نقطه کار از روی مشخصه گشتاور ـ دور توضیح دهید.
۷ـ مفاهیم T_s , T_m , T را تعریف کنید.
۸ـ موتورهای رتورقفسی نوع C دارای بیشترین گشتاور راه‌اندازی هستند.
☐ صحیح ☐ غلط
۹ـ با افزایش سرعت رتورمقدارضریب توان مؤثر موتور به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.
☐ صحیح ☐ غلط
۱۰ـ روی مشخصه گشتاورـ دور موتورالقایی نقطه کارموتور را بین T_s و T_m باید انتخاب کرد.
☐ صحیح ☐ غلط

۱۲ـ۳ـ راه‌اندازی موتورهای القایی

با اتصال موتورهای القایی به شبکه الکتریکی، رتور شروع به گردش می‌کند.
فرایند اتصال موتور القایی به شبکه الکتریکی به‌منظور به گردش درآوردن بار مکانیکی در سرعت نامی را «راه‌اندازی[1] » گویند.
در راه‌اندازی موتورهای القایی، سرعت رتور از صفر به سرعت نامی می‌رسد. مدت زمانی که طول می‌کشد که سرعت رتور از صفر به سرعت نامی برسد را «زمان راه‌اندازی[2] » گویند و آن را با ACC Time نشان می‌دهند.

۱ـ Start
۲ـ Acceleration Time

در زمان راه‌اندازی موتور القایی جریانی بیش از جریان نامی از شبکه دریافت می‌کند. جریانی که موتور در زمان راه‌اندازی از شبکه دریافت می‌کند را «جریان راه‌اندازی » گویند و آن را با Is نشان می‌دهند. جریان راه‌اندازی متناسب با توان موتور می‌باشد. هر چه توان موتور بیشتر باشد مقدار جریان راه‌اندازی بیشتر خواهد شد.

جریان راه‌اندازی زیاد مشکلات جدی را برای موتور القایی ایجاد می‌کند از جمله :

- آسیب رساندن به سیم پیچ‌های موتوری
- آسیب رساندن به یاتاقان‌های موتور
- عمل کرد تجهیزات حفاظتی و قطع مدار الکتریکی و عدم راه‌اندازی موتور
- آسیب رسیدن به کابل و کلید موتور
- ایجاد افت ولتاژ شدید در منبع تغذیه

برای راه‌اندازی موتورهای القایی روش‌های متداول زیر استفاده می‌شود :

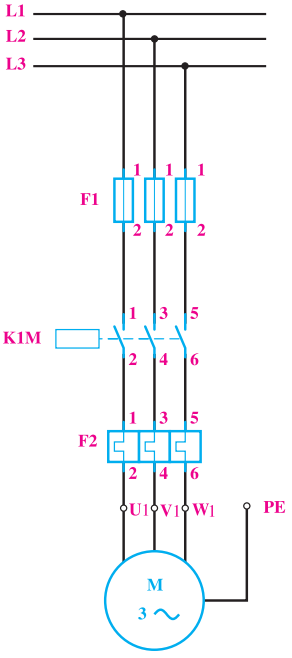
۱ـ راه‌اندازی مستقیم

۲ـ راه‌اندازی با کنترل ولتاژ

۳ـ راه‌اندازی با کنترل هم‌زمان ولتاژ و فرکانس

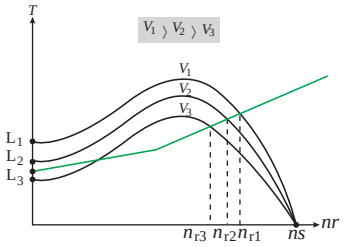
۱ـ راه‌اندازی مستقیم :در راه‌اندازی مستقیم، موتور الکتریکی القایی با استفاده از کلید قطع و وصل به شبکه الکتریکی با ولتاژ نامی اتصال می‌یابد. در این روش با وصل کلید موتور راه‌اندازی می‌شود اما جریان راه‌اندازی آن محدود نمی‌شود. روش راه‌اندازی مستقیم برای موتورهایی با توان نامی کمتر از یک کیلووات استفاده می‌شود.

در راه‌اندازی مستقیم موتورهای الکتریکی با توان بیش از یک کیلووات برای محدود کردن جریان راه‌اندازی، گشتاور بار توسط کلاچ مکانیکی به‌تدریج به رتور اعمال می‌شود. یک نمونه از مدارهای راه‌اندازی مستقیم در شکل ۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۴۰- راه اندازی مستقیم موتور القایی با کنتاکتور

۲ـ راه‌اندازی با کنترل ولتاژ : مقدار جریان راه‌اندازی به توان الکتریکی موتور القایی بستگی دارد. برای کاهش جریان راه‌اندازی لازم است ولتاژ کلاف‌های سیم‌پیچی موتور را کاهش داد تا توان الکتریکی موتور کاهش یابد. گشتاور موتور القایی متناسب با مجذور ولتاژ موتور است. از این رو کاهش ولتاژ در زمان راه‌اندازی ضمن کاهش جریان راه‌اندازی باعث کاهش گشتاور راه‌اندازی موتور نیز خواهد شد. شکل (۴۱)



شکل ۴۱

فعالیت

با توجه به (شکل ۴۱) به ازای کدام ولتاژ، موتور راه‌اندازی نمی‌شود؟ چرا ؟

کاهش گشتاور و راه‌اندازی از معایب روش راه‌اندازی با کنترل ولتاژ است. لذا این روش برای راه‌اندازی موتورهایی که بدون بار راه‌اندازی می‌شوند به‌کار می‌رود.

کنترل ولتاژ موتورهای القایی در زمان راه‌اندازی با روش‌های زیر انجام می‌شود :

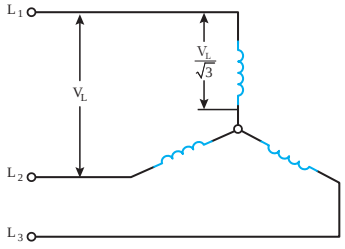
الف) راه‌اندازی ستاره مثلث

ب) راه‌اندازی ترانسفورماتوری

پ) راه‌اندازی نرم

الف) راه‌اندازی ستاره مثلث

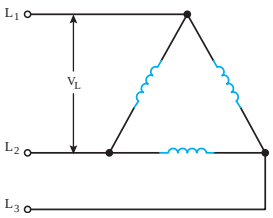
در راه‌اندازی ستاره مثلث با کاهش ولتاژ کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور، جریان و گشتاور راه‌اندازی موتور کاهش می‌یابد. در راه‌اندازی ستاره مثلث مدار الکتریکی کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور در زمان راه‌اندازی به اتصال ستاره در می‌آید. در حالت ستاره ولتاژ کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ برابر است. (شکل ۴۲)



