

پودمان سوم

تحلیل ماشین‌های الکتریکی سه فاز (موتورهای القایی)



واحد یادگیری ۱

آیا می‌دانید

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

پس از پایان این پودمان هنجویان 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.

استاندارد
عملکرد



۱-۳- مقدمه

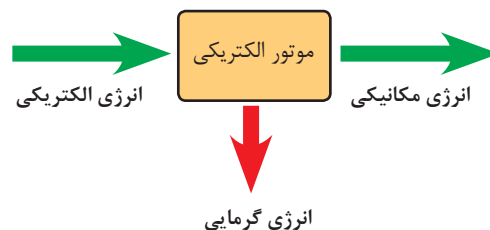
ماشین‌های الکتریکی می‌توانند انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی یا انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند.

در واقع ماشین الکتریکی یک رابط بین سیستم الکتریکی و سیستم مکانیکی می‌باشد. این ارتباط در ماشین‌های الکتریکی بر مبنای 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.

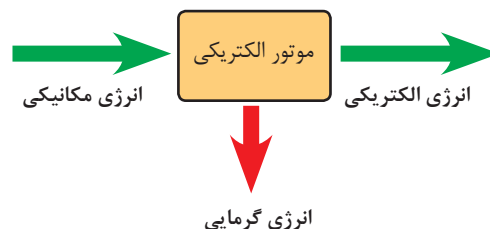
ماشین‌های الکتریکی به دو صورت موتورها و ژنراتورهای الکتریکی استفاده می‌شوند.

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



شکل ۱- بلوک دیاگرام تبدیل انرژی در موتورهای الکتریکی

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



شکل ۲- بلوک دیاگرام تبدیل انرژی در ژنراتورهای الکتریکی

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



شکل ۳- تقسیم‌بندی کلی از ماشین‌های الکتریکی

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

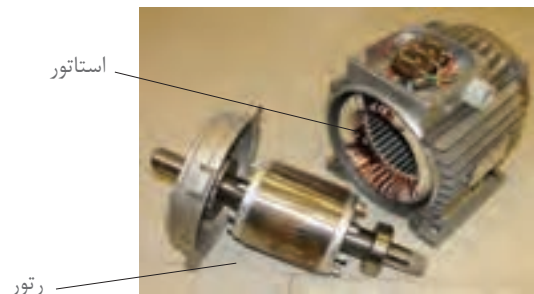
فعالیت



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

۲-۳- 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 ۴- 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 (۵-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 (۵-ب) سیم‌پیچ‌های سه فاز موتور الکتریکی آسنکرون مطابق شکل (۵-ج) در داخل شیارها قرار می‌گیرند.



شکل ۵- اجزای استاتور موتورهای آسنکرون

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

مغناطیسی با پسماند کم انتخاب می‌شود تا تلفات هیستریزیس کم شود. همچنین برای کاهش تلفات فوکو، هسته استاتور از ورق‌های فولادی با روکش عایق ساخته می‌شود. بدنه موتورهای الکتریکی از جنس چدنی یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. سطح خارجی بدنه موتورها به صورت پره پره ساخته می‌شود تا سطح تماس بیشتری با هوای محیط داشته باشد و عمل تهویه و خنک‌سازی سیم‌پیچی بهتر انجام شود. وظیفه بدنه موتور محافظت از هسته و سیم‌پیچ‌ها در برابر ورود اجسام خارجی است. برای اتصال سیم‌پیچ‌های 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 به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قسمت متحرک موتور (رتور) به راحتی 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)

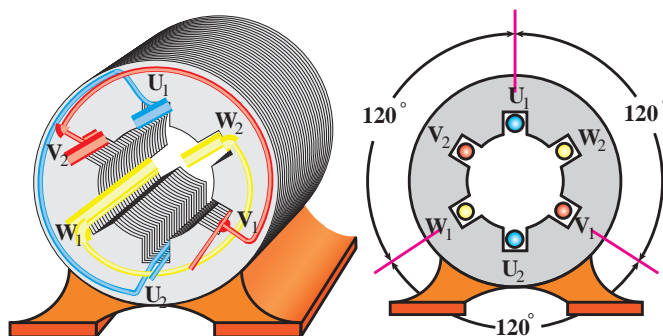


در موتورهای سنگین که جابه‌جایی آن برای افراد میسر نیست، یک قلاب در بالای بدنه ماشین پیش‌بینی می‌شود که بتوان با جرثقیل آن را جابه‌جا نمود. (شکل ۷) اجزای مختلف استاتور را نمایش می‌دهد.



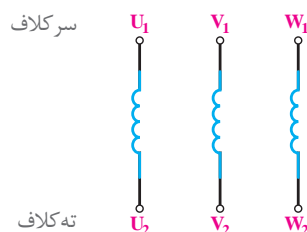
شکل ۷- موتور القایی آسنکرون با توان بالا دارای حلقه جابه‌جایی

استاتور موتورهای آسنکرون سه فاز از سه گروه کلاف سیم‌پیچی تشکیل شده است. با توجه به فضای 360° دایره‌ای شکل استاتور، سیم‌پیچ‌ها به گونه‌ای جاسازی می‌شوند که سیم‌پیچی هر فاز با سیم‌پیچی فاز دیگر 120° 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 نظر گرفته می‌شود (شکل ۸). اما در واقعیت تعداد شیارهای استاتور موتورهای آسنکرون می‌تواند بیشتر از این تعداد می‌باشد.



شکل ۸- سه گروه سیم پیچ

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



شکل ۹- نام گذاری سیم پیچی موتورهای الکتریکی سه فاز

ب) رتور

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

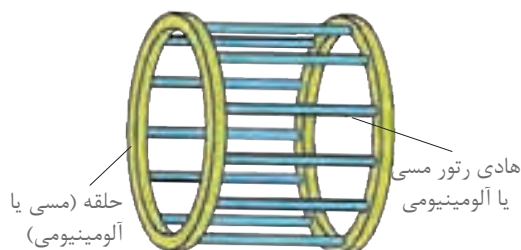
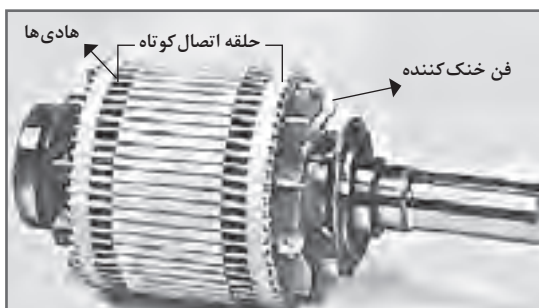
۱- رتور قفسی

۲- رتور سیم پیچی شده

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

۱- رتور قفسی: رتور قفسی از تعدادی مفتول، دو حلقه هادی و هسته آهنی تشکیل شده است. ابتدا و انتهای مفتول‌ها توسط دو حلقه هادی به یکدیگر 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 ۱۰- 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 اندازه پهنای یک شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۱)



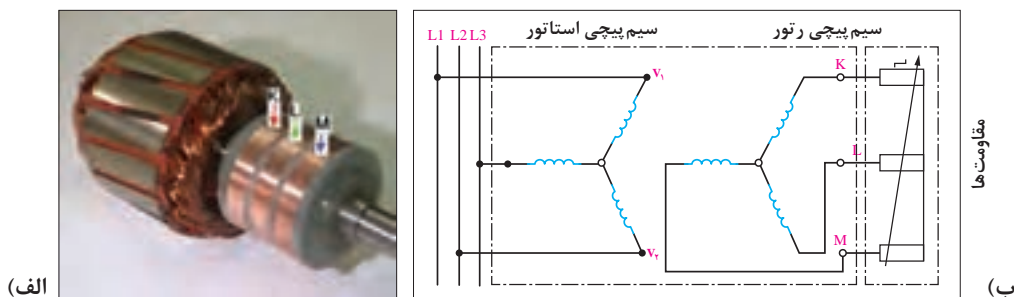
شکل ۱۱

۲- 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 به صورت 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 (۱۲-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. شکل (۱۲-ب)



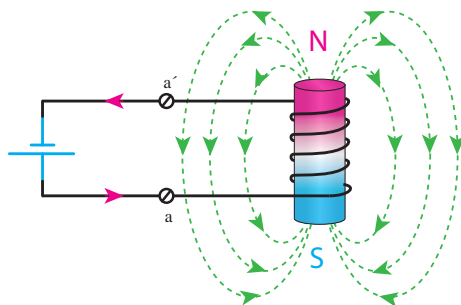
شکل ۱۲- رتور سیم‌پیچی



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

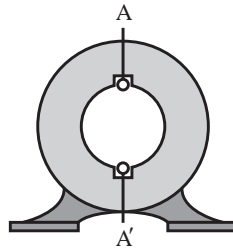
۳-۳- پدیده میدان دوار مغناطیسی در موتورهای الکتریکی

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.



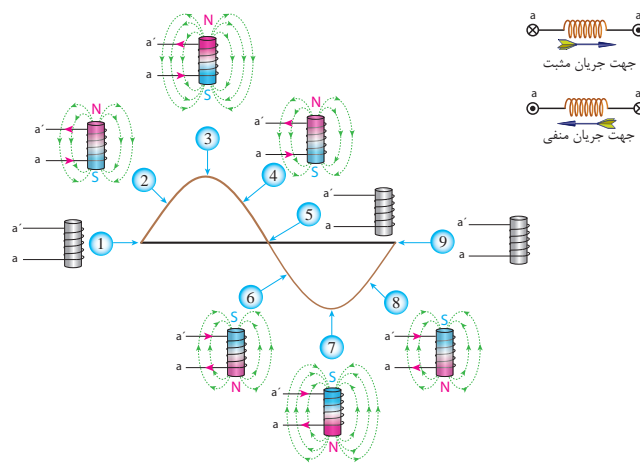
شکل ۱۳- میدان مغناطیسی ثابت

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



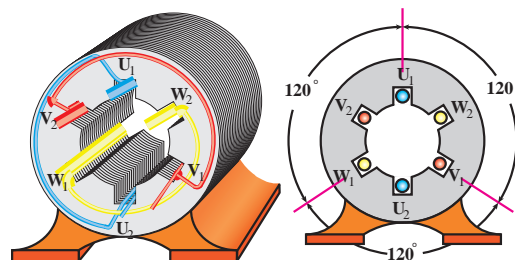
شکل ۱۴- قرار گرفتن سیم‌پیچی در داخل استاتور

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 ضربانی» گویند. (شکل ۱۵)



شکل ۱۵- چگونگی تولید میدان ضربانی

اکنون استاتوری با شش شیار را مطابق (شکل ۱۶) در نظر بگیرید به طوری که سه گروه کلاف با اختلاف فاز مکانی 120° درون شیارها قرار داده شده است.

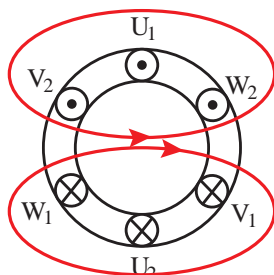


شکل ۱۶- نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچی‌های موتور سه فاز

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 برآیند میدان مغناطیسی سیم پیچ‌ها در لحظات مختلف موقعیت میدان مغناطیسی درون استاتور مشخص خواهد شد (شکل ۱۷).



