



۱

۲

۳

۴

۵

۱- مقدمه

۲- اصول کار مولدهای سنکرون

۳- ساختمان مولدهای سنکرون

۳-۱- استاتور

۳-۲- رتور

۴- انواع رتور ماشینهای سنکرون

۴-۱- رتور با قطب صاف یا استوانه ای

۴-۲- رتور با قطب برجسته

۵- کمیت‌های مولد سنکرون

۵-۱- فرکانس مولد سنکرون

۵-۲- ولتاژ مولد سنکرون

۶- موازی کردن مولدهای سنکرون

۷- تلفات و راندمان در مولدهای سنکرون

۸- انواع نیروگاهها

۸-۱- نیروگاه حرارتی

۸-۲- نیروگاه بخاری

۸-۳- نیروگاه گازی

۸-۴- نیروگاه هسته‌ای

۸-۵- نیروگاه سیکل ترکیبی

۸-۶- نیروگاه آبی

۸-۷- نیروگاه بادی

۸-۸- جمع بندی

۹- ساختمان موتور سنکرون

۱۰- اصول کار موتور سنکرون

۱۱- روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون

۱۱-۱- راه‌اندازی داخلی

۱۱-۲- راه‌اندازی خارجی

۱۲- رفتار موتور سنکرون در زیر بار

۱۳- حالات کاری موتور سنکرون

۱۴- کاربرد موتور سنکرون

این همان برابری سرعت میدان دوار  $n_s$  و سرعت گردش رتور  $n_r$  می‌باشد. علت استفاده از واژه ماشین سنکرون، نیز همان برابری سرعت گردش رتور و سرعت میدان دوار در تمام حالات کاری این ماشین می‌باشد یعنی:

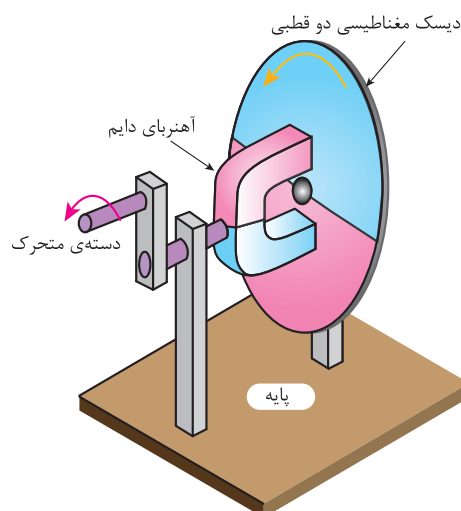
$$n_s = n_r$$

در ماشینهای سنکرون سرعت رتور برابر سرعت میدان دوار است.

پس سرعت لغزش در این ماشین طبق رابطه‌ی زیر همواره صفر خواهد بود.

$$\Delta n = n_s - n_r \quad (۴-۱)$$

ماشین سنکرون<sup>۱</sup> به ماشینی گفته می‌شود که سرعت رتور و میدان دوار آن یکی باشد. ماشین سنکرون بیشتر به عنوان مولد سنکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا بی رقیب ترین ماشین جهت تولید الکتریسیته در نیروگاهها به شمار می‌رود. هر چقدر استفاده از موتورهای القایی (آسنکرون) در صنعت رایج است، استفاده از مولدهای سنکرون در تولید برق نیروگاه‌ها کاربرد دارد. البته موتورهای سنکرون هم در موارد خاصی استفاده می‌شوند. در ادامه با ویژگی‌ها و ساختمان این ماشین الکتریکی بیشتر آشنا می‌شوید. شکل (۱) برابری سرعت گردش رتور و سرعت میدان دوار را در ماشینهای سنکرون به سادگی نمایش داده است. شما می‌توانید با تهیه وسایل نشان داده شده، این آزمایش را به انجام برسانید. هرگاه مطابق شکل (۱) دیسک متحرک، یک آهنربای دوقطبی باشد. با چرخاندن دسته متحرک، آهنربای دائم متصل به آن می‌چرخد و با توجه به جذب قطبهای غیر هم نام، قطب‌های آهنربای دیسک در مقابل قطب‌های غیر هم نام آهنربای دسته متحرک قرار می‌گیرند. در نتیجه دیسک مغناطیسی نیز با همان سرعت به چرخش در می‌آید.

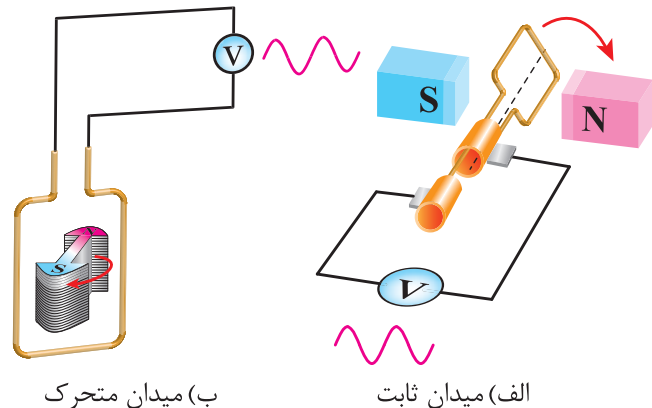


شکل ۱- یک وسیله‌ی ساده برای فهم بهتر عملکرد ماشین سنکرون

(۱) سنکرون = همزمانی

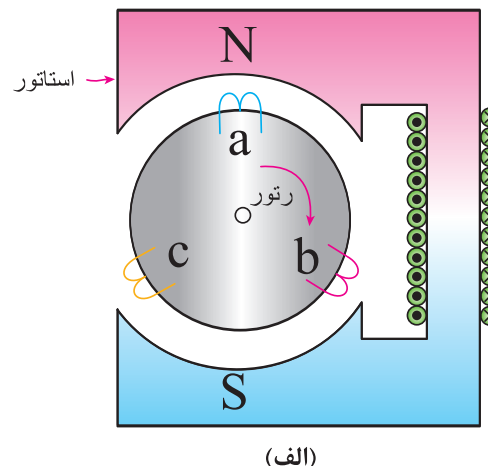
## ۲- اصول کار مولدهای سنکرون

اگر یک حلقه هادی در داخل میدان مغناطیسی مطابق شکل (۲-الف) حرکت کند و خطوط شار مغناطیسی را قطع کند در این صورت در دو سر آن حلقه‌ی هادی ولتاژ القا می‌شود<sup>۱</sup>.

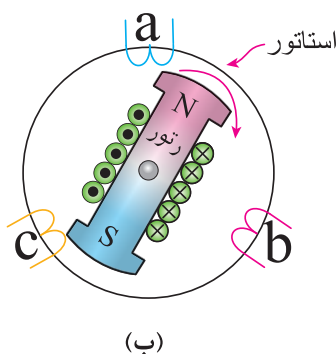


شکل ۲- نحوه‌ی القای ولتاژ در یک حلقه هادی

حالا اگر مطابق شکل (۲-ب)، حلقه هادی را ساکن نگه داشته و میدان مغناطیسی اطراف آن به حرکت در آورده شود، باز هم خطوط شار مغناطیسی حلقه را قطع کرده و در دو سر آن ولتاژ القا خواهد شد.



سیم پیچ سه فاز از طریق سه عدد رینگ و زغال به ترمینال متصل است.



سیم پیچ تحریک از طریق دو عدد رینگ و زغال به ترمینال خروجی متصل است.

مهم: در تمام مولدها اتصال سیم پیچ‌های سه فاز به صورت ستاره می‌باشد.

شکل ۳- روش‌های تولید برق در مولدهای سنکرون سه فاز

میدان مغناطیسی شکل (۲-الف) میدان مغناطیسی ساکن نامیده می‌شود. میدان مغناطیسی شکل (۲-ب) را میدان مغناطیسی دوار می‌نامند. چرا که میدان مغناطیسی در داخل ماشین حول یک محور و بصورت دایره‌ای حرکت می‌کند.

مولد سنکرون سه فاز به دو روش برق تولید می‌کند:

**به کمک میدان مغناطیسی ساکن:** در این حالت میدان مغناطیسی ساکن بوسیله‌ی سیم پیچ درون استاتور بوجود می‌آید و سیم پیچ سه فاز متقارن روی رتور قرار می‌گیرد و در داخل میدان مغناطیسی ساکن استاتور چرخش می‌کند (مطابق شکل (۳-الف)).