شکل ۴۲ـ مدار حالت راه‌اندازی ستاره

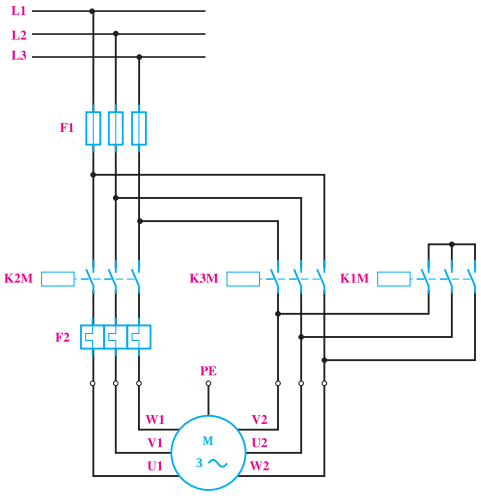
با کاهش ولتاژ کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور به $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$، گشتاور جریان راه‌اندازی حالت ستاره به $\frac{1}{3}$ گشتاور و جریان راه‌اندازی موتور در حالت مثلث می‌رسد. پس از راه‌اندازی موتور و رسیدن سرعت به ٪ ۷۵ سرعت

سنکرون، مدار الکتریکی کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور به حالت اتصال مثلث در می‌آید. در اتصال مثلث ولتاژ کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور به V_L می‌رسد. (شکل ۴۳)



شکل ۴۳ـ حالت مثلث

راه‌اندازی ستاره مثلث برای موتورهای القایی که بدون بار راه‌اندازی می‌شوند به‌کار می‌رود.
مدار الکتریکی راه‌اندازی ستاره مثلث شامل سه کنتاکتور می‌باشد. (شکل ۴۴)

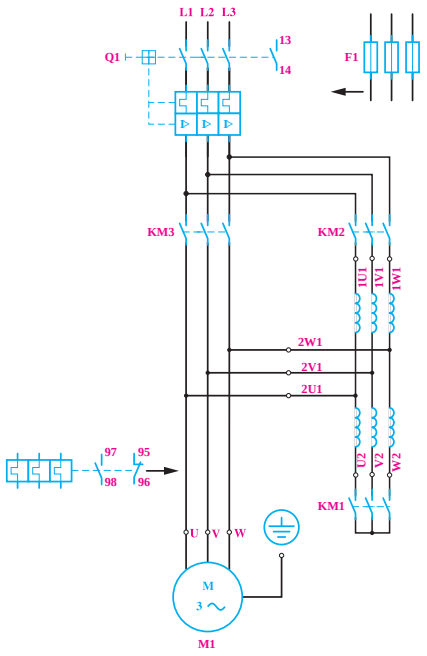


شکل ۴۴ـ مدار کنتاکتوری ستاره مثلث

برای تغییر حالت اتصال به اتصال مثلث حتماً از تایمر استفاده می‌شود. از معایب روش راه‌اندازی ستاره مثلث علاوه بر کاهش گشتاور راه‌اندازی استفاده از سه کنتاکتور است.

ب) راه‌اندازی ترانسفورماتوری

در راه‌اندازی ترانسفورماتوری ولتاژ مؤثر موتور الکتریکی القایی را با استفاده از اتوترانسفورماتور متغیر در زمان راه‌اندازی به تدریج افزایش می‌دهند تا به مقدار نامی برسد سپس اتوترانسفورماتور از مدار خارج شده و موتور به‌طور مستقیم به شبکه الکتریکی وصل خواهد شد.
ولتاژ زمان راه‌اندازی در روش ترانسفورماتوری طوری انتخاب می‌شود که ضمن کاهش جریان راه‌اندازی، گشتاور راه‌اندازی موتور بیشتر از گشتاور بار باشد.
مدار راه‌اندازی موتور القایی با اتوترانسفورماتور در (شکل ۴۵) نشان داده شده است.



شکل ۴۵ـ مدار راه‌اندازی ترانسفورماتوری

در مدار الکتریکی (شکل ۴۵) در زمان راه‌اندازی کنتاکتورهای KM۱ و KM۲ وصل و KM۳ قطع می‌باشد تا ولتاژ موتور از طریق اتوترانسفورماتور تأمین شود. پس از راه‌اندازی کنتاکتور KM۳ وصل و کنتاکتورهای KM۱ و KM۲ قطع می‌شوند تا موتور مستقیماً به شبکه الکتریکی متصل شود.

پ ـ راه‌اندازی نرم

در راه‌اندازی نرم ولتاژ موثر مؤتور الکتریکی القایی با استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت در زمان راه‌اندازی به تدریج افزایش می‌یابد تا به مقدار نامی برسد. وسیله الکترونیکی که با تغییر ولتاژ، جریان راه‌اندازی موتورهای القایی را کنترل می‌کند «راه‌انداز نرم » و یا «Soft starter» گویند.

Soft starterپس با تغییر ولتاژ، جریان راه‌اندازی و گشتاور موتور الکتریکی القایی را کنترل می‌کند از این رو آن را[۱] RVSS نیز می‌نامند.

RVSS می‌تواند مقدار مؤثر ولتاژ را از حوالی صفر تا مقدار نامی افزایش دهد و جریان راه‌اندازی را کنترل نماید (شکل ۴۶)

شکل ۴۶

Soft starter با استفاده از قطعات الکترونیک قدرت نظیر تریستور SCR ساخته می‌شود. نقش Soft starter از راه‌اندازی نظارت بر ولتاژ و جریان موتور الکتریکی القایی می‌باشد.

۳ـ راه‌اندازی با کنترل هم‌زمان ولتاژ و فرکانس

در راه‌اندازی با کنترل هم‌زمان ولتاژ و فرکانس برای کنترل جریان راه‌اندازی، ولتاژ و فرکانس موتور الکتریکی القایی به تدریج افزایش می‌یابد به‌طوری که نسبت ولتاژ به فرکانس ثابت بماند.

وسیله الکترونیکی که با تغییر هم‌زمان ولتاژ و فرکانس نسبت ولتاژ به فرکانس را ثابت نگه می‌دارد «Inverter » گویند.

Inverter با تغییر ولتاژ و فرکانس، جریان راه‌اندازی و گشتاور موتور الکتریکی القایی را کنترل می‌کند از این رو آن را VVVF[۲] نیز می‌نامند.

۱ـ Reduce Voltage Soft Starter

۲ـ Variable Voltage Variable Frequency

VVVF می‌تواند به‌طور هم‌زمان ولتاژ و فرکانس را از حوالی صفر تا مقدار نامی افزایش دهد و جریان راه‌اندازی را کنترل نماید. (شکل ۴۷)

شکل ۴۷

چگالی میدان دوار مغناطیسی موتورهای الکتریکی القایی تابع ولتاژ و فرکانس است. چگالی میدان دوار با ولتاژ نسبت مستقیم و با فرکانس نسبت عکس دارد. $B \propto \frac{V}{F}$ با کنترل هم‌زمان ولتاژ و فرکانس توسط اینورتر در زمان راه‌اندازی، نسبت $\frac{V}{F}$ تغییر نمی‌کند و چگالی میدان دوار B ثابت خواهد ماند در نتیجه جریان کنترل خواهد شد. با کنترل جریان موتور، گشتاور نیز کنترل می‌شود.