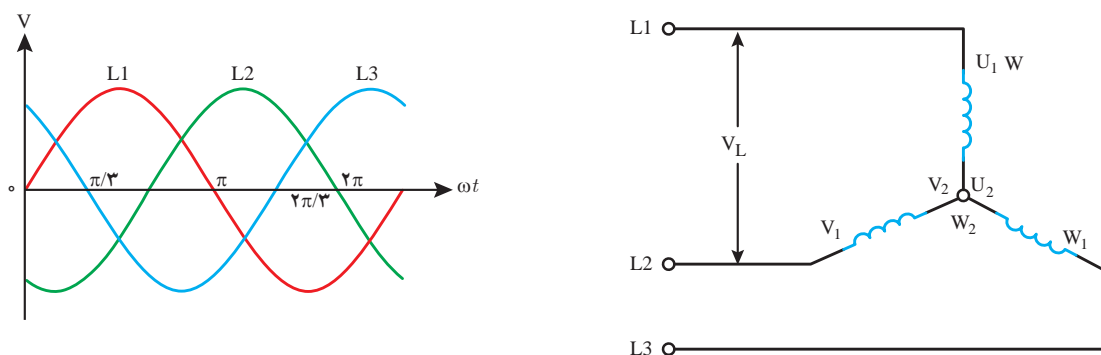
شکل ۱۷- چگونگی میدان مغناطیسی اطراف سیم پیچی‌های سه فاز

میدان مغناطیسی که با دامنه ثابت درون استاتور با سرعت ثابت می‌گردد را «میدان دوار» گویند. برای به دست آوردن وضعیت میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان الکتریکی سه فاز از سیم پیچ‌های استاتور چنین باید عمل کرد.

۱- سیم پیچی‌های استاتور به صورت ستاره اتصال داده شوند.

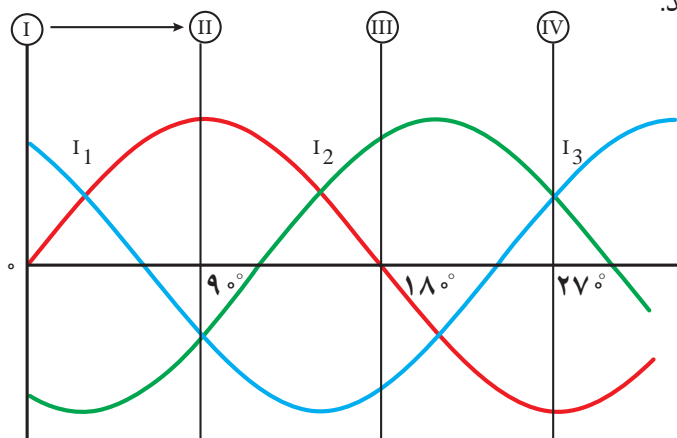
۲- ولتاژهای سه فاز L_1 ، L_2 و L_3 به سر کلاف‌های U_1 ، V_1 و W_1 اعمال شود. (شکل ۱۸)

۳- شکل موج‌های سه فاز بر اساس زوایا و با رعایت دقیق اختلاف 120° درجه‌ای بین فازها رسم شوند.



شکل ۱۸- نحوه اتصال سیم پیچی‌های استاتور موتور به شبکه سه فاز

۴- در چند موقعیت از جریان متناوب سه فاز، جهت جریان سیم پیچ‌ها بررسی شوند تا مکان قطب‌ها در سطح استاتور مشخص شوند.



شکل ۱۹- 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 آن را با علامت \otimes نشان داد (شکل ۲۰-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 \odot نشان داد. (شکل ۲۰-ب)



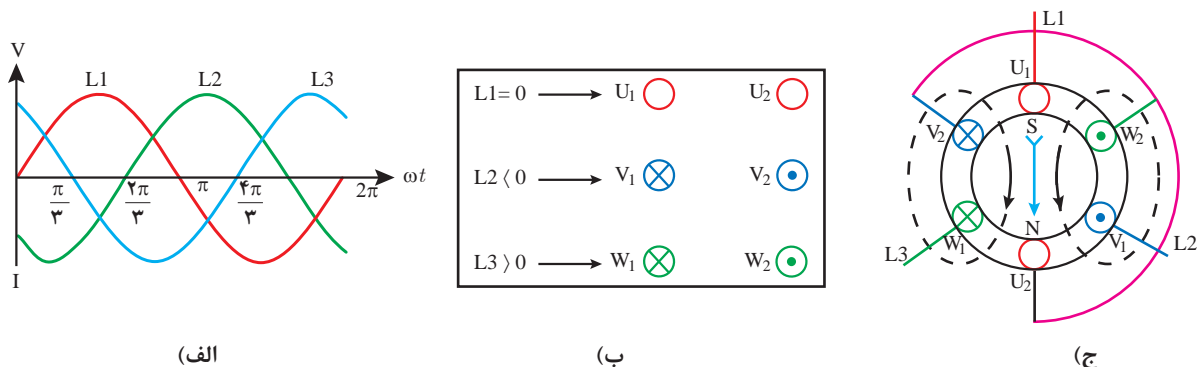
(ب) جهت ورود جریان از ته سیم‌پیچ

(الف) جهت ورود جریان از سر سیم‌پیچ

شکل ۲۰- 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 \otimes و خروجی W_2 علامت \odot خواهد داشت. در همین موقعیت فاز L_2 در نیم سیکل منفی است، در نتیجه جریان الکتریکی از سر سیم پیچ دوم (B) خارج شده و از انتهای سیم پیچ V_2 وارد می‌شود، پس ورودی V_1 علامت \odot و خروجی V_2 علامت \otimes 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 سیم‌پیچ‌ها و جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده از روش اختصار شده شکل (۲۱-ب) می‌توان استفاده کرد.



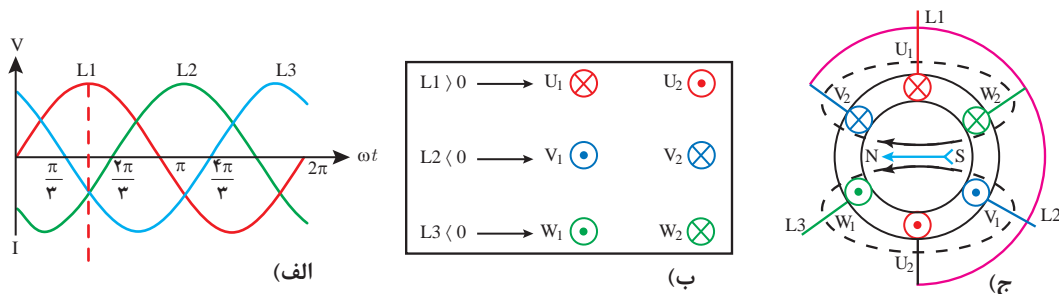
(الف)

(ب)

(ج)

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

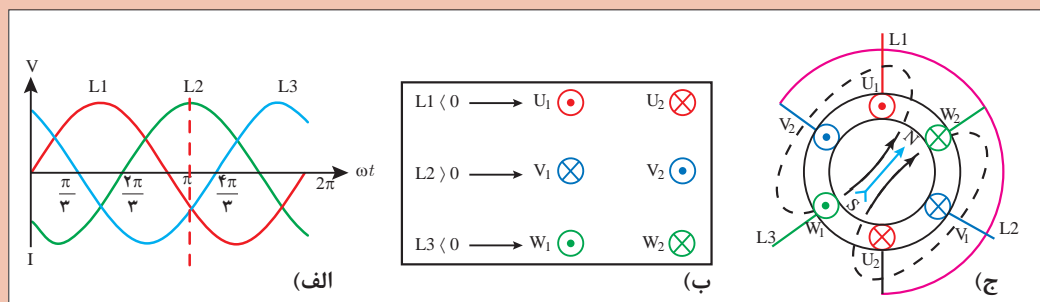
موقعیت ۲ ($\omega t = 90^\circ$): همان گونه که در شکل (۲۲-الف) مشاهده می شود فاز L_1 در مقدار حداکثری نیم سیکل مثبت و فاز L_2 و L_3 در نیم سیکل منفی هستند. پس جریان از سر سیم پیچ اول یعنی وارد U_1 و از سر کلاف های V_1 و W_1 خارج می شوند. در (شکل ۲۲-ب) وضعیت سیم پیچ ها به صورت خلاصه نشان داده شده است. همان گونه که در (شکل ۲۲-ج) عقربه مغناطیسی نشان می دهد با توجه به قطب سازی صورت گرفته میدان مغناطیسی به اندازه 90° درجه چرخیده است.



شکل ۲۲- وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۲ ($\omega t = 90^\circ$)

موقعیت ۳ ($\omega t = 210^\circ$): 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 ۲۳-ب) وضعیت ورود و خروج جریان در سیم پیچ ها به طور خلاصه نشان داده شده است. با کمی دقت و مقایسه دو شکل (۲۲-ج) و (۲۳-ج) می توان مشاهده کرد که میدان مغناطیسی به وجود آمده در این وضعیت به اندازه 120° درجه تغییر مکان داشته است.

چرا در موقعیت ۳ میدان به اندازه 120° درجه نسبت به موقعیت ۲ تغییر مکان داشته است؟

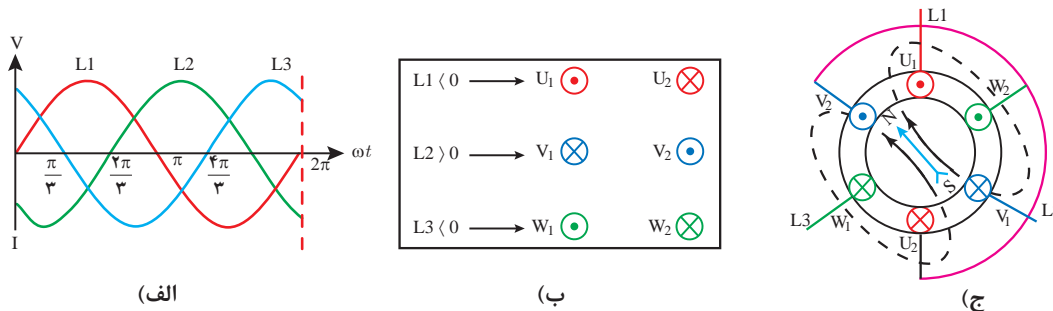


شکل ۲۳- وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۳ ($\omega t = 210^\circ$)

سؤال

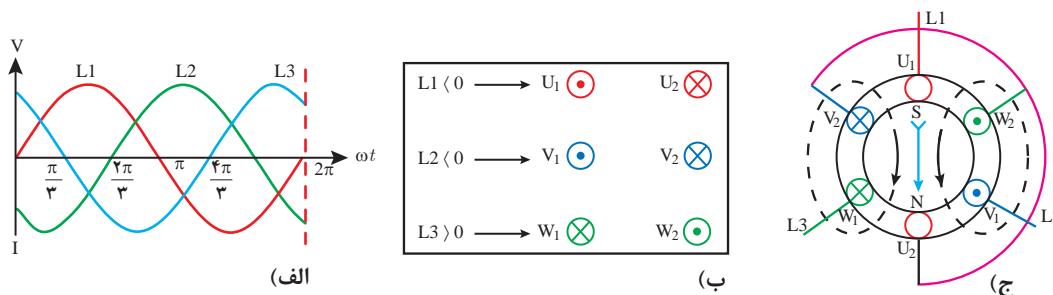


موقعیت ۴ ($\omega t = 27^\circ$): در این موقعیت فاز L_2 جای خود را به فاز L_3 داده است. به طوری که در شکل (۲۴) مشخص است فاز L_3 در مقدار حداکثری نیم سیکل مثبت خود اما دو فاز دیگر یعنی فازهای L_1 و L_2 در نیم سیکل منفی هستند. در (شکل ۲۴-ب) وضعیت ورود و خروج جریان در سیم پیچ‌ها و در شکل (۲۴-ج) وضعیت میدان مغناطیسی دوار نشان داده شده است.



