۵ــ۳ــ عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

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

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

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

سرعت میدان دوار متناسب با فرکانس است بنابراین می‌نویسیم :

$$n_s \propto f$$

از آنجا که جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها در یک دوره تناوب فقط یکبار تغییر جهت می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که قطب‌های N و S میدان دوار در این مدت فقط یکبار عوض می‌شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی که قطب‌ها (۳۶۰ درجه) محیط استاتور را اشغال کرده‌اند در یک دوره تناوب، میدان دوار یک دور محیط استاتور را طی می‌کند در حالی که در یک ماشین چهار قطبی که هر دو قطب آن (۱۸۰ درجه) محیط استاتور را اشغال کرده است در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها نیم دور (۱۸۰ درجه) محیط استاتور را طی می‌کند. پس می‌توان نتیجه گرفت، افزایش تعداد قطب‌های استاتور باعث کم‌شدن سرعت میدان دوار می‌شود.

بنابراین عامل دیگر تعیین کننده سرعت میدان دوار، تعداد قطب‌های سیم بندی ماشین القایی می‌باشد.

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

با توجه به جدول (۳) سرعت میدان دوار با رابطه $\frac{۲}{P}$ متناسب است.

$$n_s \propto \frac{۲}{P}$$

p تعداد قطب‌ها

n_s سرعت میدان دوار

جدول۳ــ اثر افزایش تعداد قطب ماشین القایی بر سرعت رتور

چرخش میدان در یک دوره تناوب	محیط اشغال شده توسط یک جفت قطب	تعداد قطب‌ها
$\frac{۲}{۲}$ = یک دور کامل	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۲}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۱} = ۳۶۰^\circ$	۲
$\frac{۲}{۴}$ = نیم دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۴}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۲} = ۱۸۰^\circ$	۴
$\frac{۲}{۶}$ = ثلث دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۶}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۳} = ۱۸۰^\circ$	۶
...	...	...
$\frac{۲}{P}$ دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{P}{۲}}$	p

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

$$n_s = \frac{۲ \times f}{P} \qquad (۳_۱)$$

(n_s بر حسب دور در ثانیه)

سرعت میدان دوار در رابطه (۳ــ۱) بر حسب دور بر ثانیه می‌باشد ولی از آنجا که سرعت ماشین‌های دوار را معمولاً بر حسب دور بر دقیقه[۱] (RPM) نمایش می‌دهند، لذا رابطه سرعت میدان دوار به صورت رابطه (۳ــ۲) خواهد شد.

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times f}{P} \qquad (۳_۲)$$

در رابطه (۳ــ۲) :

n_s سرعت میدان دوار بر حسب RPM

f فرکانس شبکه برق بر حسب Hz

P تعداد قطب‌های سیم‌بندی ماشین القایی

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

مثال : سرعت میدان دوار یک ماشین ۲ قطبی در شبکه برق ایران با فرکانس (۵۰Hz) چقدر است؟

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

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

خود را بیازمایید

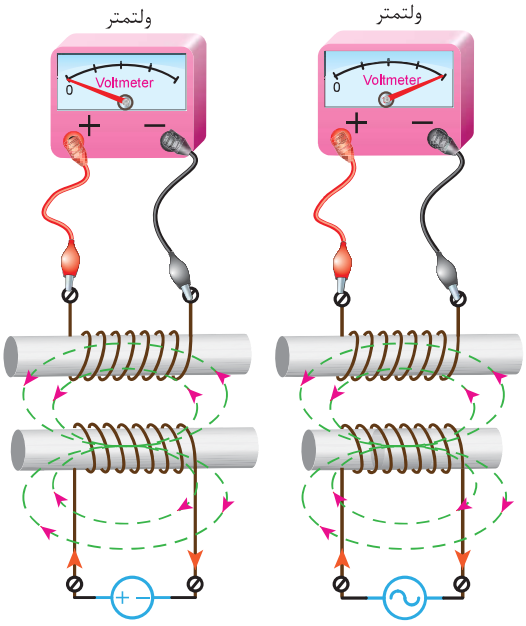
۱ــ در ماشین القایی هر چقدر دوره تناوب بزرگ‌تر باشد سرعت میدان دوار ..... است.

۲) چرا در ماشین‌های القایی هر چقدر تعداد قطب‌ها بیشتر باشد سرعت میدان دوار کمتر می‌شود؟

۳) سرعت میدان دوار ماشین القایی ۱۰۰۰ RPM و فرکانس شبکه ۵۰ Hz می‌باشد. تعداد قطب‌های ماشین را به‌دست آورید.