۱۳ـ۳ـ کنترل سرعت موتورهای القایی

کنترل سرعت موتورهای القایی از نیازهای مهم صنایع می‌باشد. در صنایعی نظیر قطارهای مترو، خودروهای برقی، آسانسور و... کنترل سرعت مورد نیاز می‌باشد. سرعت رتور موتورهای القایی تابع سرعت میدان دوار و ولتاژ است.

روش‌های کنترل سرعت عبارت‌اند از :

ـ تغییر هم‌زمان ولتاژ و فرکانس

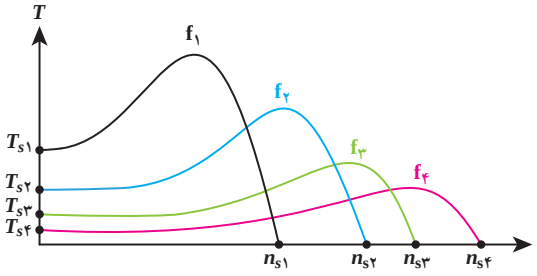
ـ تغییر قطب

۱ـ کنترل سرعت به روش تغییر هم‌زمان ولتاژ و فرکانس :

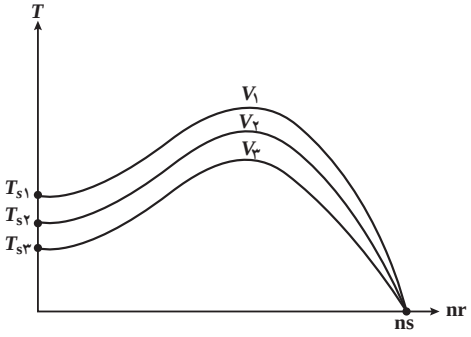
سرعت رتور موتورهای القایی تابع سرعت میدان دوار است. سرعت میدان دوار با توجه به رابطه $n_s = \frac{۱۲۰f}{P}$ با فرکانس نسبت مستقیم دارد. با تغییر فرکانس سرعت میدان دوار تغییر می‌کند علاوه بر این با توجه به رابطه $B \propto \frac{v}{f}$ چگالی میدان دوار نیز دچار تغییر می‌شود. تغییر چگالی میدان دوار بر روی گشتاور موتور تأثیر نامطلوب خواهد داشت. (شکل ۴۸)

تغییر فرکانس به منظور کنترل سرعت در موتورهای القایی به دلیل تأثیر نامطلوب بر چگالی میدان دوار و گشتاور موتور کاربرد ندارد.

سرعت رتور موتورهای القایی به ولتاژ وابسته است. با تغییر ولتاژ با توجه به رابطه $B \propto \frac{v}{f}$ چگالی میدان دوار تغییر می‌کند و علاوه برآن گشتاور موتور نیز دچار تغییر می‌شود. با تغییر گشتاور نقطه کار موتور جابه‌جا می‌شود و سرعت تغییر می‌یابد. (شکل ۴۹)



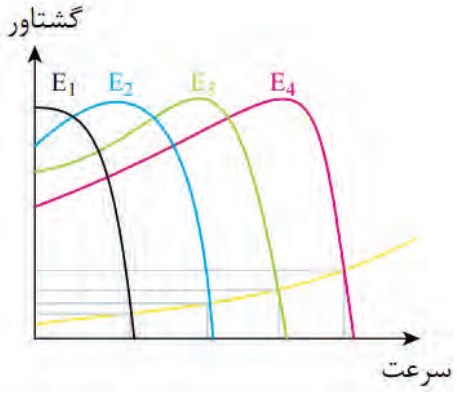
شکل ۴۸



شکل ۴۹

تغییر ولتاژ به‌منظور کنترل سرعت در موتورهای القایی به دلیل تأثیر نامطلوب برچگالی میدان دوار و گشتاور کاربرد ندارد.

تغییر ولتاژ و تغییر فرکانس به‌منظور کنترل سرعت موتورهای القایی به دلیل تأثیر بر گشتاور موتور نامطلوب می‌باشد اما می‌توان با تغییر همزمان ولتاژ و فرکانس، نسبت ولتاژ به فرکانس $\frac{V}{f}$ را ثابت نگه داشت در این صورت ضمن ثابت ماندن چگالی میدان دوار، سرعت میدان دوار ناشی از تغییر فرکانس کنترل خواهد شد (شکل ۵۰).



شکل ۵۰

۲ـ کنترل سرعت به روش تغییر قطب:

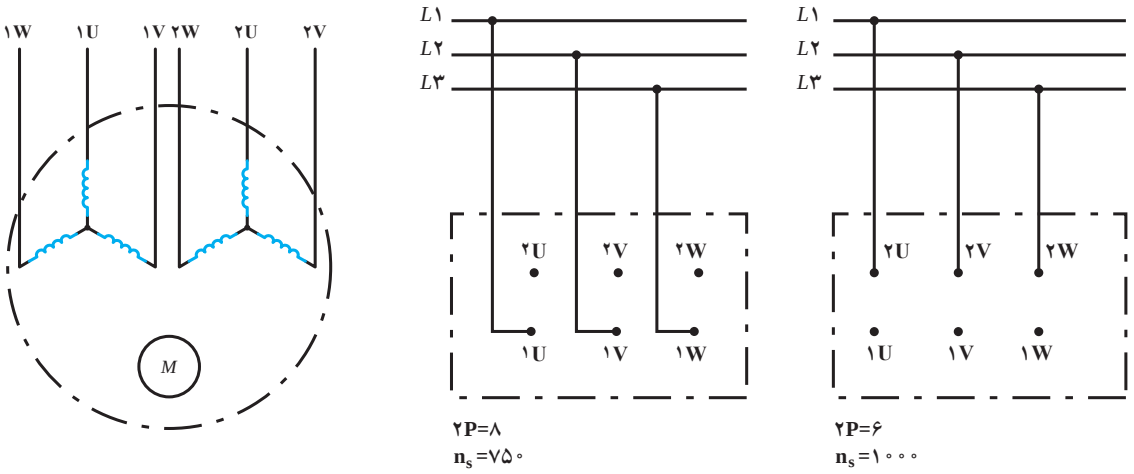
یکی دیگر از راه‌های تغییر سرعت موتور، تغییر تعداد قطب‌های سیم‌پیچی موتور القایی است. با توجه به رابطه $n_s = \frac{۱۲۰f}{P}$ در صورت افزایش تعداد قطب P سرعت موتور کاهش می‌یابد. برای تغییر تعداد قطب موتور القایی از دو روش استفاده می‌شود:

الف) سیم‌پیچی جداگانه (مجزا)

ب) سیم‌پیچی دالاندر

الف) سیم‌پیچی جداگانه: اگر در استاتور به جای یک گروه سیم‌پیچی از دو یا چند گروه سیم‌پیچی مستقل از هم با تعداد قطب‌های مختلف استفاده شود، به‌طوری که هیچ ارتباطی الکتریکی بین آنها نباشد سیم‌پیچی این موتور القایی را سیم‌پیچ جداگانه یا مجزا گویند. با اتصال هریک از سیم‌پیچی‌ها به شبکه برق می‌توان سرعت‌های متفاوتی را به‌دست آورد. (شکل ۵۱).