شکل ۲۴- وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۴ ($\omega t = 27^\circ$)

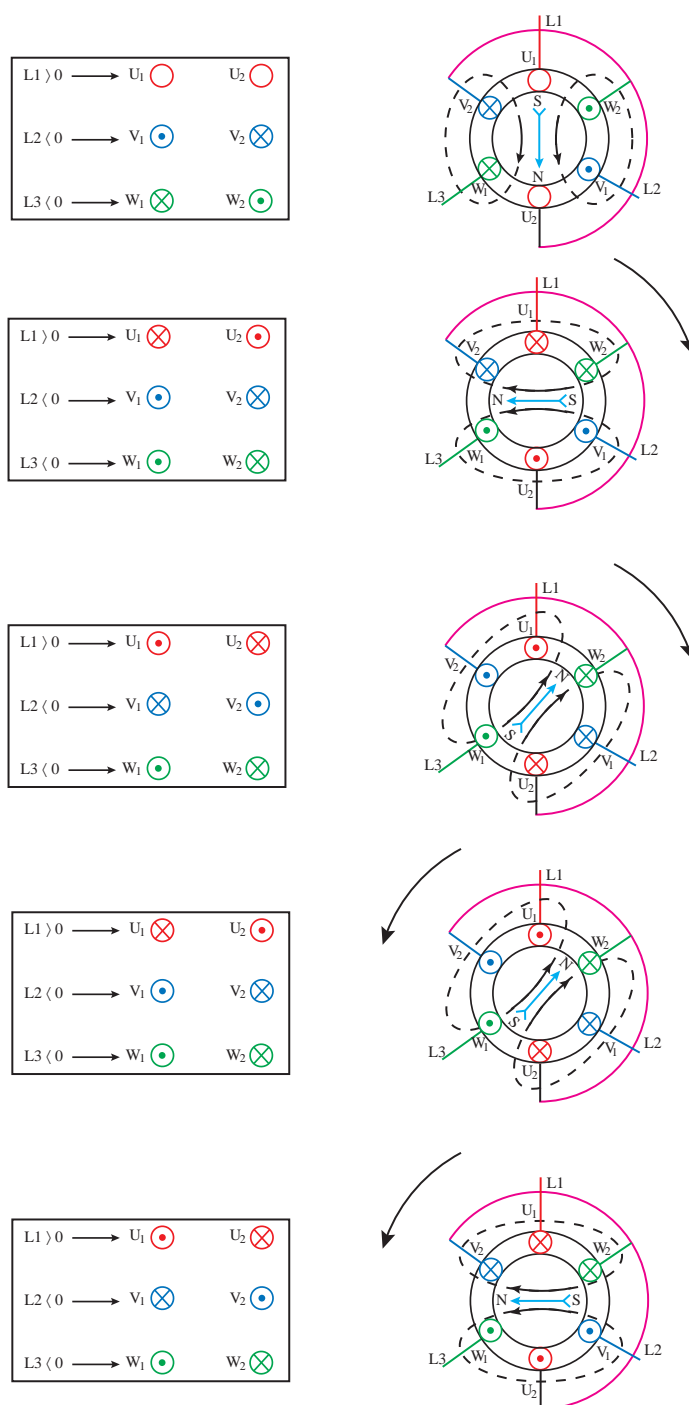
موقعیت ۵ ($\omega t = 36^\circ$): این موقعیت مشابه موقعیت ۱ است چرا که در انتهای سیکل موقعیت فازها به همان موقعیت اول برگشته است. (شکل ۲۵-الف) لذا قطب‌های حاصل از میدان مغناطیسی در همان موقعیت ۱ قرار گرفته است. همان طوری که در شکل (۲۵-ب) مشاهده می‌کنید فاز L_1 برابر صفر، فاز L_2 در نیم سیکل منفی و فاز L_3 در نیم 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 ۲۵-ج)



شکل ۲۵- وضعیت میدان مغناطیسی و تشکیل قطب در موقعیت ۵ ($\omega t = 36^\circ$)

۴-۳- تغییر جهت چرخشی میدان دوار

در صورتی که جای دو فاز از سه فاز متصل شده به موتور الکتریکی به اختیار عوض شود، جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار استاتور عوض می‌شود. برای تغییر جهت گردش موتورها از کلید چپگرد - راستگرد یامدارهای کنناکتوری استفاده می‌شود. برای نشان دادن تغییر جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار می‌توان از روش ترسیمی استفاده کرد. در اینجا برای مقایسه وضعیت میدان‌های مغناطیسی در دو حالت راستگرد و چپگرد، وضعیت میدان دوار در سه موقعیت $\omega t = 0^\circ$ ، $\omega t = 90^\circ$ و $\omega t = 210^\circ$ نشان داده شده است. شکل ۲۵-الف وضعیت میدان دوار در شرایط راستگرد و شکل ۲۵-ب وضعیت میدان در شرایط چپگرد را نشان می‌دهد.



شکل ۲۶- وضعیت میدان مغناطیسی در شرایط جابه‌جایی دو فاز

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



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 $\omega t = 60^\circ$ ، $\omega t = 150^\circ$ و $\omega t = 240^\circ$ را ترسیم کنید.

۵-۳- عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

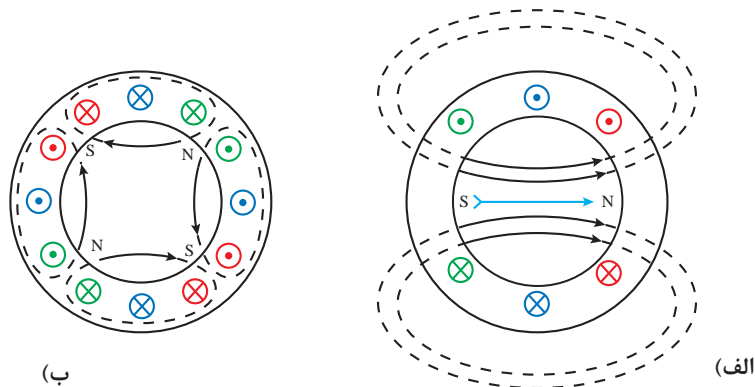
برای ترسیم میدان دوار از شکل موج جریان‌های سه فاز در فواصل منظم و در یک دوره تناوب استفاده می‌شود. حالا تصور کنید هر چه دوره تناوب موج جریان سریع‌تر باشد، و در زمان تناوب کوتاه‌تری تکرار شود سرعت گردش میدان دوار بیشتر خواهد شد. با افزایش زمان دوره تناوب موج جریان، سرعت گردش میدان دوار کندتر می‌شود.

سرعت میدان دوار با زمان تناوب رابطه عکس دارد. بین زمان تناوب و فرکانس رابطه $(f = \frac{1}{T})$ برقرار است. با تغییر فرکانس، زمان تناوب موج جریان سرعت و گردش میدان دوار تغییر می‌کند.

$$n_s \times f$$

سرعت میدان دوار موتور آسنکرون را «سرعت سنکرون» می‌نامند و با n_s نمایش می‌دهند. با افزایش تعداد کلاف‌های سیم‌پیچی استاتور موتورهای سه فاز، فاصله بین قطب‌ها کم می‌شود و در نتیجه سرعت میدان دوار کاهش می‌یابد. (شکل ۲۷-ب)

در میدان دوار چهار قطبی فاصله بین قطب‌ها نصف فاصله بین قطب‌های میدان دوار دو قطبی است.



شکل ۲۷- افزایش تعداد قطب

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

جریان عبوری از سیم پیچ‌ها در یک دوره تناوب موج جریان فقط یکبار تغییر جهت می‌دهد، لذا قطب N و S میدان دوار در یک دوره تناوب جابه‌جا می‌شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی، قطب‌ها 360° 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 180° درجه محیط استاتور را اشغال می‌کند در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها 180° درجه محیط استاتور را طی می‌کند. پس ۲ دوره تناوب طول می‌کشد 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) می‌گویند (جدول ۱)

جدول ۱- محیط اشغال شده توسط قطب

تعداد قطب P	تعداد زوج قطب $\frac{P}{2}$	محیط اشغال شده توسط زوج قطب	چرخش میدان در محیط استاتور برای یک دوره تناوب
۲	۱	$\frac{360}{1} = 360$	طی محیط کامل
۴	۲	$\frac{360}{2} = 180$	طی نصف محیط $= \frac{1}{2}$
۶	۳	$\frac{360}{3} = 120$	طی ثلث محیط $= \frac{1}{3}$
۸	۴	$\frac{360}{4} = 90$	طی ربع محیط $= \frac{1}{4}$
...
P	$\frac{P}{2}$	$\frac{360}{P}$	عبور از مقابل P در محیط $= \frac{1}{\frac{P}{2}}$

سرعت میدان دوار از این رابطه به دست می‌آید.
در این رابطه:

$$n_s = \frac{120f}{P}$$

n_s - سرعت میدان دوار بر حسب RPM

f - فرکانس شبکه برق بر حسب Hz

P - تعداد قطب‌های میدان دوار می‌باشد.

سرعت میدان دوار با فرکانس جریان برق نسبت مستقیم و با تعداد قطب‌های میدان دوار رابطه عکس دارد.