۶ــ۳ــ نحوه ایجاد چرخش رتور در موتورهای القایی

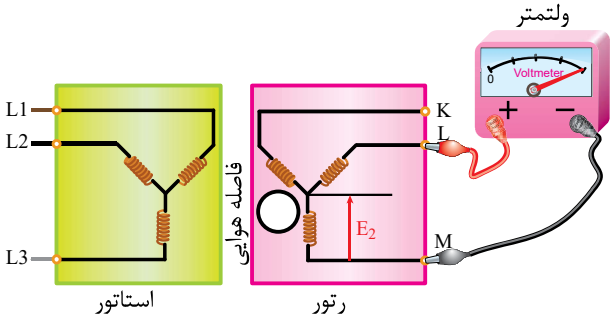
تغییرات فوران عامل ایجاد نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ است. از آنجاکه جریان DC فوران با مقدار ثابت تولید می‌کند لذا سیم‌پیچ حامل جریان DC در سیم‌پیچ مجاور خود نیروی محرکه القا نمی‌کند.



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

۱ــ Revolution Per Minute

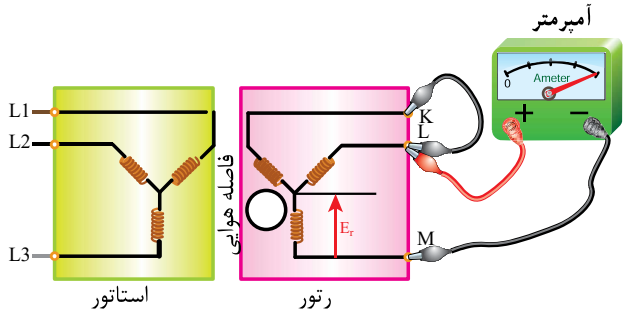
با اتصال سیم‌پیچ استاتور ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده به منبع ولتاژ متناوب و ایجاد میدان دوار در استاتور طبق قانون القای فارادی، نیروی محرکه‌ای متناسب با آهنگ تغییرات فوران در سیم‌پیچ‌های رتور القاء خواهد شد. اما، با باز بودن مدار خروجی M,L,K رتور شکل(۱۸)، رتور حرکت نمی‌کند و با قرار دادن یک ولت‌متر مطابق شکل (۱۸) در دو سر سیم‌پیچی رتور می‌توان مقدار نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی رتور را اندازه گرفت. از آنجا که رتور در این حالت ساکن است و چرخش ندارد، این نیروی محرکه القایی را ولتاژ حالت سکون رتور می‌نامند و آن را با E_2 نمایش می‌دهند.



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

در واقع با ایجاد میدان دوار استاتور، نیروی محرکه E_2 در سیم‌پیچی رتور القاء می‌شود ولی از آنجا که جریانی از مدار رتور عبور نمی‌کند در نتیجه نیروی لورنس هم به سیم‌پیچی رتور وارد نمی‌شود.

در صورتی که بخواهیم به رتور نیروی لورنس وارد شود باید در سیم‌پیچی رتور جریان جاری شود. بنابراین اگر حلقه‌های خروجی مدار رتور مطابق شکل (۱۹) به یکدیگر اتصال داده شوند و آمپرمتر در مسیر M و L قرار گیرد، مدار رتور بسته می‌شود و در سیم‌پیچی رتور جریان جاری می‌شود و نیروی لورنس پدید می‌آید لذا رتور حول محورش می‌گردد و تا زمانی که سیم‌پیچ استاتور به برق اتصال داشته باشد رتور به حرکت خود ادامه خواهد داد.



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

ولتاژ القاء شده در مدار بستهٔ رتور باعث جاری شدن جریان در سیم‌پیچ‌های آن می‌شود.

آمپرمتر شکل (۱۹) جریان یکی از فازهای سیم‌پیچ رتور را نشان می دهد. این جریان را جریان رتور می‌نامند و آن را با I_r نمایش می‌دهند.