**به کمک میدان مغناطیسی دوار:** در این حالت میدان مغناطیسی بوسیله‌ی سیم پیچ بر روی رتور بوجود می‌آید و با چرخش رتور میدان مغناطیسی دوار فراهم می‌شود و سیم پیچ سه فاز متقارن درون استاتور قرار می‌گیرد (مطابق شکل (۳-ب)).

در ماشینهای سنکرون سیم پیچ تولید کننده‌ی میدان مغناطیسی را سیم پیچ تحریک و جریان عبوری از آن را جریان تحریک می‌گویند.



## خود را بیازمایید



- (۱) لغزش ماشین سنکرون هنگام کار چقدر است؟ چرا؟
- (۲) القاگر بودن رتور در ماشینهای سنکرون چه مزیت‌هایی دارد؟
- (۳) معمولاً ولتاژ تحریک مولدهای سنکرون کم‌تر از ..... ولت است.

## ۳- ساختمان مولدهای سنکرون

مولدهای سنکرون از دو قسمت اصلی استاتور و رتور تشکیل شده‌اند.

### ۳-۱-۱ استاتور

استاتور مولد سنکرون هیچ تفاوتی با ماشینهای القایی ندارد. یعنی برای تولید برق سه فاز باید حداقل سه دسته کلاف کاملاً مشابه با اختلاف فاصله مکانی ۱۲۰ درجه روی پوسته استاتور داشته باشد.

با توجه به شکل (۴)، اگر رتور این مولد دو قطبی یک دور کامل بزند، بر روی هر سیم پیچ فاز، یک سیکل (یک دوره تناوب) ولتاژ سینوسی (AC) القا می‌شود.

بر اساس چرخش رتور و اختلاف فاصله مکانی در سیم پیچهای فاز a، b و c در ولتاژ تولید شده اختلاف زمانی متناظر ایجاد خواهد شد. البته باید توجه داشت که توزیع هادی‌ها در محیط استاتور کاملاً یکنواخت است و این خود به تولید برق سینوسی کمک می‌کند.

باید توجه داشت که هر چقدر سرعت چرخش رتور افزایش یابد دوره‌ی تناوب شکل موج ولتاژهای تولیدی کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر موجب افزایش فرکانس

بر خلاف ماشینهای جریان مستقیم که استاتور آنها همواره القا کننده (تحریک) و رتور آنها همواره القا شونده (آرمیچر) است. در ماشینهای سنکرون جای این دو می‌تواند جابجا شود.

البته القاگر بودن رتور (چرخش میدان مغناطیسی توسط رتور) و دریافت انرژی الکتریکی از سیم پیچهای استاتور مزیت بیشتری نسبت به حالت عکس آن دارد زیرا:

(الف) جریان تحریک خیلی کمتر از جریان آرمیچر می‌باشد و در نتیجه ارتباط آن از طریق حلقه‌های لغزان و جاروبک آسانتر و بی درد سرتر است.

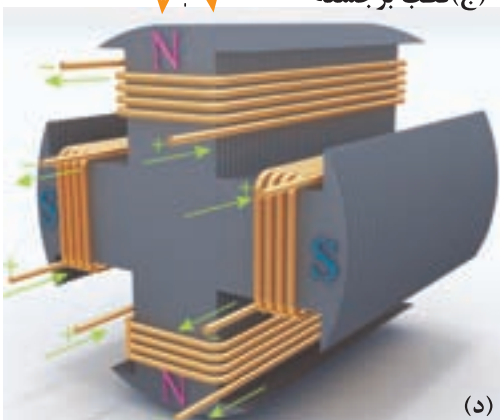
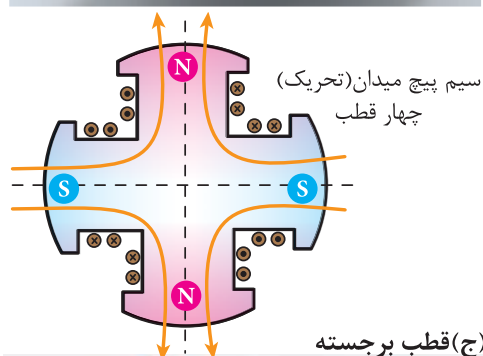
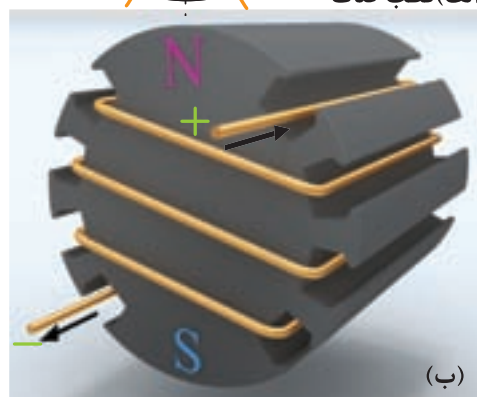
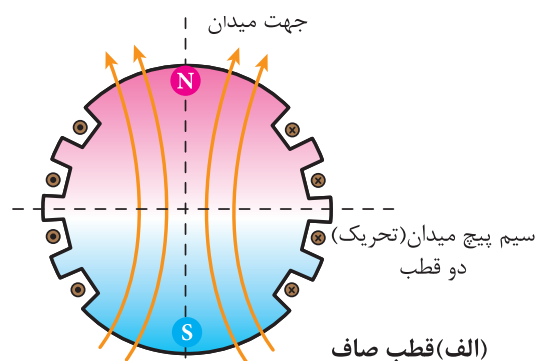
(ب) عایق بندی سیم پیچهای رتور به علت داشتن ولتاژ پایین (زیر ۱۰۰۰ ولت) بسیار آسان و ساده است.

(ج) دریافت ولتاژ و جریان بالای سه فاز، از ترمینالهای ثابت استاتور به سادگی امکان پذیر است.

(د) از آنجا که قدرت مولدهای نیروگاهی غالباً زیاد است، حجم سیم بندی القاشونده و در نتیجه وزن آن به مراتب بیشتر از سیم پیچ تحریک بوده و لذا پیاده سازی آن بر روی رتور (که دائماً متحرک می‌باشد)، مشکل عدم توازن وزن مکانیکی را در پی خواهد داشت.

هر چند دلایل فوق استفاده از چرخش میدان مغناطیسی توسط رتور را در تمامی موارد توجیه می‌کند، اما گاهی در مولدهای با قدرت کم از میدان مغناطیسی ساکن در استاتور و تولید ولتاژ سه فاز توسط سیم پیچهای رتور استفاده می‌شود.

در ادامه، مولدهای سنکرونی بررسی خواهند شد که اصول عملکردشان همان چرخش میدان مغناطیسی است.



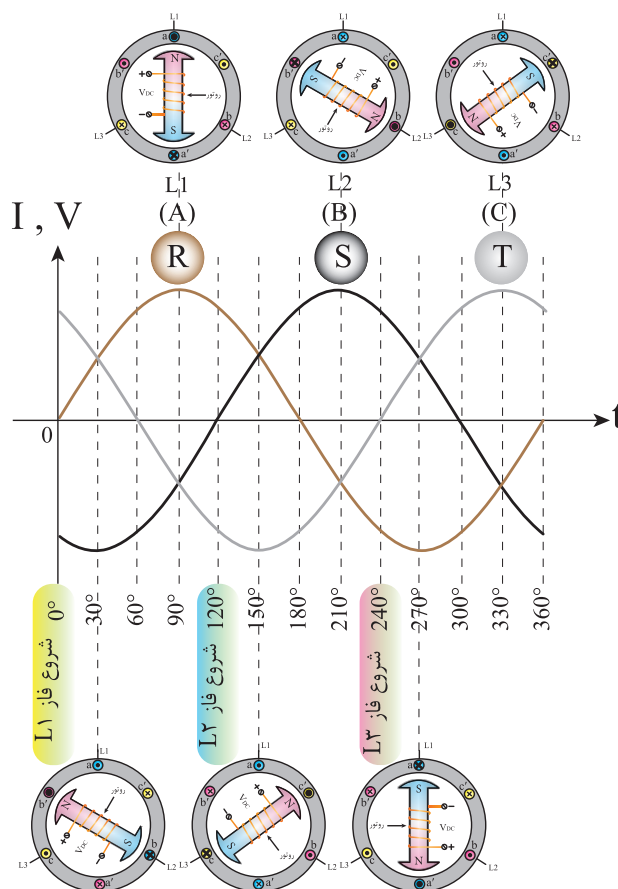
شکل ۵- طرح واره رتور دوقطبی و چهار قطبی ماشین سنکرون

### تحقیق کنید



چرا در ماشینهای سنکرون تعداد قطبهای سیم پیچی استاتور باید با تعداد قطبهای رتور برابر باشند؟

شکل موج ولتاژهای تولیدی می شود.