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

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

مثال



تمرین



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

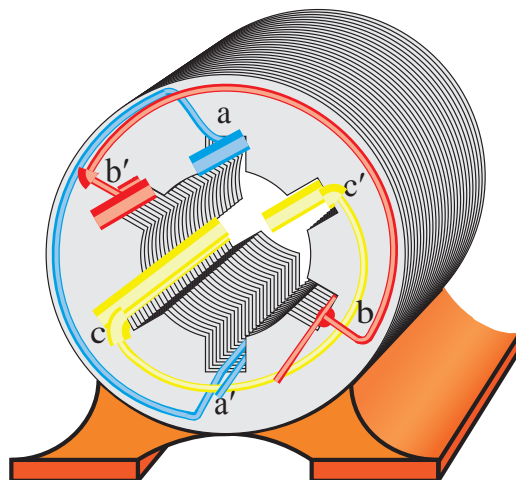
جدول ۲- محاسبه سرعت میدان دوار در ماشین القایی

سرعت میدان دوار (RPM)	تعداد زوج قطب $\frac{P}{2}$	تعداد قطب‌ها P	فرکانس برق شهر Hz
?	۱	۲	۵۰
?	۲	۴	
?	۳	۶	
۷۵۰	?	۸	
۶۰۰	?	۱۰	
۵۰۰	?	۱۲	

۶-۳- طرز کار موتورهای آسنکرون

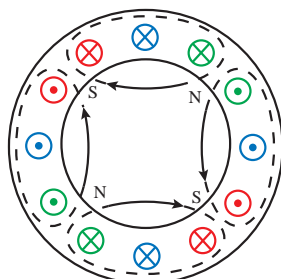
با اتصال جریان متناوب سه فاز به سیم‌پیچی استاتور موتور آسنکرون میدان مغناطیسی دوار درون استاتور تولید می‌شود (شکل ۲۸).
با قرار گرفتن رتور قفسی درون استاتور، میدان دوار هادی‌های رتور را قطع می‌کند و طبق قانون القای فارادی

در آنها نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. $(E = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t})$



شکل ۲۸- موتور آسنکرون

به دلیل القای نیروی محرکه القایی، در هادی‌های 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 رتور گشتاور تولید می‌کند. این گشتاور باعث گردش رتور حول محورش خواهد شد. $(T = F \cdot r)$



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

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



- ۱- 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
- ۲- در موقعیت ۲۷۰ درجه میدان دوار به ترتیب 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
- ۳- در نیم سیکل منفی جریان از سیم پیچ وارد شده و جهت جریان در سر سیم پیچ به صورت در نظر گرفته می شود.
الف) انتها، ● (ب) انتها، ⊗ (ج) سر، ● (د) سر، ⊗
- ۴- وضعیت میدان مغناطیسی در موقعیت‌های ۱۲۰° و ۱۳۵° و ۳۰۰° را رسم کنید.
- ۵- چگونه می توان جهت گردش موتورهای الکتریکی را عوض کرد؟ با رسم شکل در یک موقعیت آن را توضیح دهید.
- ۶- چگونگی چرخش رتور موتورهای القایی را شرح دهید.
- ۷- جنس میله‌های رتور موتورهای القایی از چه ماده‌ای است و چرا مورب ساخته می شوند؟
- ۸- با سه برابر شدن فرکانس و نصف شدن تعداد قطب یک موتور سه فاز القایی سرعت آن $\frac{1}{6}$ می شود.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۹- در ماشین‌های رتور قفسی هادی‌های رتور نسبت به هسته عایق هستند.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۱۰- برای تغییر جهت گردش موتور باید جای دو فاز فرد را با فازهای زوج عوض کرد.
☐ صحیح ☐ غلط

۷-۳- لغزش در موتورهای القایی

با اتصال سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور موتور القایی به جریان متناوب سه فاز میدان دوار با سرعت سنکرون می گردد. اما رتور نمی تواند 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 » می گویند.

$$\Delta n = n_s - n_r$$

در یک ماشین القایی نسبت سرعت لغزش به سرعت میدان دوار را «لغزش» می گویند 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 به صورت درصد نشان می دهند.

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

در موتورهای القایی شرط ایجاد گشتاور جاری شدن جریان در هادی های رتور است و شرط جاری شدن جریان، وجود نیروی محرکه القایی در دو سر هادی های رتور می باشد. از طرفی شرط القا نیروی محرکه نیز وجود اختلاف سرعت بین میدان دوار و سرعت رتور است. لذا اختلاف سرعت در موتورهای القایی رتور قفسی از اهمیت به سزایی برخوردار است. به طور کلی در موتورهای القایی هرگاه سرعت چرخش میدان دوار با سرعت چرخش رتور اختلاف داشته باشد آن گروه از موتورها را «آسنکرون» یا غیرهمزمان می گویند 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 می چرخد مطلوب است. سرعت لغزش و لغزش این موتور القایی را به دست آورید.

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

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

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

و یا

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.033$$

با توجه به رابطه لغزش S برای محاسبه سرعت رتور رابطه زیر به دست می آید.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \rightarrow s \times n_s = n_s - n_r \rightarrow n_r = n_s - S \times n_s \rightarrow n_r = n_s (1 - S)$$

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؟

$$n_s = \frac{120f}{P} \rightarrow n_s = \frac{120 \times 50}{2} = 1500 \text{ RPM}$$

$$n_r = n_s(1 - S) = 1500(1 - 0.2) = 1200 \text{ RPM}$$

مثال



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

$$n_r = 850 \text{ RPM} \rightarrow n_s = 1000 \text{ RPM}$$

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \rightarrow P = \frac{120 \times f}{n_s} \rightarrow P = \frac{120 \times 50}{1000} = 6$$

۳-۸- 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 $S=1$ یا $S=100\%$ است.

$$n_r = 0 \Rightarrow S = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1 \text{ یا } 100\%$$

ب) بی‌باری: اگر رتور با سرعت سنکرون یا همان سرعت میدان دوار گردش کند لغزش موتور صفر می‌شود. در حالت بی‌باری موتورهای القایی سرعت رتور تقریباً نزدیک به سرعت میدان دوار است به همین دلیل سرعت رتور را برابر در نظر می‌گیرند.

در شرایط بی‌باری لغزش موتور $S=0$ یا $S=0\%$ است.

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

ج) بارداری: رتور موتور القایی پس از راه اندازی دور می گیرد و سرعت آن پی در پی افزایش می یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور و میدان دوار کمتر می شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است ادامه دارد.

با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یا تاقان ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می شود. بر همین اساس لغزش این حالت دارای مقداری بین صفر و یک است.

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

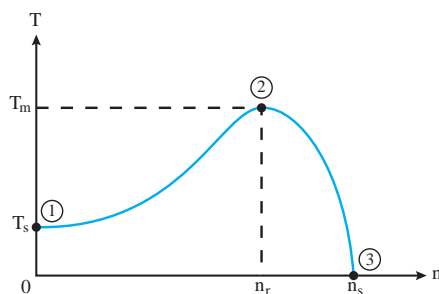
لغزش ماشین القایی در حین کار کمتر از لغزش زمان راه اندازی و بیش از لغزش در حالت بی باری (سرعت سنکرون) است. به این حالت کاری ماشین «موتوری» نیز گفته می شود.

د) ترمزی: در صورتی که بتوانیم با وارد کردن نیرویی، رتور در خلاف جهت چرخش میدان دوار حرکت کند در این صورت توانسته ایم از ادامه حرکت رتور در شرایط قبلی جلوگیری کنیم. به این حالت کاری ماشین «ترمزی» گفته می شود و مقدار لغزش آن چنین به دست می آید.

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

۳-۹- مشخصه گشتاور - دور موتور القایی

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



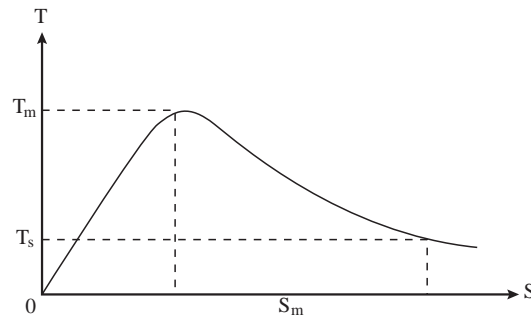
شکل ۳۰- مشخصه گشتاور - دور موتور القایی

در مشخصه گشتاور - دور نقاط مهمی وجود دارد که به ترتیب عبارت اند از:

نقطه (۱) لحظه راه اندازی موتور است و سرعت رتور برابر صفر و گشتاور موتور دارای مقدار T_s است. مقدار گشتاور موتور در لحظه شروع به کار را «گشتاور راه اندازی» گویند و با T_s نشان می دهند. مقدار گشتاور راه اندازی را با T_s نشان می دهد که موتور چه مقدار گشتاور بار را می تواند به راه بیاندارد.

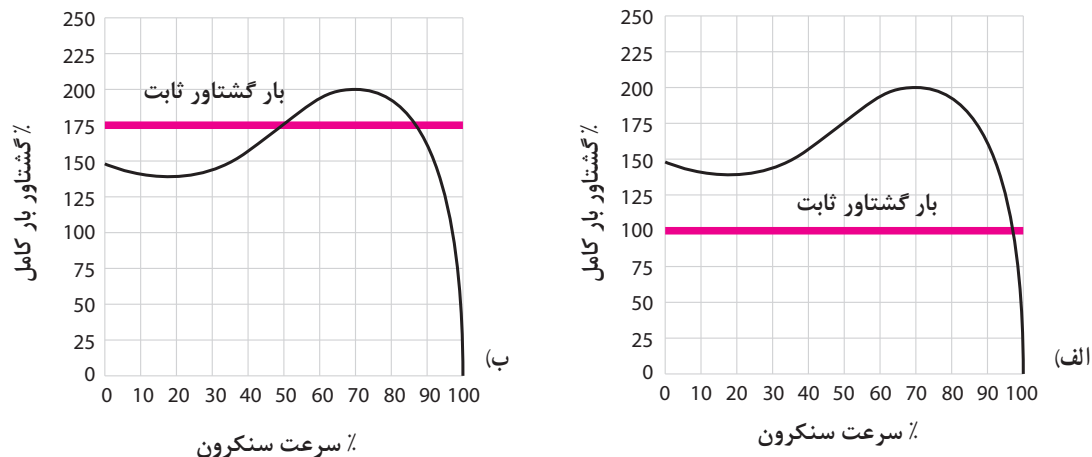
با افزایش سرعت رتور، گشتاور موتور افزایش می یابد تا در نقطه ۲ به بیشترین مقدار خود می رسد. بیشترین مقدار گشتاور تولیدی موتور را که به ازای سرعت n_{rm} تولید می شود گشتاور «ماکزیمم» گویند و با « T_m »

نشان می‌دهند. با افزایش سرعت رتور به بیش از n_{rm} ، گشتاور تولیدی موتور کاهش می‌یابد 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 - لغزش نیز ارائه شده است (شکل ۳۱) تصویر مشخصه گشتاور - لغزش موتورهای القایی را نشان می‌دهد.



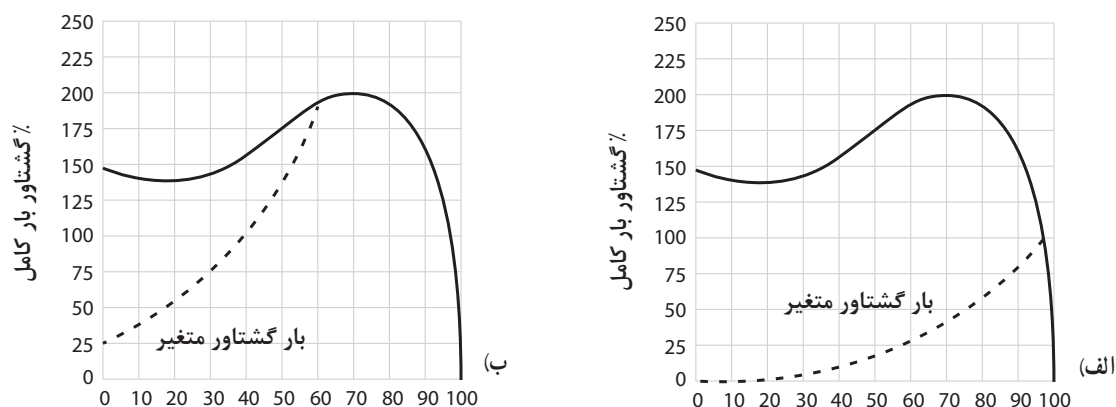
شکل ۳۱- مشخصه گشتاور - لغزش موتورهای القایی

هر بار مکانیکی که روی محور موتور قرار می‌گیرد مشخصه گشتاور - 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 (الف - ۳۲) و (ب - ۳۲) دو نمونه مشخصه گشتاور بار ثابت را نشان می‌دهند.