خود را بیازمایید

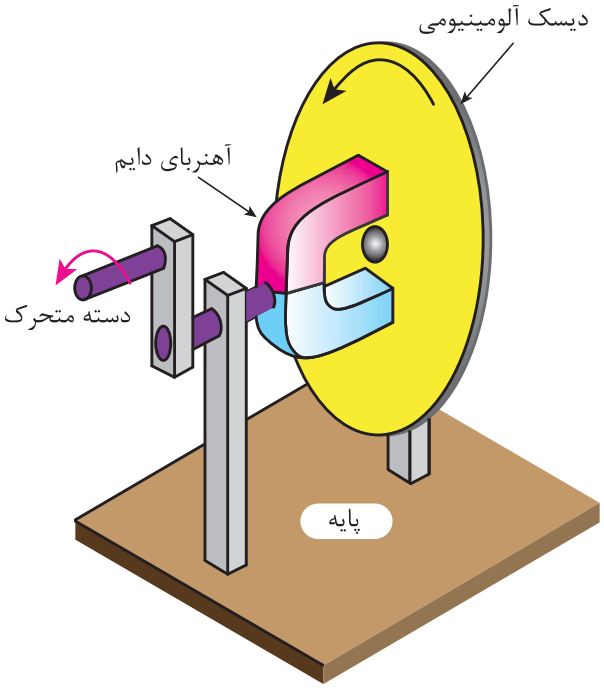
۱ــ چرا برای به چرخش در آمدن رتور ماشین القایی علاوه بر میدان دوار، سیم پیچی رتور نیز باید حامل جریان باشد؟

۲ــ منظور از ولتاژ حالت سکون در ماشین القایی با رتور سیم پیچی شده چیست؟

۳ــ هرچقدر اختلاف سرعت رتور ومیدان دوار کمتر باشد ولتاژ القایی در رتور ..... است.

۷ــ۳ــ موتورهای القایی رتور قفس سنجابی

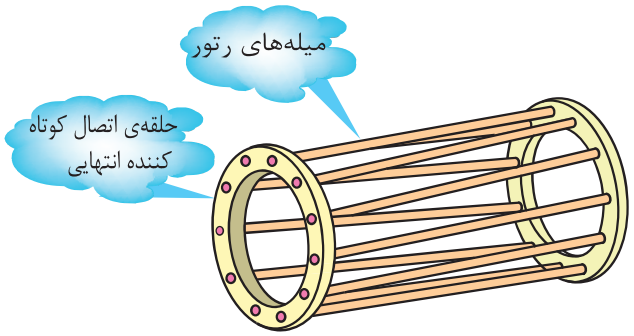
شکل (۲۰) چگونگی چرخش رتور قفسی در موتورهای القایی را به سادگی نمایش داده است. شما می‌توانید با تهیه وسایل نشان داده شده، این آزمایش را انجام دهید. در این آزمایش با چرخاندن دسته متحرک، آهنربای دائم می‌چرخد و در پی آن دیسک آلومینیومی نیز که اندکی از آهنربا فاصله دارد به حرکت در می‌آید.



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

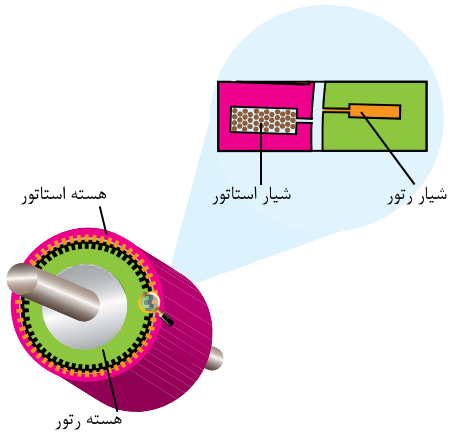
آیا با توجه به چرخش میدان و تغییر میدان مغناطیسی در دیسک آلومینیومی مطابق آنچه در شکل (۲۰) می‌بینید، می‌توان نتیجه گرفت که عامل چرخش دیسک القای نیروی محرکه و ایجاد جریان القایی در آن است؟

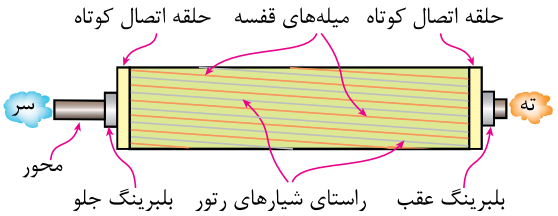
در شکل (۲۱) ابتدا و انتهای مفتول‌ها به یکدیگر متصل و در نتیجه مدار اتصال کوتاه شده‌ای در هادی‌های رتور ایجاد شده است و از آنجا که شکل ایجاد شده شبیه یک قفس است، به همین دلیل به رتور شکل (۲۱) رتور قفسی می‌گویند. برای ساختن این نوع رتور ابتدا ورقه‌های هسته رتور را کنار یکدیگر قرار می دهند تا هسته یکپارچه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



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

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





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

از آنجا که شکل (۲۱) شبیه قفس سنجاب به‌نظر می‌رسد، ماشین‌های القایی که ساختمان رتور آنها این‌گونه است را قفس سنجابی نیز می گویند.