شکل ۴- تولید ولتاژ سه فاز با گردش میدان دو قطبی

### ۲-۳- رتور

در رتور مولد سنکرون به کمک سیم پیچ ها آهنربای الکترو مغناطیسی دائم ایجاد می شود تا با چرخش آن بتوان میدان دوار تولید کرد. شکل (۵) طرح واره ی ایجاد میدان مغناطیسی دوقطبی و چهار قطبی را با سیم پیچ های رتور ماشین سنکرون نشان می دهد. در رتور ماشین سنکرون برای داشتن هسته مغناطیسی، ورقه های آهنی سیلیس دار را روی هم قرار می دهند تا هسته ی مناسبی برای عبور میدان مغناطیسی ایجاد گردد. سپس با قرار دادن سیم پیچ ها در این هسته و اتصال آنها به منبع جریان مستقیم، رتور ماشین به آهنربای دائم الکترومغناطیسی تبدیل می شود. اتصال سیم پیچ های میدان (تحریک) به منبع جریان مستقیم از طریق دو عدد رینگ و زغال صورت می گیرد.

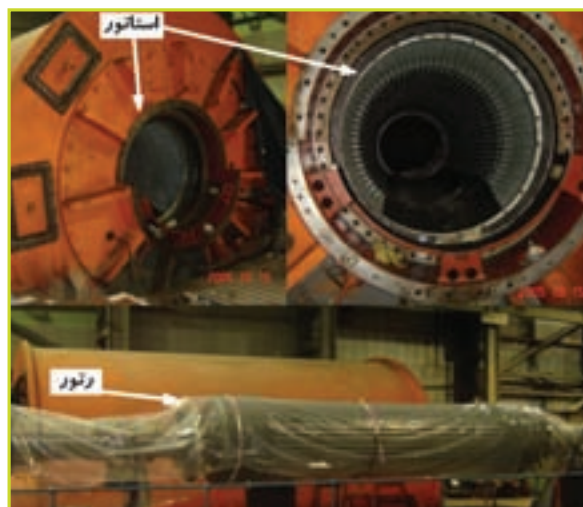
## ۴ - انواع رتور ماشینهای سنکرون

### ۴-۱- رتور با قطب صاف یا استوانه ای

این رتورها مانند شکل (۵-الف و ب) بصورت استوانه ای ساخته می شوند و با توجه به اینکه هیچ برجستگی در سطح استوانه وجود ندارند به آن رتور با قطب صاف یا پنهان نیز گفته می شود. غالباً رتورهای با بیش از دو قطب بصورت قطب صاف ساخته نمی شوند.

رتورهای با قطب صاف در مولدهای دو قطبی با سرعت های زیاد<sup>۱</sup> استفاده می شوند.

طول این رتورها نسبت به قطر آن بیشتر و متناسب با سرعت زیاد ساخته می شوند. سیم پیچهای تحریک در سطح خارجی استوانه و به موازات محور ماشین در داخل شیارهای رتور تعبیه شده و بر روی استوانه رتور قرار می گیرند. شکل (۶) تصویر استاتور و رتور یک توربوژنراتور را نشان می دهد.



شکل ۶ - رتور و استاتور یک توربوژنراتور

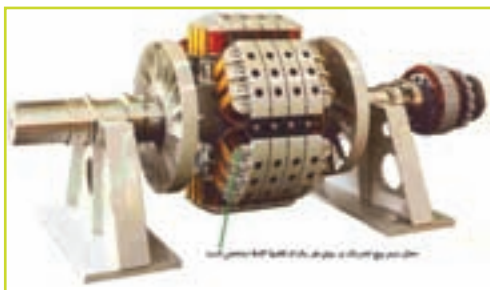
### ۴-۲- رتور با قطب برجسته

رتور مولدهای با تعداد قطب زیاد و سرعت کم معمولاً از نوع قطب برجسته هستند. طول این رتورها به نسبت قطر آن کمتر است و متناسب با سرعتهای کم ساخته می شوند.

ساختمان رتور قطب برجسته و چگونگی قرارگیری سیم پیچهای تحریک بر روی آن در شکل (۷) نشان داده شده است.

رتور مولد نیروگاه های آبی<sup>۲</sup> و دیزل ژنراتورها<sup>۳</sup> اینگونه ساخته می شوند.

در شکل (۸) رتور مولد نیروگاه های آبی در حال نصب نشان داده شده است.



شکل ۷- رتور قطب برجسته (آشکار)



شکل ۸- رتور نیروگاه آبی سد شهید عباسپور در حال قرارگیری در استاتور

(۱) توربوژنراتور Turbo Generator

(۲) هیدرو ژنراتور Hydro Generator

(۳) دیزل ژنراتورها در قدرت های کوچک و اضطراری ساخته و استفاده می شوند و وسیله گرداننده رتور آنها موتور دیزل است ۱۸۷

رابطه (۳-۴) همان رابطه سرعت سنکرون در ماشینهای القایی است که در اینجا بر حسب فرکانس بیان شده است

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \Rightarrow$$

$$f = \frac{n_s \times p}{120} \quad (۳-۴)$$

**سوال** می‌خواهیم فرکانس ولتاژ مولدی ۵۰ هرتز باشد؛

الف: اگر رتور این ماشین چهار قطبی باشد، محور ژنراتور را با چه سرعتی بچرخانیم؟

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

ب: اگر سرعت رتور (محور مولد) ۷۵۰ RPM باشد. از مولد چند قطبی باید استفاده کرد؟

$$p = \frac{120 \times f}{n_s} \Rightarrow n_s = \frac{120 \times 50}{750} = 8$$

از مولد ۸ قطبی باید استفاده گردد

## ۵-۲- ولتاژ مولد سنکرون

ولتاژ تولید شده در سیم پیچهای استاتور مولد سنکرون با توجه به قانون القای ولتاژ فارادی از رابطه (۴-۴) بدست می‌آید.

$$E = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (۴-۴)$$

ولتاژ تولید شده در مولد سنکرون را بطور ساده تر می‌توان با رابطه ی (۴-۵) نیز محاسبه کرد<sup>۱</sup>.

$$E = 4 / 44 N \phi F \quad (۴-۵)$$

بنابراین ولتاژ تولید شده مولد به عوامل زیر بستگی دارد:

## خود را بیازمایید



(۱) استاتورمولد سنکرون دارای سه دسته سیم پیچ با ..... ۱۲۰ درجه است.

(۲) رتور مولد سنکرون دارای سیم پیچی است که به جریان ..... (مستقیم / متناوب) متصل می‌شود.

(۳) رتور با قطب صاف در ..... استفاده می‌شود.

(۴) رتور مولد سنکرون از نوع برجسته دارای طول نسبی ..... و قطر ..... (زیاد/کم) می‌باشند.