شکل ۳۲- دو نمونه مشخصه گشتاور - بار ثابت

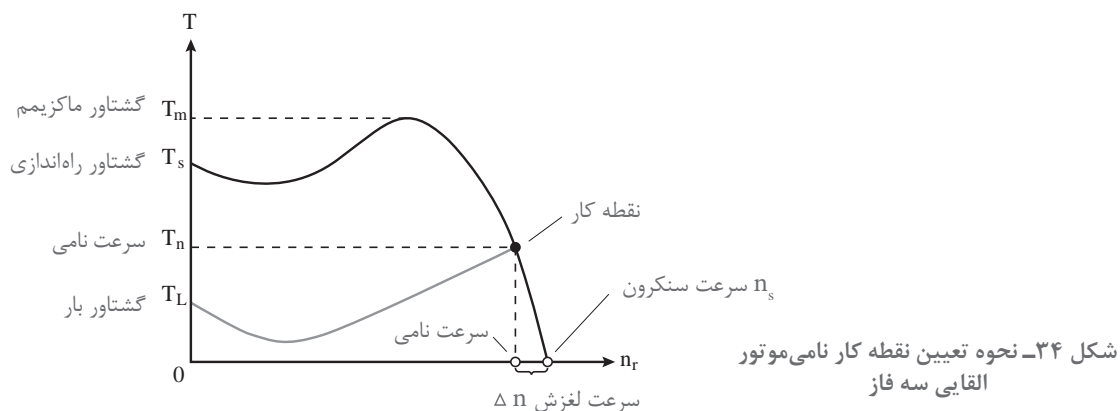
اما بارهای دیگری وجود دارند که دارای مشخصه گشتاور بار ثابت نبوده و به‌ازای تغییرات سرعت موتور مقدار گشتاور آنها تغییر می‌کند. در شکل (۳۳-الف) و (۳۳-ب) چند نمونه مشخصه گشتاور بار را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۳- دو نمونه مشخصه گشتاور - بار متغیر

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

هرگاه مقدار گشتاور 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 موتور القایی، بار موردنظر را با سرعتی ثابت به‌حرکت در می‌آورد. برای تعیین این سرعت باید مشخصه گشتاور - دور موتور و مشخصه گشتاور بار را روی یک صفحه دکاریتی رسم کرد. سپس محل تلاقی این دو منحنی را مشخص نمود. نقطه‌ای که مشخصه گشتاور - دور موتور القایی با مشخصه گشتاور - دور بار مکانیکی تلاقی می‌نماید، 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 ۳۴- نحوه تعیین نقطه کار نامی موتور 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 می‌کنند.

نکته ۱



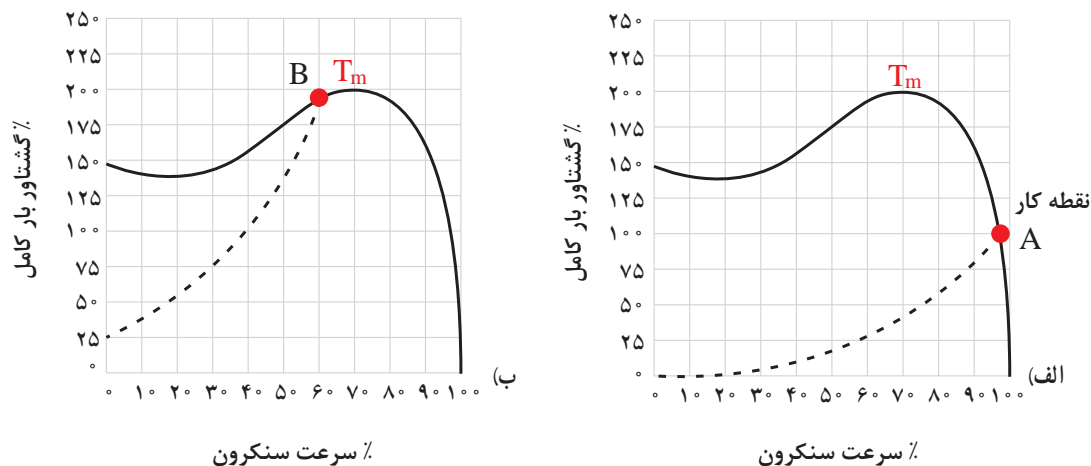
در فاصله نقطه T_s تا T_m مشخصه گشتاور - دور، افزایش گشتاور و سرعت در موتور با هم رخ می‌دهد. در این فاصله امکان تثبیت سرعت موتور وجود ندارد به همین دلیل هیچ‌گاه نقطه کار موتور را نباید در محدوده T_s تا T_m انتخاب کرد.

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.

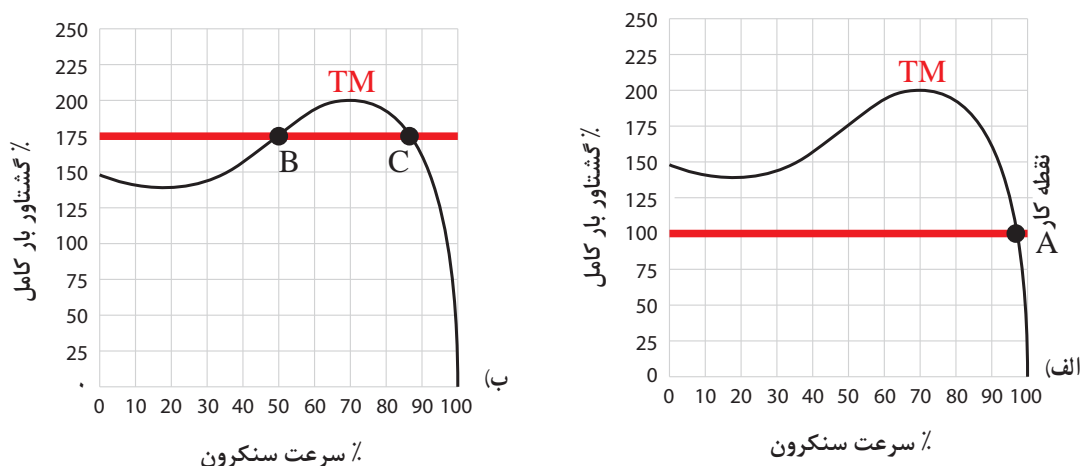
دو مشخصه بار در (شکل ۳۵) نشان داده شده است. در شکل‌های (الف) و (ب) گشتاور بار از گشتاور راه‌اندازی موتور کمتر است. اما نقطه کار (A) در ناحیه‌ای از منحنی قرار گرفته که از نقطه (T_m) عبور کرده است و این نقطه را به‌عنوان نقطه کار می‌توان انتخاب کرد. اما نقطه کار (B) در ناحیه T_s تا T_m منحنی قرار گرفته 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 ۳۵- تعیین نقطه کار روی دو نمونه مشخصه گشتاور - 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 - دور موتور و مشخصه گشتاور بار ولی در شکل (ب) دو نقطه تلاقی B و C وجود دارد که می توان به عنوان نقطه کار انتخاب کرد.

با کمی دقت در شکل ها می توان نتیجه گرفت چون در مشخصه شکل (ب) مقدار گشتاور راه اندازی موتور از گشتاور بار کمتر است پس موتور راه اندازی نمی شود. اما در شکل (الف) چون مقدار گشتاور راه اندازی بیشتر از گشتاور بار است و نقطه کار پس از نقطه گشتاور ماکزیمم است و امکان تثبیت سرعت وجود دارد و بعد از راه اندازی موتور پایدار می شود.



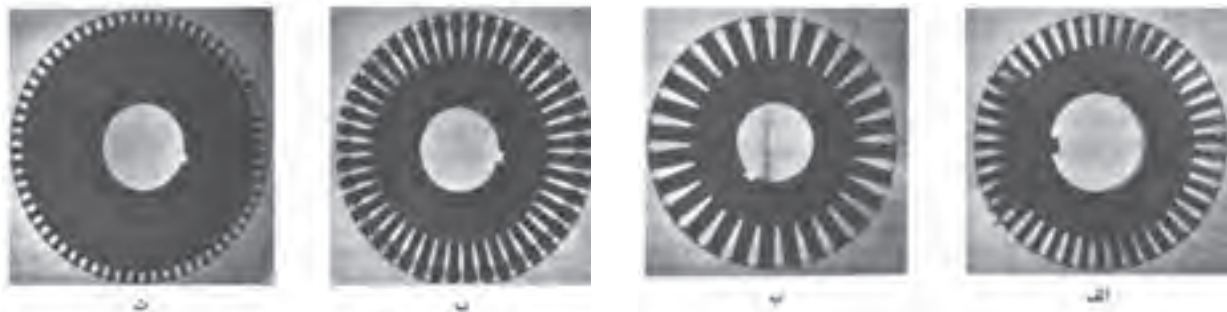
شکل ۳۶- تعیین نقطه کار روی دو نمونه مشخصه گشتاور - سرعت بار ثابت

۱۰-۳- رتور قفسی موتورهای القایی

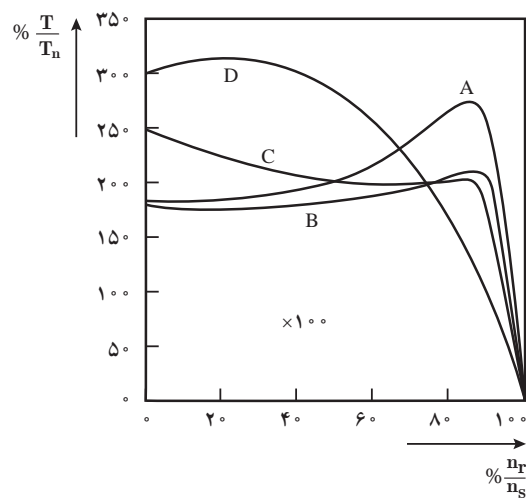
رتور موتورهای القایی رتور قفسی در ۴ نوع (۴ کلاس) A، B، C و D ساخته می شوند و تصویر شیارهای آنها در شکل ۳۷ نشان داده شده است.

تفاوت شکل شیار هسته رتور موتورهای القایی باعث می شود تا این رتورها از نظر عملکرد و تولید گشتاورهای راه اندازی T_s و گشتاور ماکزیمم T_m با یکدیگر تفاوت هایی داشته باشند. در شکل (۳۸) مشخصه گشتاور - دور هر یک از رتورها نشان داده شده است.

در اینجا و به اختصار وجوه تفاوت این چهار نوع رتور آمده تا با مقایسه بتوان به دلایل اختلاف مشخصه آنها پی برد.