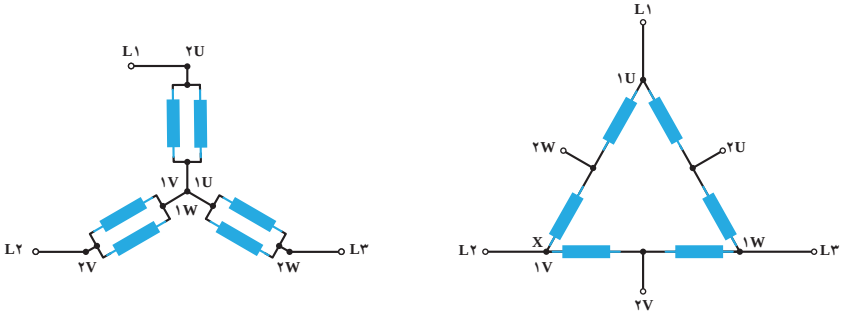
از معایب سیم‌پیچی جداگانه مصرف زیاد سیم و راندمان کم می‌باشد.



شکل ۵۱

ب) سیم‌پیچی دالاندر: در سیم‌پیچی دالاندر، سیم‌پیچ هر فاز استاتور به دو قسمت مساوی تقسیم شده و با تغییر اتصالات سیم‌پیچی موتور دارای دو سرعت خواهد شد. نسبت سرعت کند به سرعت تند در موتورهای دالاندر $\frac{۱}{۲}$ است.

همان‌گونه که در شکل ۵۲ مشاهده می‌کنید هرگاه دو دسته سیم‌پیچی هر فاز موتور به‌صورت مثلث سری اتصال داده شوند موتور با سرعت کند و در صورتی که سیم‌پیچی‌ها به‌صورت ستاره موازی (ستاره دوبل) اتصال یابند موتور با سرعت تند کار می‌کند.



الف) اتصال مثلث سری (دور کند)

ب) اتصال ستارهٔ دوبل (دور تند)

شکل ۵۲ــ سیم‌پیچی دالاندر

۱۴ــ۳ــ ترمز موتورهای القایی

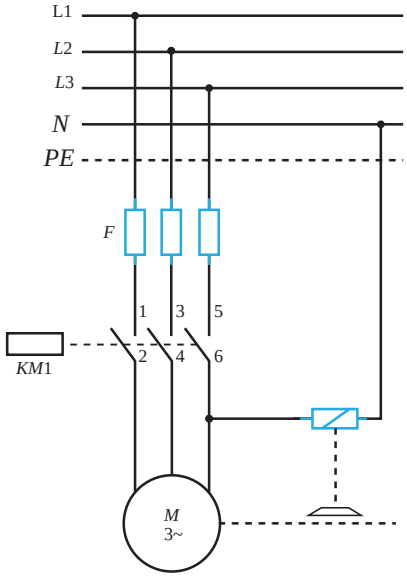
عمل توقف سریع رتور را در موتورهای الکتریکی«**ترمز** » گویند.

هرگاه رتور موتور الکتریکی در حال گردش باشد، به‌دلیل وجود وزن و ابعاد، رتور دارای انرژی جنبشی (اینرسی حرکتی) است. انرژی جنبشی رتور باعث می‌شود پس از قطع برق، رتور متوقف نشود و به گردش همچنان ادامه دهد تا انرژی جنبشی آن در اثر اصطکاک مستهلک شود.

در بعضی از بارهای مکانیکی همچون پمپ‌ها و فن‌ها، اصراری برای توقف سریع رتور وجود ندارد. چرا که بار متصل به آن و نیز نیاز به‌ایست فوری ندارد. اما در نمونه بارهایی نظیر بالابرها، ماشین‌های نساجی، آسانسورها،

زمان و محل ایستادن ماشین اهمیت دارد. در نتیجه لازم است به محض خاموش شدن موتور، رتور کاملاً متوقف شود.

برای انجام ترمز سریع موتور، باید انرژی جنبشی رتور سریعاً مستهلک شود. برای این منظور لازم است انرژی جنبشی رتور به انرژی حرارتی یا به انرژی الکتریکی تبدیل شود.



شکل ۵۳ــ اتصالات سیم‌پیچی موتوردالاندر

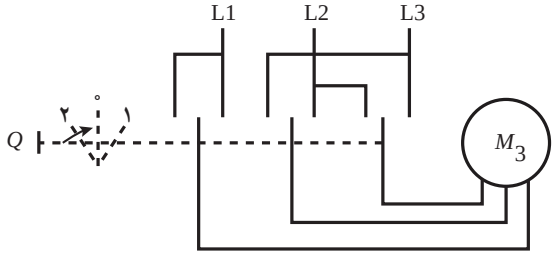
اکثر روش‌های ترمزی انرژی جنبشی رتور را به حرارت تبدیل می‌کنند اما اگر انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی تبدیل شود در این صورت از حرارت داخل موتور کاسته می‌شود و در نتیجه عمرکاری موتور افزایش می‌یابد. برای ترمز موتورهای القایی از روش‌های زیر استفاده می‌شود :

۱ــ ترمزالکترومکانیکی: تصویر ساده‌ای از تجهیزات و نحوه عملکرد این نوع ترمز در شکل ۵۳ نشان داده شده است. در این روش زمانی که کلید موتور وصل می‌شود جریان الکتریکی به سیم‌پیچی استاتور موتور و رله مربوط به سیستم ترمز می‌رسد. در این حالت سیم‌پیچ رله مغناطیس شده و در نتیجه محور صفحه دیسکی ترمز را به طرف خود کشیده و فشار را از روی محور موتور برداشته و موتور از حالت ترمز خارج می‌شود.

هرگاه کلید Q در حالت خاموش قرار گیرد برق موتور و سیم‌پیچ رله ترمز قطع می‌شود. در این حالت خاصیت مغناطیسی سیم‌پیچ از بین رفته و در نتیجه نیروی مقاوم فنری که در پشت محور صفحه دیسکی قرار دارد باعث بازگشت دیسک، بر روی محور موتور می‌شود. تلفات مکانیکی (اصطکاک) در این روش نسبت به سایر روش‌ها بیشتراست.