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

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

خود را بیازمایید

ــ وظیفه دو حلقه ای که در طرفین میله‌های رتور قفسی به مفتول‌ها متصل می شوند، چیست؟

تحقیق کنید

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

۸ــ۳ــ لغزش در ماشین‌های القایی

در ماشین القایی به اختلاف سرعت رتور (n_r) با سرعت میدان دوار (n_s) سرعت لغزش می گویند. و آن را با رابطه (۳ــ۳) نشان می دهند.

$$\Delta n = n_s - n_r \qquad (۳ــ۳)$$

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

$$S = \frac{\Delta n}{n_s} \qquad (۳ــ۴)$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \qquad (۳ــ۵)$$

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

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

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

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P} = \frac{۱۲۰\times۵۰}{۴} = ۱۵۰۰\text{RPM}$$

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

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

$$۰/۰۳ \times ۱۰۰ = ۳٪$$

با توجه به رابطه (۵ـ۳) می‌توان نوشت :

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

$$n_r = n_s(۱ - s) \qquad (۳ـ۶)$$

از رابطه (۶ـ۳) برای محاسبه سرعت رتور می‌توان استفاده نمود.

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

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P} = \frac{۱۲۰\times۵۰}{۴} = ۱۵۰۰\text{RPM}$$

$$S = ۱۰٪ = \frac{۱۰}{۱۰۰} = ۰/۱$$

$$n_r = n_s(۱ - S) = ۱۵۰۰(۱ - ۰/۱) = ۱۳۵۰\text{RPM}$$

۹ـ۳ـ رفتار ماشین‌های القایی در لغزش های مختلف

در بخش قبل گفته شد که لغزش ماشین القایی با مقادیر مختلف سرعت رتورتغییر می‌کند. در این قسمت مقادیر لغزش در سرعت‌های متفاوت رتور بررسی می‌گردد.

۱ـ۹ـ۳ـ لغزش در زمان راه‌اندازی : به محض اتصال سیم پیچ‌های استاتور ماشین القایی سه فاز به برق یعنی هنگام راه‌اندازی سرعت رتور صفر است ولی میدان دوار با سرعت سنکرون می‌چرخد. بنابراین خواهیم داشت :

$$n_r = ۰ \Rightarrow S = \frac{n_s - ۰}{n_s} = ۱$$

$$\Delta n = n_s$$

> **لغزش** ماشین در زمان **راه‌اندازی** برابر ۱ یا ۱۰۰٪ است.

۲ـ۹ـ۳ـ لغزش در سرعت سنکرون : اگر رتور بتواند با سرعتی برابر سرعت سنکرون و یا با همان سرعت میدان دوار گردش کند لغزش ماشین صفر می‌شود.

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

$$\Delta n = ۰$$

این‌کار زمانی امکان‌پذیر است که رتور ماشین القایی به کمک یک نیروی محرکه خارجی به اندازه سرعت میدان دوار در همان جهت چرخانده شود.

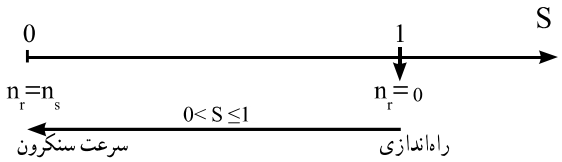
> **لغزش** ماشین القایی در **سرعت سنکرون** صفر است.

۳ـ۹ـ۳ـ لغزش موتور در حین کار : رتور موتور القایی پس از راه‌اندازی دور می‌گیرد و سرعت آن به تدریج افزایش می‌یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور با سرعت میدان دوار کم می‌شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است می‌تواند ادامه یابد. زیرا اگر سرعت رتور با میدان دوار برابر شود، میدان استاتور هم نمی‌تواند هادی‌های رتور را قطع نماید و در نتیجه نیرویی به رتور وارد نمی‌شود. با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یاتاقان‌ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی‌رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می‌شود. از آنجا که در موتورهای القایی بین