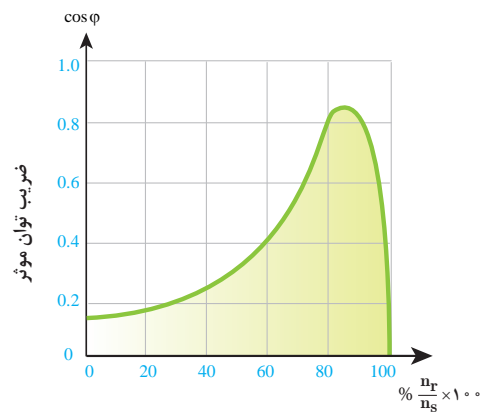
شکل ۳۷- شکل نمونه ورق‌های مغناطیسی رتور موتورهای قفس سنجابی



شکل ۳۸- مشخصه گشتاور- دور چهار نمونه مشابه رتور قفسی استاندارد

۳-۱۱- 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. (شکل ۳۹)



شکل ۳۹- مشخصه ضریب قدرت - 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) و کاهش ضریب توان مؤثر می‌شود و با دریافت توان غیرمفید (راکتیو) بیشتر موتور از شبکه برق می‌شود.

- ۱- 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
- ۲- در شرایط راه‌اندازی لغزش موتور کدام است؟
الف) $s = 1$ (ب) $s = 0$ (ج) $0 < s < 1$ (د) $s > 1$
- ۳- در کدام یک از حالات زیر مقدار لغزش بزرگ‌تر از واحد است؟
الف) بی‌باری (ب) موتوری (ج) ترمزی (د) راه‌اندازی
- ۴- لغزش را با ذکر رابطه تعریف کنید.
- ۵- موتورهای آسنکرون و سنکرون را تعریف کنید.
- ۶- در مورد نحوه به‌دست آوردن نقطه کار از روی مشخصه گشتاور - دور توضیح دهید.
- ۷- مفاهیم T_s , T_m , T را تعریف کنید.
- ۸- موتورهای رتور قفسی نوع C دارای بیشترین گشتاور راه‌اندازی هستند.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۹- با افزایش سرعت رتور مقدار ضریب توان مؤثر موتور به صورت خطی افزایش می‌یابد.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۱۰- روی مشخصه گشتاور- دور موتور القایی نقطه کار موتور را بین T_s و T_m باید انتخاب کرد.
☐ صحیح ☐ غلط

۱۲-۳- 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^۱» 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^۲» گویند و آن را با ACC Time نشان می‌دهند.

۱- Start

۲- 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 I_s 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 :

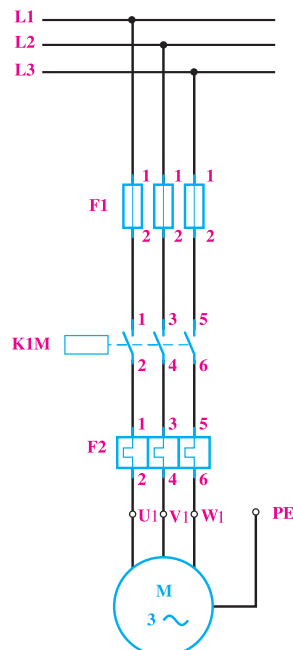
- آسیب رساندن به سیم پیچ‌های موتور
- آسیب رساندن به یاتاقان‌های موتور
- عمل کرد تجهیزات حفاظتی و قطع مدار الکتریکی و عدم راه‌اندازی موتور
- آسیب رسیدن به کابل و کلید موتور
- ایجاد افت ولتاژ شدید در منبع تغذیه

برای راه‌اندازی موتورهای القایی روش‌های متداول زیر استفاده می‌شود :

- ۱- راه‌اندازی مستقیم
- ۲- راه‌اندازی با کنترل ولتاژ
- ۳- راه‌اندازی با کنترل هم‌زمان ولتاژ و فرکانس

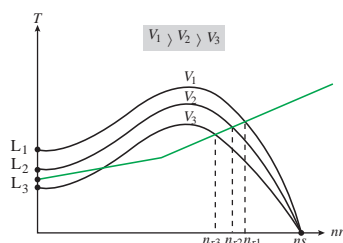
۱- راه‌اندازی مستقیم: در راه‌اندازی مستقیم، موتور الکتریکی القایی با استفاده از کلید قطع و وصل به شبکه الکتریکی با ولتاژ نامی اتصال می‌یابد. در این روش با وصل کلید موتور راه‌اندازی می‌شود اما جریان راه‌اندازی آن محدود نمی‌شود. روش راه‌اندازی مستقیم برای موتورهایی با توان نامی کمتر از یک کیلووات استفاده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

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



شکل ۴۰- راه‌اندازی مستقیم موتور القایی با کنتاکتور

۲- راه اندازی با کنترل ولتاژ : مقدار جریان راه اندازی به توان الکتریکی موتور القایی بستگی دارد. برای کاهش جریان راه اندازی لازم است ولتاژ کلاف های سیم پیچی 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 راه اندازی ضمن کاهش جریان راه اندازی باعث کاهش گشتاور راه اندازی موتور نیز خواهد شد. شکل (۴۱)



شکل ۴۱

با توجه به (شکل ۴۱) به ازای کدام ولتاژ، موتور راه اندازی نمی شود؟ چرا ؟

فعالیت



کاهش گشتاور و راه اندازی از معایب روش راه اندازی با کنترل ولتاژ است. لذا این روش برای راه اندازی موتورهایی که بدون بار راه اندازی می شوند به کار می رود.

کنترل ولتاژ موتورهای القایی در زمان راه اندازی با روش های زیر انجام می شود :

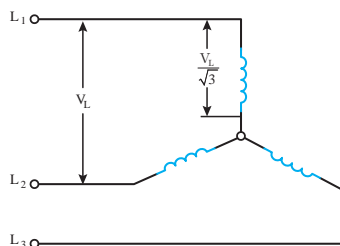
الف) راه اندازی ستاره مثلث

ب) راه اندازی ترانسفورماتوری

پ) راه اندازی نرم

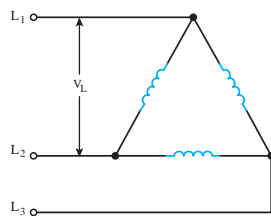
الف) راه اندازی ستاره مثلث

در راه اندازی ستاره مثلث با کاهش ولتاژ کلاف های سیم پیچی استاتور، جریان و گشتاور راه اندازی موتور کاهش می یابد. در راه اندازی ستاره مثلث مدار الکتریکی کلاف های سیم پیچی استاتور در زمان راه اندازی به اتصال ستاره در می آید. در حالت ستاره ولتاژ کلاف های سیم پیچی استاتور $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ برابر است. (شکل ۴۲)



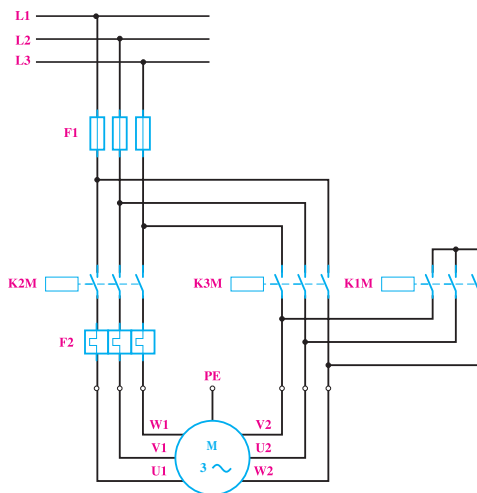
شکل ۴۲- مدار حالت راه اندازی ستاره

با کاهش ولتاژ کلاف های سیم پیچی استاتور به $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ ، گشتاور جریان راه اندازی حالت ستاره به $\frac{1}{3}$ گشتاور و جریان راه اندازی موتور در حالت مثلث می رسد. پس از راه اندازی موتور و رسیدن سرعت به ۷۵٪ سرعت



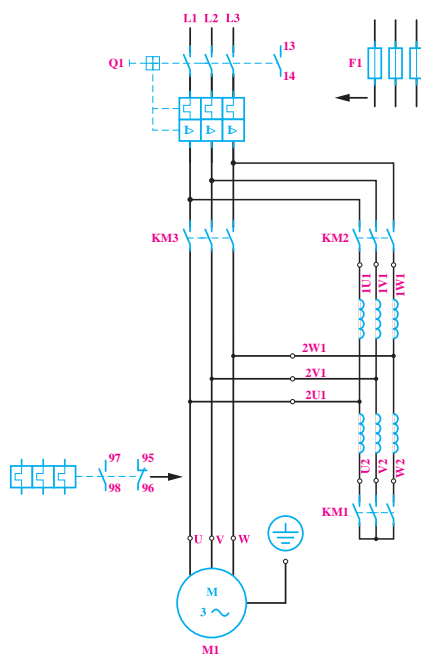
شکل ۴۳- حالت مثلث

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 ۴۴- مدار کنتاکتوری ستاره مثلث

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



شکل ۴۵- مدار راه‌اندازی ترانسفورماتوری

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 به طور 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.

در مدار الکتریکی (شکل ۴۵) در زمان راه‌اندازی کنتاکتورهای KM_1 و KM_2 وصل و KM_3 قطع می‌باشد تا ولتاژ موتور از طریق اتوترانسفورماتور تامین شود. پس از راه‌اندازی کنتاکتور KM_3 وصل و کنتاکتورهای KM_1 و KM_2 قطع می‌شوند تا موتور مستقیماً به شبکه الکتریکی متصل شود.

پ - راه‌اندازی نرم

در راه‌اندازی نرم ولتاژ موثر موتور 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 starter با تغییر ولتاژ، جریان راه‌اندازی و گشتاور موتور الکتریکی القایی را کنترل می‌کند از این رو آن را $RVSS$ نیز می‌نامند. $RVSS$ می‌تواند مقدار موثر ولتاژ را از حوالی صفر تا مقدار نامی افزایش دهد و جریان راه‌اندازی را کنترل نماید (شکل ۴۶)



شکل ۴۶

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

۳- 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 به طوری 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 $VVVF$ نیز می‌نامند.

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.

۱۳-۳- 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 :

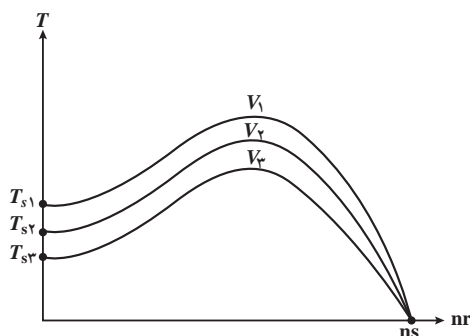
- تغییر همزمان ولتاژ و فرکانس
- تغییر قطب

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

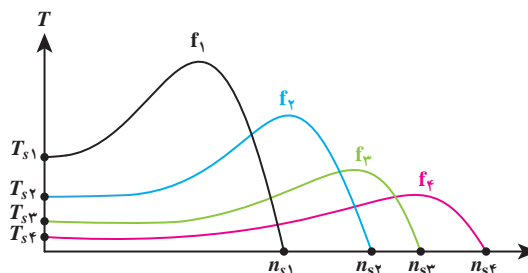
سرعت رتور موتورهای القایی تابع سرعت میدان دوار است. سرعت میدان دوار با توجه به رابطه $n_s = \frac{120f}{p}$ با فرکانس نسبت مستقیم دارد. با تغییر فرکانس سرعت میدان دوار تغییر می‌کند علاوه بر این با توجه به رابطه $B \propto \frac{V}{f}$ چگالی میدان دوار نیز دچار تغییر می‌شود. تغییر چگالی میدان دوار بر 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.