۲ــ ترمز جریان مخالف: در این روش با استفاده از کلیدی که در شکل (۵۴) مشاهده می‌کنید عمل ترمز انجام می‌شود. وقتی کلید Q درحالت (۱) قرار می‌گیرد سه فاز L_1 وL_2 وL_3 به سرهای سیم‌پیچی استاتور موتور وصل می‌شود و موتور در شرایط کار قرار می‌گیرد. در صورتی که کلید در حالت (۲) قرار گیرد جای دو فاز عوض می‌شود و موتور در وضعیت چرخش مخالف قرار می‌گیرد. اما از آنجایی که Q کلیدی خاص است لذا با رها کردن اهرم کلید درحالت (۲)، کلید به‌صورت خودکار عمل‌کرده و به حالت (۰)کلید باز می‌گردد و برق موتور قطع می‌شود.

در واقع با تغییرحالت کلید از حالت (۱) به حالت (۲) فقط برای یک لحظه کوتاه جای دو فاز در موتور عوض شده و از استمرار وارد شدن گشتاور محرک حالت (۱) به موتور جلوگیری می‌شود.

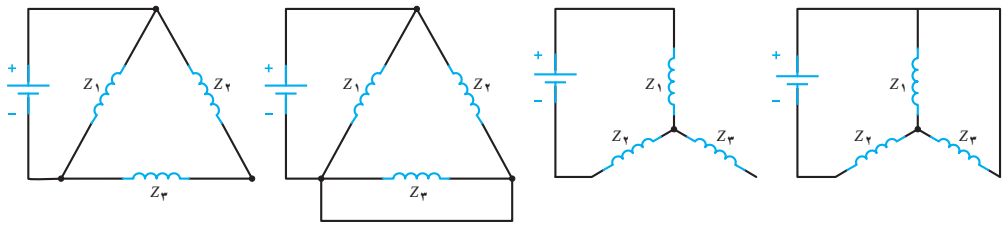


شکل ۵۴ ــ مدار ترمز الکترومکانیکی

توضیح

وضعیت برگشت‌پذیری کلید با علامت فلش کوچک روی حالت (۲) کلید مشخص شده است.

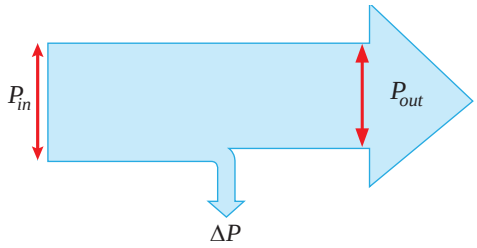
۳ـ ترمز با جریان مستقیم (ترمزدینامیکی): اساس چرخش موتورهای سه فازآسنکرون پدیده القا و میدان دوار است. بر همین اساس در این روش با قطع جریان متناوب سه فاز و وصل سیم‌پیچی‌های استاتور موتور به جریان مستقیم (DC) میدان دوار تبدیل به میدان مغناطیسی ثابت می‌شود. در این شرایط پدیده القا، جاری‌شدن جریان در مفتول‌های رتور و وارد شدن نیرو به رتور صورت نمی‌گیرد. با اتصال جریان مستقیم به سیم‌پیچی‌های موتور آنها به‌صورت آهنربای ثابتی عمل کرده و باعث توقف رتور خواهند شد.
چون سیم‌پیچی‌های موتور معمولاً در قالب یکی از حالات ستاره یا مثلث اتصال داده می‌شوند به همین خاطر در (شکل ۵۵) نحوه اتصال جریان مستقیم به سیم‌پیچی‌های موتور در دو حالت ستاره و مثلث نشان داده شده است.



شکل ۵۵ـ مدار ترمز جریان مخالف

۱۵ـ۳ـ تلفات و راندمان موتورهای الکتریکی

موتورهای الکتریکی توان الکتریکی را به توان مکانیکی تبدیل می‌کنند (شکل ۵۶)



شکل ۵۶ـ ترمز جریان مستقیم

در موتورهای الکتریکی، مقداری از انرژی الکتریکی که در واحد زمان به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود را تلفات موتور می‌گویند وآن را با ΔP نشان می‌دهند. این تلفات از رابطه ۱ به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (۱)$$

مقدار توان ورودی که توان الکتریکی است در موتورهای سه فاز از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

V_L ولتاژ خط برحسب V

I_L جریان خط برحسب A

$\cos\varphi$ ضریب توان موتور

$$P_{in} = \sqrt{۳} V_L I_L \cos\varphi \quad (۲)$$

توان مکانیکی که موتور به بار مکانیکی متصل به رتور تحویل می‌دهد را توان خروجی گویند و با P_{out} نشان می‌دهند.حداکثر توانی که موتور به بار مکانیکی تحویل می‌دهد و آسیب نمی‌بیند را توان«نامی » گویند و با P_{in} نشان می‌دهند. توانی که روی پلاک موتور حک می‌شود بیانگر توان نامی است. موتور به ازای توان نامی، جریان نامی را تحت ولتاژ و فرکانس نامی از شبکه دریافت می‌کند. توان خروجی موتور القایی سه فاز از رابطه(۳) قابل محاسبه است.

$$P_{out} = T_{out}\omega_r \quad (۳)$$

T_{out} گشتاور نامی یا مفید برحسب N.m

ω_r سرعت زاویه‌ای رتور برحسب $\frac{rad}{s}$

P_{out} توان نامی‌رتور برحسب W

روی پلاک موتورها، سرعت برحسب دور در دقیقه RPM نوشته می‌شود لذا برای تبدیل واحد سرعت از RPM به رادیان بر ثانیه (rad/s) از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$\omega = \frac{۲\pi n_r}{۶۰} \quad (۴)$$

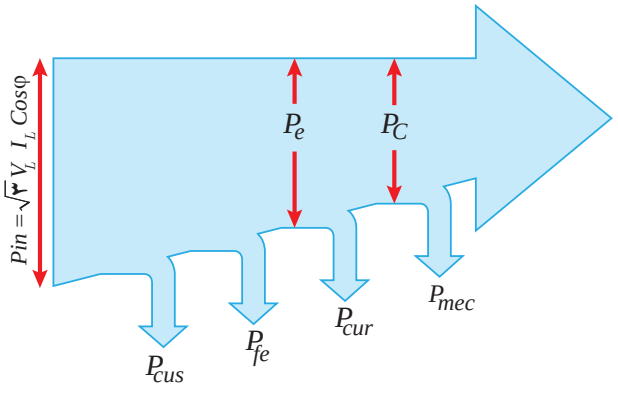
با جای‌گذاری رابطه (۴) در رابطه (۳) خواهیم داشت.

$$P_{out} = T_{out} \times \frac{۲\pi n_r}{۶۰} \quad (۵)$$

نسبت توان خروجی P_{out} به توان ورودی P_{in} راندمان گفته می‌شود. راندمان بر حسب درصد بیان می‌شود و مقدار آن را مطابق رابطه (۶) می توان محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰ \quad (۶)$$

نمودار توازن توان در موتورهای القایی سه فاز در شکل (۵۷) نشان داده شده است.