## ۵-۵- کمیت‌های مولد سنکرون

### ۵-۱- فرکانس مولد سنکرون

فرکانس ولتاژ تولید شده به عوامل زیر بستگی دارد:

- تعداد قطبهای سیم پیچی

- سرعت رتور

فرض کنید رتور یک مولد دو قطبی با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه بچرخد در نتیجه فرکانس ولتاژ تولید شده ۵۰ هرتز خواهد شد. یعنی:

$$f = \frac{n_s \times p}{120} \Rightarrow \quad (۴-۲)$$

$$f = \frac{3000 \times 2}{120} = 50 \text{ Hz}$$

در رابطه (۴-۲):

$n_s$  سرعت گردش رتور مولد سنکرون بر حسب

دور در دقیقه (RPM)

P تعداد قطبها

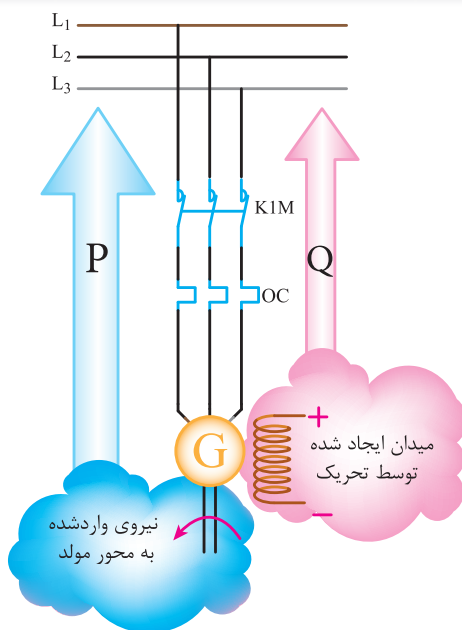
f فرکانس بر حسب (Hz)

رئوستا قادر است جریان تحریک را کم و یا زیاد کند و در نتیجه با تنظیم جریان تحریک، فوران (شار) مغناطیسی و در نهایت ولتاژ خروجی مولد قابل تنظیم خواهد بود.

## نکته ۲



سیم پیچ موتورهای الکتریکی، سلف چراغهای فلورسنت، میدان مغناطیسی خطوط انتقال برق و بطور کلی در هر کجا که اثر میدان مغناطیسی جریان متناوب وجود دارد، توان راکتیو مصرف می‌شود. همانگونه که بکارگیری اثر میدان مغناطیسی نشانگر مصرف توان راکتیو است، تولید میدان مغناطیسی توسط سیم پیچ های تحریک در مولد های سنکرون نیز نشانگر تولید توان راکتیو می‌باشد. بنابراین با تغییر جریان تحریک توان راکتیو تولیدی مولد سنکرون، تغییر می‌کند.



شکل ۱۰- مولد سنکرون متصل به شبکه برق

مولد سنکرون بر خلاف ماشین القایی مطابق شکل (۱۰)، علاوه بر تولید توان اکتیو، می‌تواند توان راکتیو نیز تولید نموده و به شبکه برق تحویل دهد. به

$N$  تعداد دور سیم پیچ ها یا هادیهای سیم پیچ استاتور  
 $\varphi$  شار مغناطیسی (فوران) عبوری از هر قطب بر حسب وبر  
 $W_b$

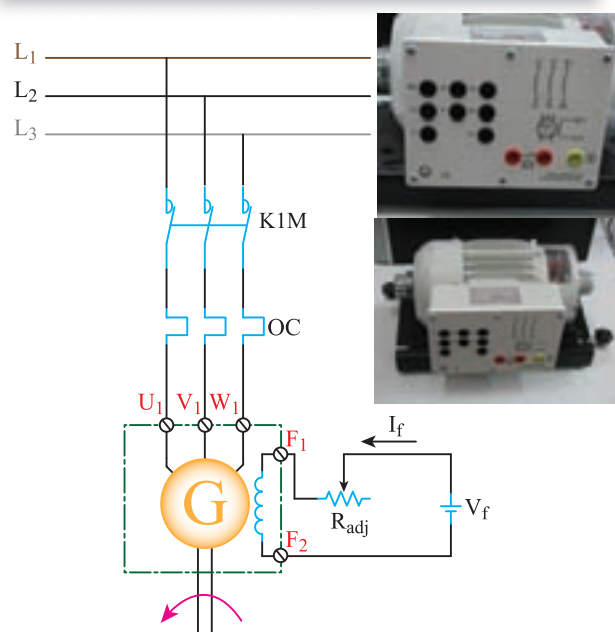
$f$  فرکانس شبکه بر حسب Hz هرترز

هر چند ولتاژ خروجی مولد سنکرون به عوامل فوق وابسته است، ولی در عمل برای تنظیم ولتاژ خروجی مولد، تنها شار مغناطیسی قطبها را تغییر می‌دهند. از آنجا که فرکانس شبکه ی برق باید ثابت نگه داشته شود، در نتیجه نمی‌توانند ولتاژ شبکه را با تغییر فرکانس (تغییر سرعت مولد) تنظیم کنند.

## نکته ۱



با تغییرات جریان تحریک رتور می‌توان ولتاژ خروجی مولد را تغییر داد.



شکل ۹- نمایی از یک ماشین سنکرون آزمایشگاهی و طرح واره تنظیم جریان تحریک

برای تنظیم ولتاژ مولد، مطابق شکل (۹) در مدار سیم پیچ تحریک می‌توان از یک رئوستا<sup>۱</sup> استفاده نمود. این



## خود را بیازمایید



- (۱) عوامل تعیین کننده فرکانس مولد سنکرون را نام ببرید.
- (۲) در مولد سنکرون ۱۴ قطبی با فرکانس تولیدی ۵۰ HZ، سرعت چرخش رتور چند دور در دقیقه است؟
- (۳) سرعت چرخش یک مولد سنکرون چهار قطبی برابر با ۱۸۰۰ RPM است. فرکانس برق تولیدی آن را بدست آورید.
- (۴) عوامل تعیین کننده ولتاژ مولد سنکرون را نام ببرید.
- (۵) برای افزایش ولتاژ مولد سنکرون بایستی مقاومت (رئوستا) مدار تحریک را..... (افزایش/کاهش) داد.

سبب داشتن همین توانایی، در تولید نیروی برق اکثر نیروگاههای سراسر دنیا از این مولد استفاده می شود.

## نکته ۳



با مصرف توان راکتیو (Q) توسط بار، ولتاژ تولیدی مولد رو به کاهش می گذارد که باید جهت تثبیت ولتاژ، جریان تحریک مولد را افزایش داد. در واقع با زیاد شدن جریان تحریک شار مغناطیسی افزایش یافته و بدین ترتیب توان راکتیو بیشتری تولید و به شبکه برق تحویل داده می شود.

مصرف توان راکتیو باعث افت ولتاژ مولد سنکرون می گردد.

## ۶- موازی کردن مولدهای سنکرون

در نیروگاهها و یا مراکز تولید برق به جای یک مولد بزرگ از چند مولد کوچکتر بصورت موازی با یکدیگر استفاده می شود:

- بالا بردن ضریب اطمینان تامین شبکه برق
- تغییر دائم قدرت درخواستی از شبکه<sup>۱</sup>

## شرایط موازی کردن مولدها

- برابری ولتاژ خروجی مولدها
  - برابری فرکانس مولدها
  - یکسان بودن توالی فاز در مولدها
- برای انجام عملیات موازی سازی دو مولد سنکرون با هم و یا یک مولد سنکرون با شبکه برق سراسری از مداری مطابق شکل (۱۱) استفاده می شود. مدار سنکرون سازی شامل دو دستگاه ولت متر، دو فرکانس متر و یک دستگاه سنکرونسکوپ می باشد. یکی از

## نکته ۴



وقتی بار متصل به مولد، توان اکتیو (P) مصرف می کند، سرعت مولد یا فرکانس ولتاژ تولیدی رو به کاهش می گذارد. برای جلوگیری از کاهش فرکانس باید جهت تثبیت سرعت چرخش، مولد را با نیروی بیشتری چرخاند، بطوری که توان اکتیو مورد نیاز مصرف کننده تولید شود. این موضوع مانند گاز دادن بیشتر به اتومبیل در یک مسیر سربالایی است برای آنکه بتوان سرعت آن را نسبت به مسیر مسطح، ثابت نگه داشت.

مصرف توان اکتیو باعث افت فرکانس مولد سنکرون می گردد.