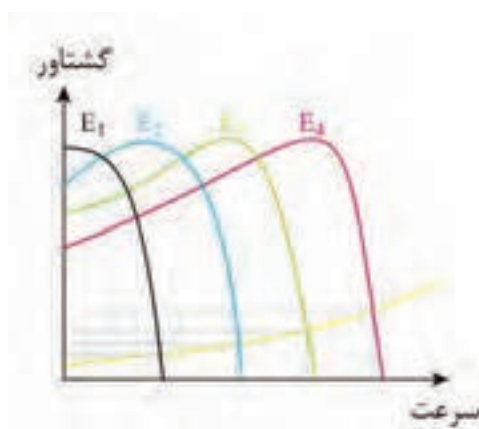
سرعت رتور موتورهای القایی به ولتاژ وابسته است. با تغییر ولتاژ با توجه به رابطه $B \propto \frac{V}{f}$ چگالی میدان دوار تغییر می‌کند و علاوه بر آن گشتاور موتور نیز دچار تغییر می‌شود. با تغییر گشتاور نقطه کار موتور جابه‌جا می‌شود و سرعت تغییر می‌یابد. (شکل ۴۹)



شکل ۴۹



شکل ۴۸



شکل ۵۰

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

تغییر ولتاژ و تغییر فرکانس به منظور کنترل سرعت موتورهای القایی به دلیل تأثیر بر گشتاور موتور نامطلوب می باشد اما می توان 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).

۲- کنترل سرعت به روش تغییر قطب:

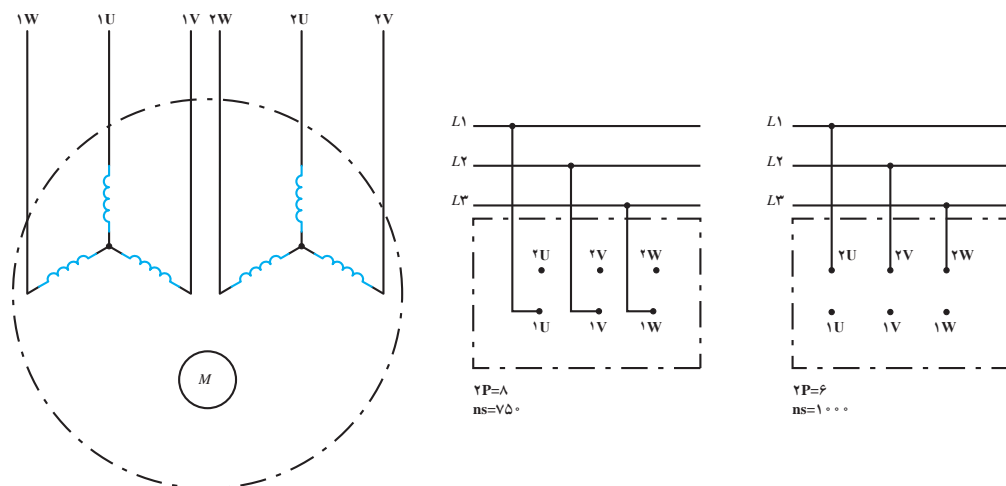
یکی دیگر از راه های تغییر سرعت موتور، تغییر تعداد قطب های سیم پیچی موتور القایی است. با توجه به رابطه $n_s = \frac{120f}{P}$ در صورت افزایش تعداد قطب P سرعت موتور کاهش می یابد. برای تغییر تعداد قطب موتور القایی از دو روش استفاده می شود:

الف) سیم پیچی جداگانه (مجزا)

ب) سیم پیچی دالاندر

الف) سیم پیچی جداگانه: اگر در استاتور به جای یک گروه سیم پیچی از دو یا چند گروه سیم پیچی مستقل از هم با تعداد قطب های مختلف استفاده شود، به طوری که هیچ ارتباطی الکتریکی بین آنها نباشد سیم پیچی این موتور القایی را سیم پیچ جداگانه یا مجزا گویند. با اتصال هریک از سیم پیچی ها به شبکه برق می توان سرعت های متفاوتی را به دست آورد. (شکل ۵۱).

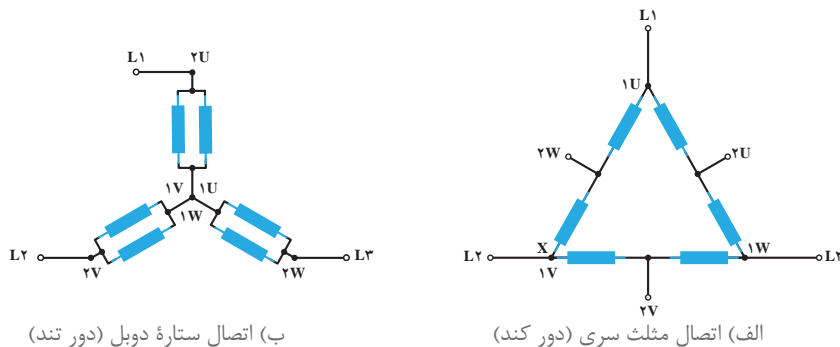
از معایب سیم پیچی جداگانه مصرف زیاد سیم و راندمان کم می باشد.



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 $\frac{1}{2}$ است.

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



شکل ۵۲- سیم‌پیچی دالاندر

۳-۱۴- ترمز موتورهای القایی

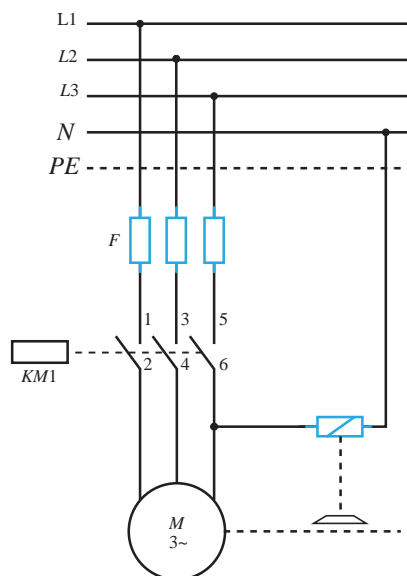
عمل توقف سریع رتور را در موتورهای الکتریکی «ترمز» گویند.

هرگاه رتور موتور الکتریکی در حال گردش باشد، به دلیل 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 به ایست 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. 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 عمر کاری موتور افزایش می‌یابد. برای ترمز موتورهای القایی از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

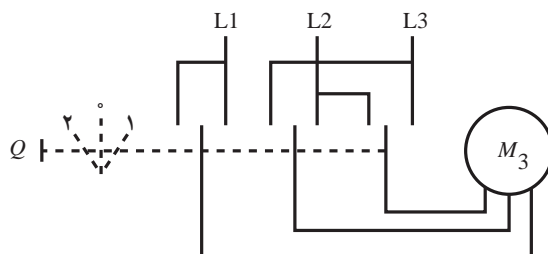
۱- ترمز الکترومکانیکی: تصویر ساده‌ای از تجهیزات و نحوه عملکرد این نوع ترمز را در شکل ۵۳ نشان داده شده است. در این روش زمانی که کلید موتور وصل می‌شود جریان الکتریکی به سیم‌پیچی استاتور موتور و رله مربوط به سیستم ترمز می‌رسد. در این حالت سیم‌پیچ رله مغناطیس شده و در نتیجه محور صفحه دیسکی ترمز را به طرف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

شکل ۵۳- اتصالات سیم‌پیچی موتور دالاندر

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 بیشتر است.

۲- ترمز جریان مخالف: در این روش با استفاده از کلیدی که در شکل (۵۴) مشاهده می‌کنید عمل ترمز انجام می‌شود. وقتی کلید Q در حالت (۱) قرار می‌گیرد سه فاز L_1 و L_2 و L_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 کلید در حالت (۲)، کلید به صورت خودکار عمل کرده و به حالت (۰) کلید باز می‌گردد و برق موتور قطع می‌شود.

در واقع با تغییر حالت 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.

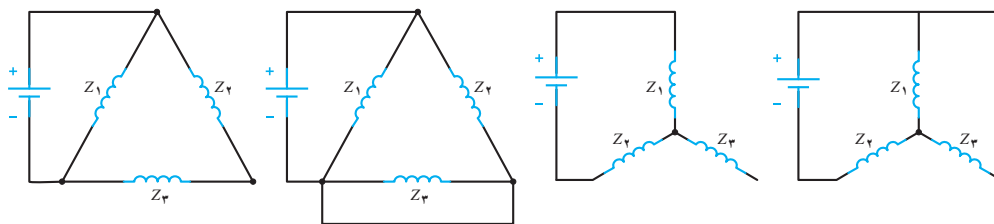


شکل ۵۴- مدار ترمز الکترومکانیکی



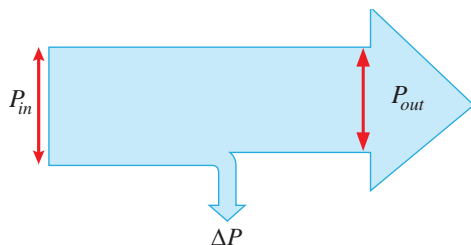
وضعیت برگشت‌پذیری کلید با علامت فلش کوچک روی حالت (۲) کلید مشخص شده است.

۳- ترمز با جریان مستقیم (ترمز دینامیکی): اساس چرخش موتورهای سه فاز آسنکرون 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، جاری شدن جریان در مفتول‌های رتور و وارد شدن نیرو به رتور صورت نمی‌گیرد. با اتصال جریان مستقیم به سیم‌پیچی‌های موتور آنها به صورت 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 ۵۵- مدار ترمز جریان مخالف

۳-۱۵- تلفات و راندمان موتورهای الکتریکی



شکل ۵۶- ترمز جریان مستقیم

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

در موتورهای الکتریکی، مقداری از انرژی الکتریکی که در واحد زمان به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود را تلفات موتور می‌گویند و آن 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 بر حسب V

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (۲)$$

I_L جریان خط بر حسب A

$\cos \phi$ ضریب توان موتور

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.

$$P_{out} = T_{out} \omega_r \quad (3)$$

T_{out} گشتاور نامی یا مفید بر حسب N.m
 ω_r سرعت زاویه‌ای رتور بر حسب $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
 P_{out} توان نامی رتور بر حسب W

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

$$\omega = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (4)$$

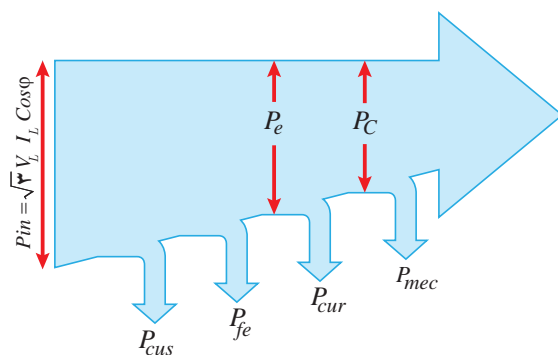
با جای گذاری رابطه (۴) در رابطه (۳) خواهیم داشت.

$$P_{out} = T_{out} \times \frac{2\pi n_r}{60} \quad (5)$$

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) می‌توان محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (6)$$

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



شکل ۵۷- نمودار توازن توان موتورهای القایی سه فاز

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

$$\Delta P_s = P_{cus} + P_{Fes} \quad (۸)$$

تلفات آهنی استاتور به دلیل حضور جریان‌های گردابی در هسته و تلفات هیستریزاس ایجاد می‌شود. تلفات رتور (ΔP_r) از دو قسمت تلفات اهمی سیم‌پیچی رتور (تلفات مسی P_{cur}) و تلفات آهنی رتور (P_{Fer}) تشکیل شده است و آن را به صورت 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 به کار 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 صرف نظر می‌شود. بخش دیگری از تلفات موتورهای القایی تلفات مکانیکی است که به علت وجود اصطکاک یا تافان‌ها 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 به صورت رابطه (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 می‌شود توان الکترومغناطیسی P_e گویند.