شکل ۵۷ــ نمودار توازن توان موتورهای القایی سه فاز

تلفات در موتورهای القایی شامل تلفات استاتور و تلفات رتور می‌باشد و از (رابطه ۷) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_r \quad (۷)$$

تلفات استاتور ΔP_S شامل دو قسمت تلفات اهمی و سیم‌پیچی استاتور (تلفات مسی P_{cus}) و تلفات آهنی استاتور (P_{Fes}) است و از رابطه (۸) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P_S = P_{Cus} + P_{Fes} \quad (۸)$$

تلفات آهنی استاتور به دلیل حضور جریان‌های گردابی در هسته و تلفات هیسترزیس ایجاد می‌شود.
تلفات رتور(ΔP_r) از دو قسمت تلفات اهمی‌سیم‌پیچی رتور (تلفات مسی P_{cur}) و تلفات آهنی رتور (P_{Fer}) تشکیل شده است و آن را به‌صورت رابطه (۹) می‌توان نوشت.

$$\Delta P_r = P_{Cur} + P_{Fer} \quad (۹)$$

تلفات مسی رتور عبارت است از مقدار توان تلف شده در سیم‌پیچی موتورهای رتور سیم‌پیچی یا میله‌های به‌کار رفته در رتور موتورهای رتور قفسی است. رتور موتورهای القایی مشابه استاتور دارای تلفات آهنی است اما چون مقدار آن بسیار کم و ناچیز است معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود.
بخش دیگری از تلفات موتورهای القایی تلفات مکانیکی است که به علت وجود اصطکاک یاتاقان‌ها و هوا ایجاد می‌شود.چون سرعت موتورهای القایی ثابت در نظر گرفته می‌شود لذا تلفات مکانیکی نیز جزو تلفات ثابت ماشین شده و با (P_{mec}) نشان می‌دهند.
با جایگزینی تلفات رتور ΔP_r و تلفات استاتور ΔP_s و تلفات مکانیکی P_{mec}، تلفات کل ماشین را به‌صورت رابطهٔ (۱۰) می‌توان نوشت.

$$\Delta P = P_{Cus} + P_{Fes} + P_{Cur} + P_{mec} \quad (۱۰)$$

به توانی که از طریق میدان دوار استاتور در فاصله هوایی به رتور منتقل می شود توان الکترومغناطیسی Pe گویند.
مقدار توان الکترومغناطیسی P_e را می‌توان به‌طور مستقیم از رابطه (۱۱) یا (۱۲) محاسبه کرد.
T_e گشتاور الکترومغناطیس برحسب N.m
ω_r سرعت زاویه‌ای سنکرون موتور القایی برحسب $\frac{rad}{s}$

$$P_e = T_e \omega_s \quad (۱۱)$$

P_e توان الکترومغناطیس برحسب W

$$P_e = T_e \times \frac{۲\pi n_s}{۶۰} \quad (۱۲)$$

همچنین با توجه به نمودار توازن توان برای توان الکترومغناطیسی رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) را می‌توان نوشت.

$$P_e = P_{in} - (P_{Cus} + P_{Fes}) \quad (۱۳)$$
$$P_e = P_{out} + (P_{Cur} + P_{mec}) \quad (۱۴)$$

برای محاسبه تلفات مسی رتور از حاصل‌ضرب لغزش در توان الکترومغناطیسی مطابق رابطه (۱۵) می‌توان

استفاده کرد.

$$P_{Cur} = S \cdot P_e \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) نشان می‌دهد که با افزایش لغزش، تلفات مسی در مدار رتور افزایش یافته و در نتیجه توان خروجی و به دنبال آن راندمان موتور کاهش می‌یابد.
با توجه به اینکه تلفات مسی در استاتور و تلفات مسی رتور هر یک به جریان عبوری از آنها وابسته هستند و این تغییرات جریان نیز با تغییرات بار، متناسب است. لذا به مجموع تلفات مسی استاتور و تلفات مسی رتور «**تلفات متغیر** » موتور القایی گویند.

$$\text{تلفات متغیر} = P_{Cus} + P_{Cur} \quad (۱۶)$$

تلفات مکانیکی رتور و تلفات آهنی استاتور تقریباً ثابت هستند لذا به مجموع این دو تلفات «تلفات ثابت » موتور القایی می‌گویند و رابطه (۱۷) را برای آن می‌توان نوشت.

$$\text{تلفات ثابت} = P_{Fes} + P_{mec} \quad (۱۷)$$

پس کل تلفات (ΔP) در موتورهای القایی را می‌توان مجموع تلفات ثابت و متغیر دانست و به‌صورت رابطه (۱۸) نوشت.

$$\Delta P = \text{تلفات ثابت} + \text{تلفات متغیر}$$
$$\Delta P = (P_{Fes} + P_{mec}) + (P_{Cus} + P_{Cur}) \quad (۱۸)$$

مثال

یک موتور القایی ۴ قطب به شبکه ۳۸۰ ولت ۵۰ Hz متصل و یک بار مکانیکی را با سرعت ۱۴۲۵ R.P.M به حرکت در می‌آورد. اگر جریان دریافتی از شبکه ۱۶ آمپر و ضریب قدرت ۰/۸۵ باشد، مطلوب است:
الف) مقدار لغزش ب) قدرت دریافتی از شبکه
ج) قدرت و گشتاور مفید اگر ضریب بهره موتور ٪۸۰ باشد.