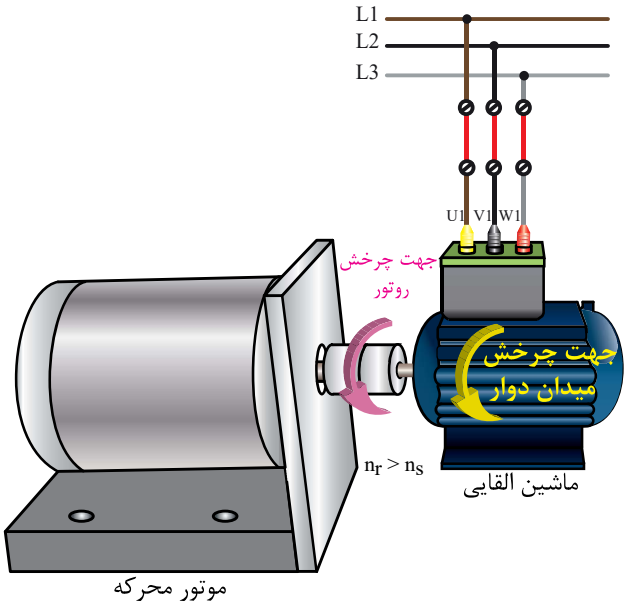
سرعت میدان دوار و سرعت رتور همواره اختلاف وجود دارد در نتیجه به آنها موتورهای آسنکرون[1] نیز گفته می‌شود.

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

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



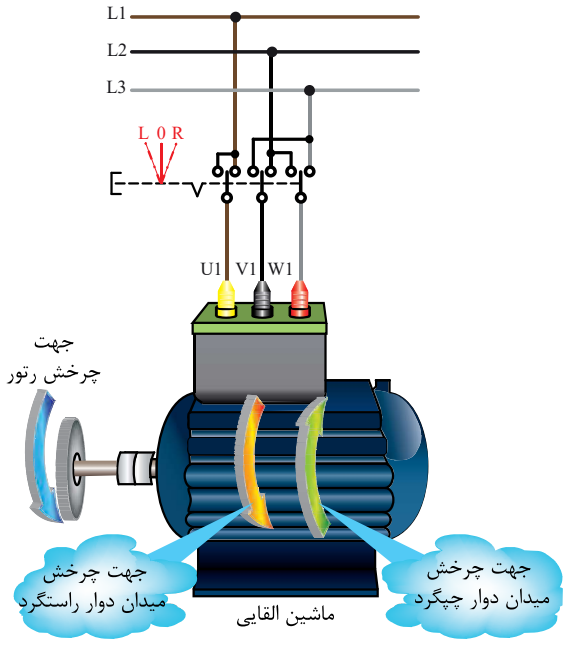
۴ــ۹ــ۳ــ لغزش منفی: اگر محور رتور ماشین القایی متصل شده به شبکه برق توسط وسیله‌ای با سرعتی بیش از سرعت سنکرون در جهت چرخش میدان دوار چرخانده شود، بنابراین طبق رابطه(۵ــ۳) چون $n_r > n_s$ می‌باشد مقدار لغزش منفی خواهد شد.



شکل ۲۳ــ نمایش حالت مولدی ماشین القایی

این وضعیت را در ماشین‌های القایی حالت ژنراتوری می‌نامند.

۵ــ۹ــ۳ــ لغزش‌های بزرگ‌تر از واحد (بیش از ۱۰۰٪): شکل (۲۴) یک ماشین القایی را نشان می‌دهد که توسط کلید راستگرد، چپگرد سه فاز به شبکه برق متصل است. اگر این ماشین به حالت موتوری در جهت راستگرد راه‌اندازی شود، رتور آن راستگرد می‌چرخد. حال چنانچه موتور به‌وسیلهٔ کلید ابتدا از شبکه قطع شود و بلافاصله به طور لحظه‌ای چپگرد راه‌اندازی گردد، میدان دوار آن چپگرد شده و سرعت رتور سریعاً به صفر می‌رسد. در نتیجه با توجه به جهت گردش رتور در حالت راستگرد پیش از ایستادن رتور، میدان دوار به حالت چپگرد در آمده و در نتیجه اختلاف سرعت رتور با سرعت سنکرون افزایش می‌یابد و لذا مقدار لغزش بیش از واحد خواهد شد. به این وضعیت عملکرد، حالت ترمزی ماشین القایی می‌گویند.



شکل ۲۴ ــ نمایش حالت ترمزی ماشین القایی

مطابق رابطه (۵ــ۳) داریم :

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

۱ــ غیر هم‌زمان