مقدار توان الکترومغناطیسی P_e را می‌توان به طور مستقیم از رابطه (۱۱) یا (۱۲) محاسبه کرد. گشتاور الکترومغناطیس بر حسب N.m

$$P_e = T_e \omega_s \quad (۱۱) \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{سرعت زاویه‌ای سنکرون موتور القایی بر حسب}$$

$$P_e = T_e \times \frac{2\pi n_s}{60} \quad (۱۲) \quad W \quad \text{توان الکترومغناطیس بر حسب}$$

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 حاصل ضرب لغزش در توان الکترومغناطیسی مطابق رابطه (۱۵) می‌توان

استفاده کرد.

$$P_{Cur} = S \cdot P_e \quad (15)$$

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.

$$P_{Cus} + P_{Cur} = \text{تلفات متغیر} \quad (16)$$

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.

$$P_{Fes} + P_{mec} = \text{تلفات ثابت} \quad (17)$$

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

$$\Delta P = \text{تلفات متغیر} + \text{تلفات ثابت} \\ \Delta P = (P_{Fes} + P_{mec}) + (P_{Cus} + P_{Cur}) \quad (18)$$

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
(پ) قدرت و گشتاور مفید اگر ضریب بهره موتور ۸۰٪ باشد.

حل:

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ R.P.M} \quad (\text{الف})$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05 \quad (\text{ب})$$

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 380 \times 16 \times 0.85 = 8950 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow P_{out} = \eta P_{in}$$

$$P_{out} = 80\% \times 8950 = 7160$$

(پ)

$$T_{out} = \frac{60 P_{out}}{2\pi n_r} = \frac{60 \times 7160}{2\pi \times 1425} = 48 \text{ N.m}$$

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 به صورت زیر باشد مطلوب است:

$$P_{Fe} = 1750 \text{ W} \quad P_{mec} = 620 \text{ W} \quad \text{الف) قدرت خروجی و قدرت مکانیکی ناخالص}$$

$$P_{cus} = 1900 \text{ W} \quad P_{cur} = 810 \text{ W} \quad \text{ب) ضریب بهره}$$

حل: به کمک نمودار توازن توان داریم

$$P_{out} = P_1 - \Delta P$$

الف)

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \times 660 \times 52 \times 0.84 = 49933 \text{ W}$$

$$\Delta p = P_{Fe} + P_{mec} + P_{cus} + P_{cur} = 1750 + 620 + 1900 + 810$$

$$\Delta p = 5080 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{in} - \Delta p = 49933 - 5080 = 44853 \text{ W}$$

از روی نمودار توازن می‌توان نوشت:

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

$$P_c = 44853 + 620 = 45473 \text{ W}$$

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{44853}{49933} \times 100 = 89.8\%$$

مثال



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

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

حل:

$$n_s = \frac{120 f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ R.P.M}$$

الف)

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow n_r = n_s(1 - S) \Rightarrow n_r = 1800(1 - 0.22) = 1396 \text{ R.P.M}$$

(ب) هر اسب بخار معادل ۷۳۶ وات فرض می شود:

$$P_{out} = 25 \times 736 = 18400 \text{ W}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{18400}{0.835} = 22036 \text{ W}$$

$$I_L = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_L \cos \phi} = \frac{22036}{\sqrt{3} \times 460 \times 0.86} = 32.16 \text{ A}$$

(ج) ابتدا کل تلفات موتور در نقطه کار نامی را به دست می آوریم:

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

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

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

$$I_1 = I_L = 32.16 \text{ A}$$

$$P_{cus} = 3 R_1 I_1^2 = 3 \times 0.44 \times 32.16^2 = 1365 \text{ W}$$

$$P_{cur} = \Delta p_{\text{متغیر}} - P_{cus}$$

$$P_{cur} = 1836 - 1365 = 471 \text{ W}$$

پرسش



۱- رابطه بین جریان راه اندازی و جریان نامی موتورهای القایی کدام است؟

$$I_s = 2 I_n \text{ (الف)} \quad I_s = \sqrt{3} I_n \text{ (ب)} \quad I_s = I_n / \sqrt{3} \text{ (ج)} \quad I_s = 6 I_n \text{ (د)}$$

۲- کدام یک از روابط زیر صحیح است؟

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

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

۳- کدام مورد از جمله خصوصیات روش راه اندازی 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

۴- با رسم نقشه کلید مدار ترمز جریان مخالف، طرز کار آن را به اختصار توضیح دهید.

۵- شکل های مختلف اتصال جریان DC به سیم پیچ های استاتور موتور آسنکرون در روش ترمز جریان مستقیم را رسم کنید.

- ۶- نمودار توازن توان در موتورهای القایی را رسم کرده و برای محاسبه توان الکترومغناطیسی و توان مکانیکی ناخالص دو رابطه بنویسید.
- ۷- در روش کنترل سرعت موتور با تغییر فرکانس، به ازای افزایش فرکانس، گشتاور موتور افزایش می‌یابد
☐ صحیح ☐ غلط
- ۸- نسبت سرعت تند به سرعت کند در موتورهای دو سرعته دالاندر برابر ۲ است.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۹- تلفات مکانیکی در روش ترمز جریان مستقیم از سایر روش‌ها بیشتر است.
☐ صحیح ☐ غلط
- ۱۰- در روش کنترل سرعت (V) با افزایش ولتاژ مقدار T_s کاهش می‌یابد.
☐ صحیح ☐ غلط

پرسش‌های پایانی پودمان ۳

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

$$f = 50 \text{ Hz}$$

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

- ۲- موتور آسنکرون سه فاز به قدرت ۴kw و ضریب قدرت ۰/۷۵ را به شبکه ۸۳۰ ولتی متصل کرده‌ایم. در بار نامی جریانی برابر ۱۲A از شبکه دریافت می‌کند تعیین کنید.
 الف) تلفات کلی

ب) راندمان موتور برحسب درصد

- ۳- روی پلاک موتور سه فاز مشخصات زیر نوشته شده است مطلوب است ضریب قدرت موتور را به دست آورید.

$$V=400 [V] \quad I=25 [A] \quad P=8 \quad \eta=85\%$$

- ۴- یک موتور آسنکرون که با ۹۵٪ سرعت سنکرون می‌گردد قدرتی برابر ۶۰ kw از شبکه دریافت

- می کند. هرگاه ضریب بهره موتور ۸۰٪ باشد حساب کنید.
- تلفات مسی رتور در صورتی که تلفات مکانیکی ۲kw باشد.
- ۵- موتور القایی سه فازه آسنکرون که قدرت مصرفی آن ۵۵۶۷۲w و ضریب بهره آن ۸۰٪ است دارای سرعت سنکرون ۵۰۰ RPM و لغزش در بار کامل ۸٪ می باشد. 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)
- ۶- یک موتور آسنکرون سه فاز به قدرت ۴hp که با ولتاژ ۳۸۰ ولت در ضریب قدرت ۰/۸ کار می کند را در نظر بگیرید. اگر ضریب بهره موتور ۸۰٪ باشد مطلوب است:
- الف) جریان که از شبکه دریافت می کند
- ب) جریان هر فاز موتور (در صورتی که کلاف های موتور مثلث باشد)
- ۷- 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 ۷۱۰ RPM 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)
- ۸- یک موتور آسنکرون سه فاز به قدرت مکانیکی ۳۰hp و ولتاژ ۴۰۰ ولت در فرکانس ۵۰Hz با سرعت ۱۴۴۰ RPM می چرخد. اگر ضریب قدرت موتور ۰/۸۵ باشد مطلوب است:
- الف) لغزش در صورتی که موتور
- ب) قدرت الکترومغناطیسی
- ج) تلفات مسی رتور
- د) قدرت مصرفی (دریافتی) موتور اگر تلفات آهنی و مسی استاتور به ترتیب ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ باشد
- ه) گشتاورهای T_e ، T_r دربار نامی (تلفات مکانیکی ۵۰۰w در نظر گرفته شود)
- و) جریان خط هر فاز موتور در صورتی که اتصال کلاف ها مثلث باشد.
- ۹- 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 می کند. مطلوب است:
- الف) مجموع تلفات ماشین
- ب) درصد ضریب بهره
- ۱۰- روی پلاک یک الکتروموتور سه فاز این اطلاعات درج شده است.
- $$\eta=85\% \quad I=16A \quad P=10hp \quad V=380V$$
- مجموع تلفات و ضریب قدرت موتور را در نقطه کار نامی تعیین کنید.
- ۱۱- 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 به دست آورید.

۱۲- 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

۱۳- یک الکتروموتور القایی سه فاز با اتصال مثلث استاتور به شبکه سه فاز ۲۰۸ ولت و ۶۰ هرتز متصل است و در بار نامی با 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 اهمی هر فاز استاتور ۰/۴ اهم است. اگر تلفات مسی استاتور و رتور برابر باشند مطلوب است:

الف) جریان دریافتی از شبکه

ب) قدرت الکترومغناطیسی

پ) قدرت مفید

ت) گشتاور الکترومغناطیسی

ث) گشتاور مفید

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

هدف‌گذاری و سنجش:

برای کسب شایستگی در این پودمان اگر هنرجو:

- از کل سؤالات به یک تا پنج سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد شایستگی پایین‌تر از حد انتظار خواهد بود.
- از کل سؤالات به شش سؤال به‌طور کامل پاسخ دهد شایستگی در حد انتظار خواهد بود.
- 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 ۱- (۲ نمره)

سؤال ۲- (۲ نمره)

سؤال ۳- (۲ نمره)

سؤال ۴- (۲ نمره)

سؤال ۵- (۲ نمره)

سؤال ۶- (۲ نمره)

سؤال ۷- (۲ نمره)

سؤال ۸- (۲ نمره)

سؤال ۹- (۲ نمره)

سؤال ۱۰- (۲ نمره)