حل:

الف)
$$n_s = \frac{۱۲۰f}{p} = \frac{۱۲۰\times۵۰}{۴} = ۱۵۰۰ \text{R.P.M}$$

ب)
$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۲۵}{۱۵۰۰} = ۰/۰۵$$

$$P_{in} = \sqrt{۳} V_L I_L \cos\varphi$$

$$P_{in} = \sqrt{۳} \times ۳۸۰ \times ۱۶ \times ۰/۸۵ = ۸۹۵۰ \text{ w}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \Rightarrow \quad P_{out} = \eta . Pin$$

ج)

$$P_{out}=۸۰٪\times ۸۹۵۰=۷۱۶۰$$

$$T_{out}=\frac{۶۰P_{out}}{۲\pi nr}=\frac{۶۰\times ۷۱۶۰}{۲\pi\times ۱۴۲۵}=۴۸\,N.m$$

مثال

یک موتور القایی سه فاز رتور رینگی به شبکه ۶۶۰ ولت متصل و جریان ۵۲ آمپر را با ضریب قدرت ۰/۸۴ از شبکه دریافت می‌کند. اگر مشخصات موتور به‌صورت زیر باشد مطلوب است:

الف) قدرت خروجی و قدرت مکانیکی ناخالص $P_{mcc}=۶۲۰\,W$ $P_{Fe}=۱۷۵۰\,W$

ب) ضریب بهره $P_{cur}=۸۱۰\,W$ $P_{cus}=۱۹۰۰\,W$

حل: به کمک نمودار توازن توان داریم

الف)

$$P_{out}=P_{۱}-\Delta P$$

$$P_{in}=\sqrt{۳}V_L I_L\cos\varphi=\sqrt{۳}\times ۶۶۰\times ۵۲\times ۰/۸۴=۴۹۹۳۳W$$

$$\Delta p=P_{Fc}+P_{mcc}+P_{cus}+P_{cur}=۱۷۵۰+۶۲۰+۱۹۰۰+۸۱۰$$

$$\Delta p=۵۰۸۰\ W$$

$$P_{out}=P_{in}-\Delta p=۴۹۹۳۳-۵۰۸۰=۴۴۸۵۳W$$

از روی نمودار توازن می‌توان نوشت:

$$P_c=P_{out}+P_{mcc}$$

$$P_c=۴۴۸۵۳+۶۲۰=۴۵۴۷۳W$$

$$٪\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}\times ۱۰۰$$

$$٪\eta=\frac{۴۴۸۵۳}{۴۹۹۳۳}\times ۱۰۰=\ ۸۹/۸٪$$

مثال

یک موتور القایی سه فاز رتور قفسی ۴ قطب، ۲۵ اسب بخار به شبکه ۴۶۰ ولت و ۶۰Hz متصل و سیم‌پیچی استاتور آن به صورت ستاره است. تلفات ثابت ماشین ۱۸۰۰ وات و ماشین در بار نامی‌دارای ضریب قدرت ۰/۸۶، ضریب بهره ٪۸۳/۵ و لغزش ٪۲/۲ بوده، هر فاز استاتور آن ۴۴۰ میلی اهم مقاومت اهمی‌دارد. مطلوب است:

الف) سرعت رتور ب) جریان استاتور ج) تلفات مسی استاتور و رتور

حل:

الف)

$$n_s=\frac{۱۲۰f}{P}=\frac{۱۲۰\times ۱۲۰}{۴}=۱۸۰۰R.P.M$$

$$S=\frac{n_s-n_r}{n_s} \qquad \Rightarrow n_r=n_s(1-S) \qquad \Rightarrow \qquad n_r=1800(1-0/022)=1760 R.P.M$$

ب) هر اسب بخار معادل ۷۳۶ وات فرض می‌شود:

$P_{out}=25\times736=18400W$

$$P_{in}=\frac{Pout}{\eta}=\frac{18400}{0/835}=22036w$$

$$I_L=\frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_L\cos\varphi}=\frac{22036}{\sqrt{3}\times460\times0/86}=32/16A$$

ج) ابتدا کل تلفات موتور در نقطه کار نامی را به‌دست می‌آوریم:

$\Delta p=P_{in}-P_{out}=22036-18400=3636w$

$\Delta p_{متغیر}=\Delta p-\Delta p_{ثابت}=3636-1800=1836w$

چون اتصال موتور ستاره است، جریان فازی برابر جریان خط است:

$I_1=I_L=32/16A$

$$P_{cus}=3R_1I_1^2=3\times0/44\times32/16^2=1365W$$

$Pcur=\Delta p_{متغیر}-P_{cus}$

$P_{cur}=1836-1365=471w$

پرسش

۱ـ رابطه بین جریان راه‌اندازی و جریان نامی موتورهای القایی کدام است؟

الف) $I_s=2In$ ب) $I_s=\sqrt{3}\ In$ ج) $I_s=In/\sqrt{3}$ د) $I_s=6In$

۲ـ کدام یک از روابط زیر صحیح است ؟

الف) $\sqrt{I_{pY}}=I_L\sqrt{3}$ ب) $I_{p\Delta}=I_L$

ج) $V_{pY}=\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ د) $V_{p\Delta}=\sqrt{3}\ V_L$

۳ـ کدام مورد از جمله خصوصیات روش راه‌اندازی نرم نیست ؟

الف) دارای قابلیت تنظیم دقیق گشتاور ب) کم بودن هزینه تعمیر و نگهداری

ج) افزایش طول عمر مکانیکی موتور د) پایین بودن قیمت تجهیزات

۴ـ با رسم نقشه کلید مدارترمز جریان مخالف، طرز کار آن را به اختصار توضیح دهید.

۵ـ شکل‌های مختلف اتصال جریان DC به سیم‌پیچ‌های استاتور موتور آسنکرون در روش ترمز جریان مستقیم را رسم کنید.

۶ـ نمودار توازن توان در موتورهای القایی را رسم کرده و برای محاسبه توان الکترومغناطیسی و توان مکانیکی ناخالص دو رابطه بنویسید.

۷ـ در روش کنترل سرعت موتور با تغییر فرکانس، به ازای افزایش فرکانس، گشتاور موتور افزایش می‌یابد

☐ صحیح ☐ غلط

۸ـ نسبت سرعت تند به سرعت کند در موتورهای دو سرعته دالاندر برابر ۲ است.

☐ صحیح ☐ غلط

۹ـ تلفات مکانیکی در روش ترمز جریان مستقیم از سایر روش‌ها بیشتر است.

☐ صحیح ☐ غلط

۱۰ـ در روش کنترل سرعت (V) با افزایش ولتاژ مقدار T_s کاهش می‌یابد.

☐ صحیح ☐ غلط

پرسش‌های پایانی پودمان ۳

۱ـ با توجه به روابط سرعت سنکرون و لغزش جدول زیر را کامل کنید.

$f=۵۰Hz$

P	n_s	n_r	S
۲		۲۸۸۰	
	۱۵۰۰	۱۴۴۰	
۸			٪۵
	۵۰۰		٪۱۰

۲ـ موتور آسنکرون سه فازی به قدرت۴kw و ضریب قدرت ۰/۷۵ را به شبکه ۸۳۰ ولتی متصل کرده‌ایم. در بار نامی‌جریانی برابر ۱۲A از شبکه دریافت می‌کند تعیین کنید.

الف) تلفات کلی

ب) راندمان موتور برحسب درصد

۳ـ روی پلاک موتور سه فازی مشخصات زیر نوشته شده است مطلوب است ضریب قدرت موتور را به‌دست آورید.

$V=۴۰۰[V] \quad I=۲۵[A] \quad P=۸ \quad \eta=۸۵٪$

۴ـ یک موتور آسنکرون که با ٪۹۵سرعت سنکرون می‌گردد قدرتی برابر ۶۰ kw از شبکه دریافت می‌کند. هرگاه ضریب بهره موتور ٪۸۰ باشد حساب کنید.