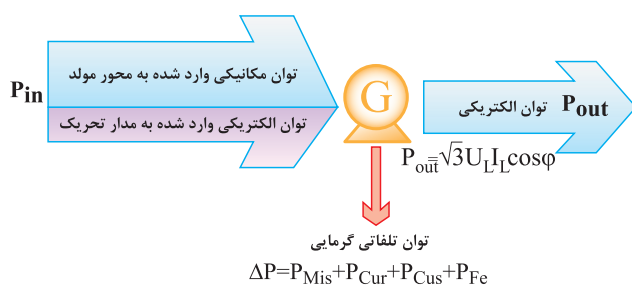
(۱) اگر یک مولد با توان بالا استفاده شود ممکن است به دلیل کاهش مصرف در ساعاتی از شبانه روز مجبور باشد، با کسری از



## ۷- تلفات و راندمان در مولدهای سنکرون

به دلیل تفاوت ساختمان مولدهای سنکرون نسبت به دیگر ماشینها (مولدها) لازم است در محاسبه راندمان بیشتر دقت شود. چرا که توان ورودی مولد سنکرون از دو بخش تامین می‌شود:

- بخش اول توان الکتریکی (DC) مربوط به مدار تحریک ( $P_{dc}$ )
  - بخش دوم توان مکانیکی ( $P_{mec}$ ) ورودی
- برای آشنایی بیشتر به دیاگرام شکل (۱۳) توجه نمایید:



شکل ۱۳- دیاگرام توازن توان مولد سنکرون

$$P_{in} = P_{mec} + P_{dc} \quad (۴-۶) \quad \text{توان ورودی:}$$

$$P_{out} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi \quad (۴-۷) \quad \text{توان خروجی:}$$

در رابطه (۴-۷)

$U_L$  ولتاژ خط بر حسب ولت

$I_L$  جریان خط بر حسب آمپر

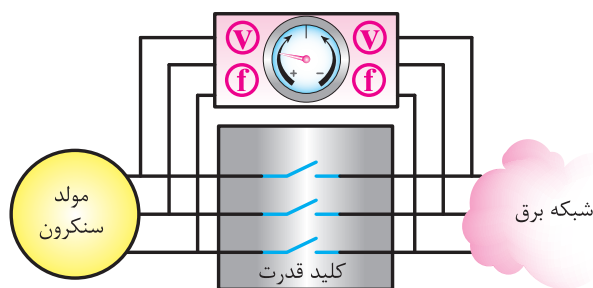
$\cos \phi$  ضریب قدرت شبکه می‌باشد.

با توجه به دیاگرام توان شکل (۱۳)

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (۴-۸)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (۴-۹)$$

ولتمتر و فرکانس مترها ولتاژ و فرکانس طرف مولد و دیگری ولتاژ و فرکانس طرف شبکه برق را اندازه‌گیری می‌کند و نشانگر سنکرونسکوپ زاویه فاز بین ولتاژهای دو طرف کلید را جهت کنترل توالی و برابری فازها نشان می‌دهد. وجود این سه دستگاه در تابلوی فرمان نیروگاه برای عمل موازی سازی لازم است. برای برابر شدن ولتاژ مولدها جریان تحریک آنها را تغییر می‌دهند و برای تساوی شدن فرکانس آنها سرعت مولدها را تنظیم می‌کنند.



شکل ۱۱- مدار موازی سازی مولد سنکرون

سرعت چرخش عقربه سنکرونسکوپ به اختلاف فرکانس بین مولد و شبکه برق بستگی دارد. هنگامی که عقربه دستگاه سنکرونسکوپ در وسط و روی عدد صفر ایستاد بهترین زمان وصل کلید قدرت بوده و موازی کردن مولد بلامانع است.



شکل ۱۲- تابلوی فرمان سه مولد که با شبکه برق سراسری موازی شده اند

## خود را بیازمایید



- (۱) مزایای استفاده از چند مولد سنکرون به جای یک مولد بسیار بزرگ را بنویسید.
- (۲) برای کنترل توالی و مقدار لحظه ای ولتاژ فازها از ..... استفاده می شود.
- (۳) رابطه محاسبه تلفات کل مولد سنکرون را نوشته و هر یک از کمیت های آن را معرفی کنید.

$\Delta P$  یا همان مجموع تلفات مولد سنکرون، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P = \Delta P_{Mis} + \Delta P_{Cur} + \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Fe} \quad (۴-۱۰)$$

در رابطه (۴-۱۰)

$P_{Mis}$  تلفات مکانیکی رتور بر حسب وات

$P_{Cur}$  تلفات مسی رتور بر حسب وات

$P_{Cus}$  تلفات مسی استاتور بر حسب وات

$P_{Fe}$  تلفات آهنی ماشین بر حسب وات

## ۸- انواع نیروگاهها

نیروگاه به محلی گفته می شود که در آن انرژی های دیگر را به انرژی برق تبدیل می کنند. نیروگاهها انواع مختلفی دارند که در این بخش به اختصار توضیح داده می شود.



شکل ۱۴- نمایی از اتاق کنترل نیروگاه

$$\Delta P_{Cur} = R_f I_f^2 \quad (۴-۱۱)$$

$$\Delta P_{Cus} = 3 R_s I_{ph}^2 \quad (۴-۱۲)$$

در رابطه (۴-۱۱ و ۴-۱۲)

$R_f$  مقاومت تحریک بر حسب اهم

$I_f$  جریان تحریک بر حسب آمپر

$R_s$  مقاومت سیم پیچ هر فاز استاتور

$I_{ph}$  جریان عبوری از هر فاز سیم پیچ استاتور

**مثال** یک مولد سنکرون ۴۰۰ ولت با اتصال ستاره، باری با جریان ۸۰ آمپر و ضریب قدرت ۰/۷ را تامین می کند. اگر از تلفات مسی رتور صرف نظر کنیم و تلفات آهنی ۴۰۰ وات و تلفات مکانیکی ۶۰۰ وات و مقاومت هر فاز استاتور ۰/۰۴ اهم باشد راندمان مولد را محاسبه کنید.

$$\Delta P_{cur} = 0$$

$$\Delta P_{cus} = 3 R_a I_a^2$$

$$\Delta P_{cus} = 3 \times 0.04 \times 80^2 = 768 \text{ W}$$

$$\Delta P = \Delta P_{Mis} + \Delta P_{Cur} + \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Fe}$$

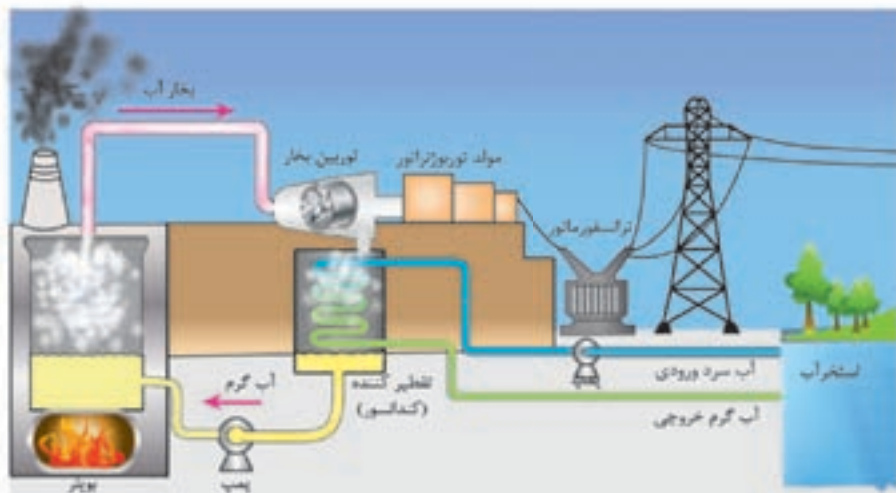
$$\Delta P = 400 + 600 + 768 = 1768 \text{ W}$$

$$P_r = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi = \sqrt{3} \times 400 \times 80 \times 0.7 = 28755 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} = \frac{28755}{28755 + 1768} = 0.95$$

## ۸-۱- نیروگاه حرارتی

به نیروگاهی اصطلاحاً حرارتی گفته می شود که انرژی نهفته در سوختهای جامد، مایع، گاز و یا فعل و انفعالات شیمیائی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. بدین ترتیب که از طریق ایجاد حرارت هوای داغ و یا بخار آب بوجود می آید و با عبور آن سیال (هوا یا بخار آب) رتور ژنراتور را می چرخانند. انواع نیروگاههای حرارتی شامل بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و هسته ای می باشد.