تلفات مسی رتور در صورتی که تلفات مکانیکی ۲kw باشد.

۵ـ موتور القایی سه فازه آسنکرون که قدرت مصرفی آن ۵۵۶۷۲w و ضریب بهره آن ٪۸۰ است دارای سرعت سنکرون ۵۰۰RPM و لغزش در بار کامل ٪۸ می‌باشد. هرگاه افت مسی استاتور ۲۵۰۰w و تلفات آهن ۱/۷kw باشد حساب کنید.

الف) تلفات مکانیکی

ب) افت مسی رتور

ج) ضریب قدرت (اگر موتور با ولتاژ ۶۶۰v کار کند و جریان ۵۰A از شبکه دریافت نماید)

۶ـ یک موتور آسنکرون سه فاز به قدرت ۴hp که با ولتاژ ۳۸۰ ولت در ضریب قدرت ۰/۸ کار می‌کند را در نظر بگیرید. اگر ضریب بهره موتور ٪۸۰ باشد مطلوب است:

الف) جریان که از شبکه دریافت می‌کند

ب) جریان هر فاز موتور (در صورتی که کلاف‌های موتور مثلث باشد)

۷ـ یک موتور القایی سه فاز ۳۸۰ ولت ۸ قطب دارای قدرت مفیدی برابر ۳۲ اسب بخار در ضریب قدرت ۰/۸ است. هرگاه موتور با سرعت ۷۱۰RPM در فرکانس ۵۰ هرتز بچرخد مطلوب است:
الف) راندمان در صورتی که موتور از شبکه ۵۰A دریافت کند.
ب) تلفات کل
ج) لغزش موتور
د) قدرت الکترومغناطیسی (در صورتی که تلفات مکانیکی ۴۴۸ وات باشد)

۸ـ یک موتور آسنکرون سه فاز به قدرت مکانیکی ۳۰hp و ولتاژ ۴۰۰ ولت در فرکانس ۵۰Hz با سرعت ۱۴۴۰RPM می‌چرخد. اگر ضریب قدرت موتور ۰/۸۵ باشد مطلوب است:
الف) لغزش در صورتی که موتور چهار قطب باشد.
ب) قدرت الکترومغناطیسی
ج) تلفات مسی رتور
د) قدرت مصرفی (دریافتی) موتور اگر تلفات آهنی و مسی استاتور به ترتیب ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ باشد
هـ) گشتاورهای T_e ، T_2 دربار نامی(تلفات مکانیکی ۵۰۰w در نظر گرفته شود)
و) جریان خط هر فاز موتور در صورتی که اتصال کلاف‌ها مثلث باشد.

۹ـ یک موتور آسنکرون به قدرت مفید ۳ کیلو وات به شبکه ۳۸۰ ولتی متصل و جریان ۷ آمپر را با ضریب قدرت ۰/۷۸ از شبکه دریافت می‌کند. مطلوب است:
الف) مجموع تلفات ماشین ب) درصد ضریب بهره

۱۰ـ روی پلاک یک الکتروموتور سه فاز این اطلاعات درج شده است.
$\eta=85\%$ $I=16A$ $P=10hp$ $V=380V$
مجموع تلفات و ضریب قدرت موتور را در نقطه کار نامی‌تعیین کنید.

۱۱ـ یک موتور القایی با قدرت خروجی ۱۲ کیلووات و ضریب بهره ۸۴٪ مفروض است. اگر تلفات ثابت ۹۰۰ وات باشد، مقدار تلفات متغیر آن را به‌دست آورید.

۱۲ـ توان الکترومغناطیسی موتوری ۱۰۰۰ وات و تلفات مسی رتور آن ۳۰ وات است. اگر سرعت سنکرون موتور ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و فرکانس شبکه ۶۰ هرتس باشد، مطلوب است:
الف) تعداد قطب‌های سیم‌بندی استاتور ب) سرعت گردش رتور

۱۳ـ یک الکتروموتور القایی سه فاز با اتصال مثلث استاتور به شبکه سه فاز ۲۰۸ ولت و ۶۰ هرتز متصل است و در بار نامی‌با سرعت ۱۷۱۰ دور بر دقیقه و لغزش ۰/۰۵ قدرت ۲۰ کیلووات را با ضریب قدرت ۰/۸۸ از شبکه دریافت می‌کند. تلفات آهنی استاتور ۷۵۰ وات و تلفات مکانیکی ۶۰۰ وات و مقاومت اهمی‌هر فاز استاتور ۰/۴ اهم است. اگر تلفات مسی استاتور و رتور برابر باشند مطلوب است:
الف) جریان دریافتی از شبکه
ب) قدرت الکترومغناطیسی
ج) قدرت مفید
د) گشتاور الکترومغناطیسی
هـ) گشتاور مفید

ارزشیابی مبتنی بر شایستگی پودمان تحلیل ماشین‌های الکتریکی سه فاز (موتورهای القایی)

استاندارد ارزشیابی پیشرفت تحصیلی مبتنی بر شایستگی درس دانش فنی تخصصی الکتروتکنیک					
عنوان پودمان	تکالیف عملکردی (واحدهای یادگیری)	استاندارد عملکرد (کیفیت)	نتایج مورد انتظار	شاخص تحقیق	نمره
پودمان ۳	تحلیل ماشین‌های الکتریکی سه‌فاز (موتور القایی)	محاسبه لغزش موتور القایی با استفاده از رابطه مربوطه ـ محاسبه تلفات موتور القایی ـ محاسبه راندمان موتور القایی	بالاتر از حد انتظار	از کل سؤالات به هفت تا ده سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد.	۳
			در حد انتظار	از کل سؤالات به شش سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد.	۲
			پایین‌تر از حد انتظار	از کل سؤالات به یک تا پنج سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد.	۱
	نمره مستمر از ۵				
	نمره شایستگی پودمان				
	نمره پودمان از ۲۰				

هدف‌گذاری و سنجش:

برای کسب شایستگی در این پودمان اگر هنرجو:

ـ از کل سؤالات به یک تا پنج سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد شایستگی پایین‌تر از حد انتظار خواهد بود.

ـ از کل سؤالات به شش سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد شایستگی در حد انتظار خواهد بود.

ـ از کل سؤالات به هفت تا ده سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد شایستگی بالاتر از حد انتظار خواهد بود.

توجه: سؤالات ارائه شده همگی هم‌ارزش بوده و در سطح یادگیری در حد انتظار است. معیار ارزشیابی نتیجه محور است.

سؤال ۱ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۲ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۳ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۴ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۵ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۶ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۷ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۸ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۹ـ ..... (۲ نمره)

سؤال ۱۰ـ ..... (۲ نمره)