شکل ۱۵- طرح واره‌ی تولید برق در نیروگاه بخار



الف) نیروگاه گازی توس در نزدیکی مشهد



ب) یک نمونه توربین گازی

شکل ۱۶

## ۸-۲- نیروگاه بخاری

در این نیروگاه با سوزاندن سوخت‌های فسیلی (ذغال سنگ یا مازوت<sup>۱</sup>) آب را به بخار تبدیل کرده و انرژی بخار تولید شده را برای چرخاندن توربین مولد استفاده می‌کنند. شکل (۱۵)

## ۸-۳- نیروگاه گازی

در بعضی از نیروگاه‌ها با استفاده از احتراق برخی گازها مانند متان دمای گاز را بالا برده و با فشرده سازی هوای داغ توسط کمپرسورهای قوی، سیالی بسیار گرم و با انرژی زیاد فراهم می‌کنند که می‌تواند پس از برخورد با پره های توربین آن را به حرکت در آورد. این گونه نیروگاه‌ها را نیروگاه گازی می‌گویند. به دلیل سرعت بالای توربین های گازی و بخاری اغلب مولدهای نیروگاههای گازی و بخاری از نوع سنکرون با قطب صاف می‌باشند.

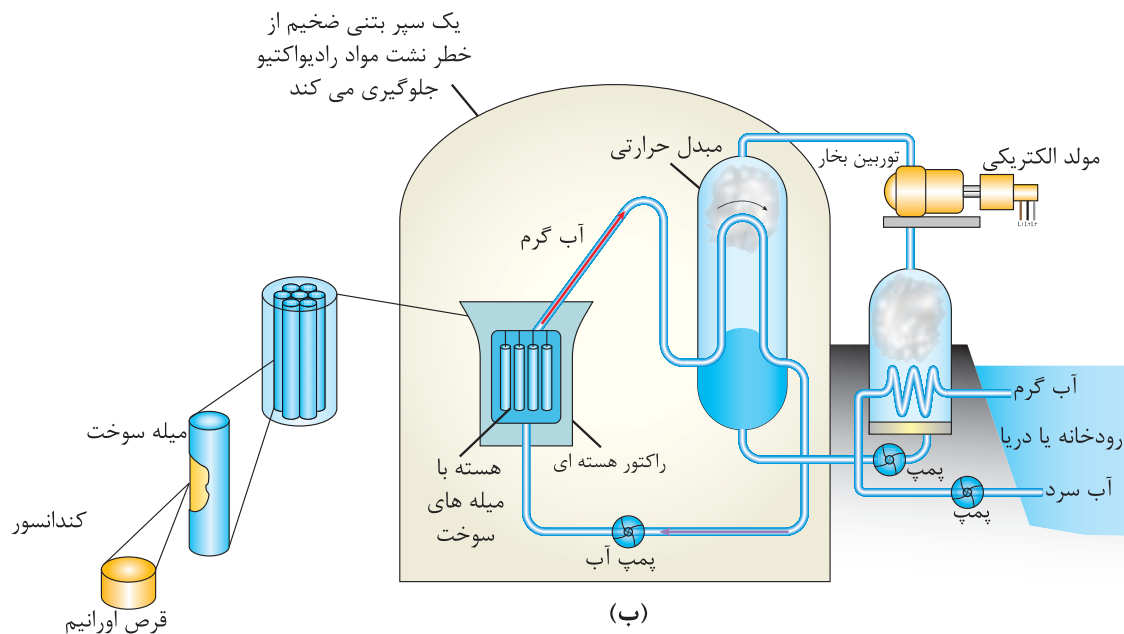
## ۸-۴- نیروگاه هسته‌ای

در نیروگاه‌های هسته‌ای با شکست اتمهای سنگینی همچون اورانیوم و فعل و انفعالات شیمیایی مربوطه گرمای بسیار زیاد ایجاد می‌شود که از آن برای تولید بخار آب استفاده می‌نمایند. سپس بخار ایجاد شده را از توربین بخار عبور میدهند و به این ترتیب برق تولید می‌کنند.

نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار تمیز و کارآمد هستند با این وجود در صورت رعایت نکردن ایمنی و بهره برداری غلط می‌توانند برای محیط زیست خطرساز باشند. این نیروگاه‌ها به دلیل استفاده از مواد رادیو اکتیو در صورت نشت به محیط اطراف، فاجعه آفرین



(الف)



(ب)

شکل ۱۷-الف) نمای از یک نیروگاه هسته‌ای

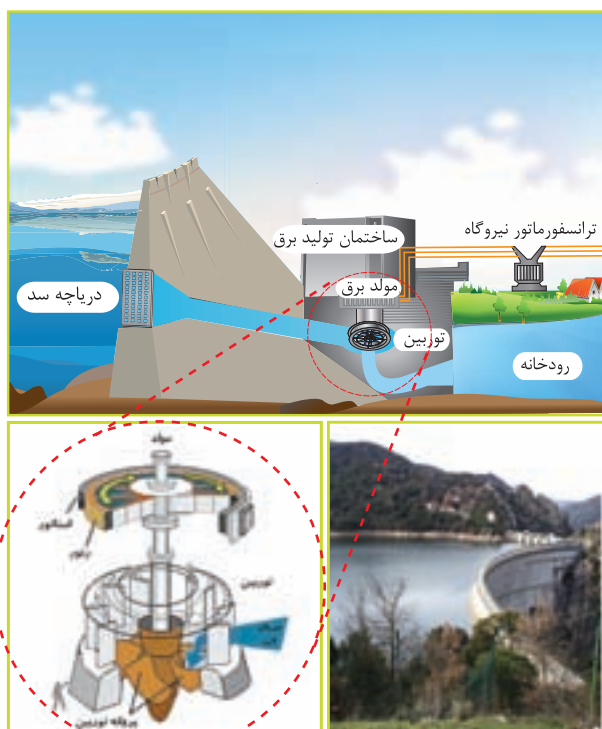
ب) طرح واردهی تولید برق در نیروگاه هسته‌ای

خروجی از توربین گازی را جهت گرم کردن اولیه آب به سمت دیگ بخار هدایت می‌کنند. در نتیجه گرمای خارج شده از اگزوز نیروگاه گازی هدر نمی‌رود و تلفات انرژی کاهش یافته و راندمان نیروگاه افزایش می‌یابد. به

## ۸-۵- نیروگاه سیکل ترکیبی

به دلیل راندمان بسیار کم نیروگاه‌های گازی و بخاری معمولاً این دو نیروگاه را در نزدیک هم می‌سازند. به این ترتیب که انرژی (گرمای) باقیمانده در گازهای

نیروگاهها از نوع سنکرون با قطب برجسته می‌باشد.



شکل ۱۹- طرح واری تولید برق در نیروگاه های آبی

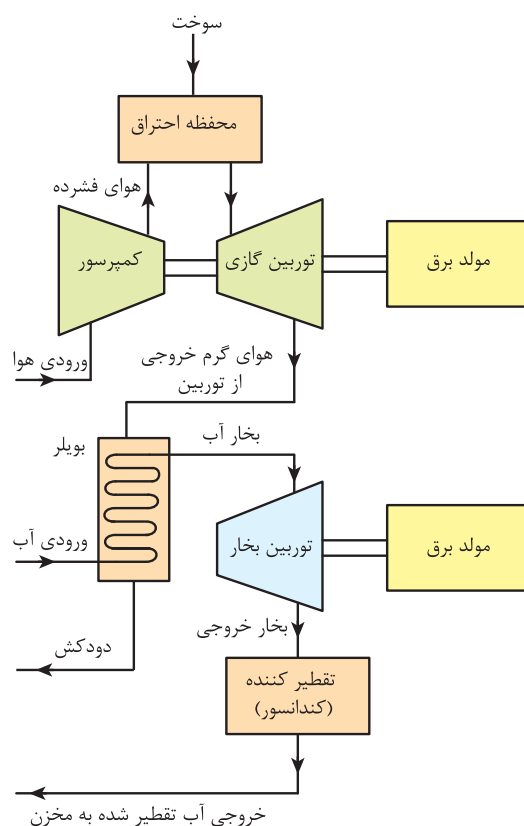
## ۸-۷- نیروگاه بادی

این نوع نیروگاه با توجه به شرایط اقلیمی یک منطقه بادخیز احداث می‌شود. در این روش توربینهایی که دارای سه پره با طول بلند می‌باشند روی یک پایه‌ی نسبتاً بلند سوار شده‌اند و انرژی نهفته از وزش باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. البته با توجه به سرعت متغیر باد در این نیروگاه‌ها از مولد آسنکرون استفاده می‌شود.<sup>۱</sup>



شکل ۲۰- توربین نیروگاه بادی

همین دلیل به این نیروگاه سیکل ترکیبی می‌گویند. نیروگاه دماوند به عنوان بزرگترین نیروگاه سیکل ترکیبی خاورمیانه با مجموع ظرفیت ۲۸۶۸ مگاوات می‌باشد. این نیروگاه با ۵۰ درصد بازدهی، بیشترین بازدهی را در میان سایر نیروگاه های حرارتی دارد. طرح واری عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۸- طرح واری عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی

## ۸-۶- نیروگاه آبی

استفاده از انرژی پتانسیل آب در پشت سد می‌تواند منبع مناسبی برای به حرکت در آوردن توربینهای یک مولد باشد. به همین دلیل در کنار هر یک از سد ها آب راه مناسبی جهت خروج آب تعبیه می‌کنند که آب پشت سد را با فشار و نیروی مناسب به پره های توربین مولد وارد می‌کند و آن را به گردش در می‌آورد. به دلیل سرعت کم توربین های آبی، مولد این نوع



## ۸-۸- جمع بندی

در تمام کشورها معمولاً برق پایه (یا همان مصرف متوسط) از طریق نیروگاههای سیکل ترکیبی، هسته‌ای، آبی و بخاری تامین می‌شود و تولید برق بیشتر را در ساعات اوج مصرف با اضافه شدن نیروگاههای گازی و آبی جبران می‌نمایند. ضمن اینکه دیگر نیروگاهها در صورت نیاز، همواره انرژی خود را به شبکه برق سراسری تحویل می‌دهند.

## تحقیق کنید



چرا شبکه برق را بصورت سراسری استفاده می‌کنند؟

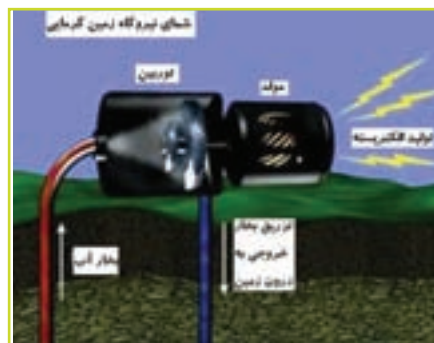
هرچند در حال حاضر هزینه ساخت نیروگاههای انرژی نو در مقایسه با نیروگاههای حرارتی بسیار بیشتر است و در برخی نقاط غیر ممکن می‌باشد ولی هنوز آنها را نا امید نکرده است. در ایران نیز نیروگاه‌هایی احداث شده اند که در شکل (۲۱) نمونه‌هایی از آن دیده می‌شوند.

## خود را بیازمایید



- (۱) انواع نیروگاههای حرارتی را نام ببرید.
- (۲) نحوه به حرکت درآوردن توربین در نیروگاه گازی چگونه است؟
- (۳) راندمان نیروگاههای ..... و ..... بسیار کم بوده و از کنار هم قرار دادن این دو نیروگاه، ..... می‌سازند.
- (۴) مولد سنکرون مورد استفاده در نیروگاه آبی از نوع رتور..... (برجسته / صاف) می‌باشد.
- (۵) نشت گازهای رادیواکتیو به بیرون از خطرات نیروگاه ..... می‌باشد.
- (۶) چند نوع نیروگاه انرژی نو نام ببرید.

با در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از اثرات مخرب زیست محیطی و به پایان رسیدن ذخایر نفت و گاز در جهان، دانشمندان بدنال راهی مناسب جهت حذف نیروگاههای حرارتی هستند و بدنال آن مطالعه و ساخت نیروگاههایی موسوم به انرژی نو همچون خورشیدی، زمین گرمایی، جزر و مد دریا و.... را آغاز کرده‌اند.



شکل ۲۱- نمایی از نیروگاه‌های موسوم به انرژی نو



## ۹- ساختمان موتور سنکرون

ساختمان موتورهای سنکرون سه فاز مشابه مولد های سنکرون است. البته تفاوت‌های جزئی بین آنها وجود دارد. به عنوان نمونه رتور موتورهای سنکرون غالبا از نوع قطب برجسته است. در صورتی که در مولدها چنین نیست. همچنین در ساختمان رتور موتورهای سنکرون از میله های قفس سنجابی به شکلی که در فصل ۳ گفته شد استفاده می‌شود که در ادامه علت بکارگیری این میله ها بیان خواهد شد.

## ۱۰- اصول کار موتور سنکرون

اگر سیم پیچهای سه فاز استاتور موتور سنکرون را به شبکه سه فاز متصل کنیم، مطابق آنچه که در موتورهای القایی گفته شد، میدان دواری با سرعت  $n_s$  طبق رابطه (۴-۱۳) در داخل موتور ایجاد می‌گردد.

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (4-13)$$

اگر رتور این موتور که مانند رتور مولدهای سنکرون است و تعداد قطبهای آن با تعداد قطبهای استاتور برابر می‌باشد را به منبع ولتاژ DC متصل کنیم، بر اثر عبور جریان تحریک از آن، رتور ماشین تبدیل به آهنربای دائم با تعداد قطب هایی متناسب با میدان گردان می‌شود. اما از آنجا که سرعت میدان دوار (مثلا با فرکانس HZ ۵۰) خیلی زیاد است، قطبهای ساکن رتور، قطبهای دوار را لحظه ای در مقابل و خیلی سریع در مخالف خود می‌بینند، بنابراین گشتاور یا نیروی راهاندازی به آن وارد نمی‌شود و رتور حرکت نمی‌کند. اما اگر رتور را با سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون به حرکت در آوریم در این حالت دو قطب غیر همنام رتور و میدان دوار با یکدیگر قفل شده و با سرعت ثابت (میدان دوار) و در جهت چرخش میدان شروع به گردش می‌کنند.

چون گشتاور راهاندازی موتور سنکرون صفر است پس موتور سنکرون نیاز به راهانداز دارد.

## ۱۱- روش های راهاندازی موتور سنکرون

### ۱۱-۱- راهاندازی داخلی

برای راهاندازی موتورهای سنکرون به این شیوه از رتورهایی که بر روی رتور آنها میله های قفس سنجابی تعبیه گردیده، استفاده می‌شود. بدین ترتیب که موتور در لحظه راهاندازی مانند موتور القایی راه می‌افتد و بعد از آنکه سرعت رتور به سرعت میدان دوار نزدیک شد، بصورت سنکرون به کار خود ادامه خواهد داد. به این روش راهاندازی روش القایی نیز می‌گویند. باید توجه داشت که در لحظه راهاندازی، باید مقاومت رئوستای تحریک را بر روی بیشترین مقدار خود تنظیم نمود تا ولتاژ القایی ایجاد شده در سیم پیچ تحریک به مدار آسیب نزنند. از دیگر ویژگی های میله ها قفس سنجابی در رتور موتورهای سنکرون خنثی کردن ضربات ناشی از بار به موتور در شرایط اضافه بار می‌باشد.

### ۱۱-۲- راهاندازی خارجی

در این روش به کمک یک محرک خارجی موتور سنکرون را راهاندازی می‌نمایند، سپس محرک خارجی را خاموش و از سیستم خارج می‌کنند.

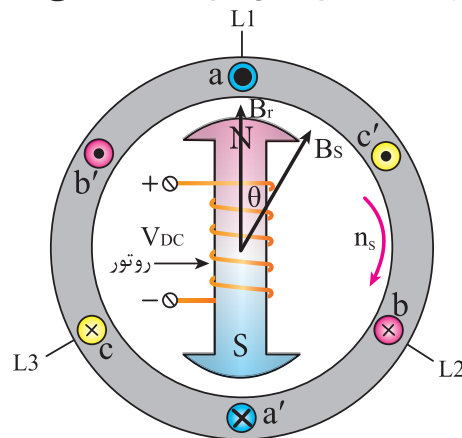
### خود را بیازمایید



- ۱) چرا در موتور سنکرون با اتصال ولتاژ شبکه به استاتور و ایجاد جریان تحریک، رتور نمی‌چرخد؟
- ۲) در راهاندازی داخلی، موتور سنکرون بصورت ..... راه اندازی می‌شود.

## ۱۲ - رفتار موتور سنکرون در زیر بار

هنگامی که رتور موتور سنکرون سه فاز در زیر بار است و با سرعت سنکرون می چرخد دو میدان حاصل از استاتور و رتور طبق آنچه که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، در یک راستا قرار نمی گیرند. در واقع زاویه میدان رتور از میدان استاتور عقب می افتد. این عقب افتادن مانند کشیده شدن یک اتومبیل توسط یک خودروی دیگر است. یعنی اگر اتومبیل جلویی با هر سرعتی حرکت کند خودروی کشیده شده با حفظ فاصله از خودروی کشنده از همان سرعت تبعیت می کند.



شکل ۲۲- عقب افتادن میدان رتور از استاتور در زیر بار

زاویه بین میدان رتور و میدان استاتور را **زاویه گشتاور** می گویند. این زاویه با زیاد شدن بار افزایش می یابد بدون آنکه سرعت سنکرون تغییر کند. بنابراین برای کاهش زاویه گشتاور، جریان تحریک باید افزایش یابد بیشترین گشتاور موتور سنکرون زمانی ایجاد می شود که هر قطب رتور بین دو قطب میدان دوار قرار گیرد زیرا میدان قطب عقبی آن را به شدت رانده و میدان قطب جلویی آن را به شدت جذب می کند. در موتور سنکرون اگر با افزایش بار، زاویه گشتاور به ۹۰ درجه برسد و یا از آن تجاوز کند ممکن است دو حالت پیش بیاید:

الف) اگر اضافه بار خیلی کم و یا موقتی اعمال گردد، لغزش در موتور ایجاد می شود و در صورتی که

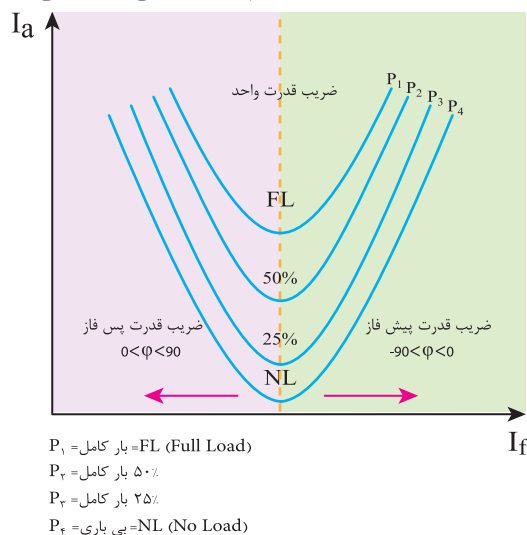
در ساختمان رتور از میله های قفس سنجابی استفاده شده باشد، موتور به حالت آسنکرون در می آید و با کم شدن بار مجدداً موتور به وضعیت سنکرون برمی گردد. ب) اگر اضافه بار خیلی زیاد باشد و یا موقتی نباشد در صورت نداشتن میله های قفس سنجابی، موتور سریعاً از حالت سنکرون خارج شده و می ایستد، که این وضعیت برای موتور سنکرون خطرناک بوده و موجب سوختن آن می گردد. حتی اگر موتور میله های قفس سنجابی داشت، عملکرد طولانی مدت آن در حالت آسنکرون نیز برای موتور ضرر دارد. بنابراین برق موتور سنکرون باید فوراً قطع شود.

به زاویه گشتاور ۹۰ درجه در موتورهای سنکرون زاویه بحرانی می گویند.

## ۱۳ - حالات کاری موتور سنکرون

از آنجایی که جریان تحریک موتور سنکرون در اختیار بهره بردار است، لذا می توان پس از راه اندازی موتور، با تغییرات جریان توان راکتیو دریافتی از شبکه را کنترل نمود.

این تغییرات توان راکتیو نسبت به جریان تحریک مانند حرف لاتین  $V$  (موسوم به منحنی  $V$ ) می باشد.

شکل ۲۳- منحنی  $V$  در موتورهای سنکرون

## خود را بیازمایید



- (۱) زاویه عقب افتادن میدان رتور از میدان استاتور در موتور سنکرون را زاویه ..... می گویند
- (۲) عکس العمل موتور سنکرون بدون میله قفس سنجابی در مقابل اضافه بارهای زیاد چگونه است؟
- (۳) در حالت کاری نرمال موتور سنکرون ، ضریب قدرت ..... و رفتار موتور در شبکه برق همانند عنصر.....(اهمی - سلفی - خازنی) می باشد.
- (۴) اگر در موتور سنکرون جریان تحریک بیش از مقدار نرمال باشد، رفتار موتور در شبکه چگونه است؟
- (۵) برای افزایش ضریب قدرت شبکه برق باید موتور سنکرون را در حالت ..... استفاده کرد.
- (۶) منحنی  $V$  موتورهای سنکرون را رسم نموده و نواحی مختلف کاری در آن را تعیین کنید.

مطابق این منحنی سه حالت کاری برای موتور سنکرون وجود دارد:

**(الف) حالت نرمال:** در این حالت جریان تحریک ،توان راکتیو مورد نیاز را به میزان مصرف داخلی خود موتور تولید می کند و جریان آرمیچر دارای حداقل می باشد لذا از دیدگاه شبکه موتور سنکرون مانند یک عنصر اهمی خالصی عمل می نماید که توان راکتیو دریافتی از شبکه آن صفر است پس ضریب قدرت موتور در این حالت ( $\cos \varphi = 1$ ) واحد می باشد.

**(ب) حالت زیر تحریک:** از آنجا که جریان تحریک در این حالت کمتر از جریان حالت نرمال است بنابراین موتور سنکرون همچون یک عنصر اهمی-سلفی در شبکه ، مصرف کننده توان راکتیو ( $Q$ ) می باشد و بقیه توان راکتیو مورد نیاز خود را از شبکه دریافت می کند.

**(ج) حالت فوق تحریک:** با افزایش جریان تحریک بیش از مقدار نرمال موتور سنکرون ، توان راکتیو ( $Q$ ) تولید شده اضافی به شبکه برق تحویل می شود و بنابراین موتور سنکرون در شبکه رفتار خازنی نشان می دهد.

چون هر منحنی  $V$  موتور سنکرون به ازای بار مشخص و ثابتی بدست می آید لذا موتور در بارهای دیگر دارای یک منحنی متفاوت می باشد. به همین دلیل معمولا سازندگان منحنی  $V$  موتورهای سنکرون را حداقل در بار نامی ، نصف بار نامی و بی باری ارائه می کنند.

ضریب قدرت موتور های سنکرون قابل کنترل بوده و به جریان تحریک آنها بستگی دارد.

## ۱۴ - کاربرد موتور سنکرون

با توجه به جدول (۱) و مقایسه ویژگی های دو موتور القایی (آسنکرون) و سنکرون از موتور سنکرون می توان جهت اصلاح ضریب قدرت شبکه استفاده نمود. به همین علت به موتور سنکرون ، خازن سنکرون هم می گویند. که شرح عملکرد آن در بخش قبلی آمده است.

از دیگر کاربردهای این موتور استفاده از آن در بارهایی می باشد، که نیاز به سرعت ثابت دارند. موتورهای سنکرون به دلیل پیچیدگی ساختمان در مقایسه با موتورهای القایی بسیار گرانتر هستند ولی استفاده از موتورهای سنکرون در توانهای خیلی بالا به صرفه تر است.

موتور های القایی (آسنکرون)	موتور سنکرون
دارای گشتاور راه اندازی می باشد.	گشتاور راه اندازی ندارد (به یک سیستم را اندازی نیاز دارد).
سرعت آن با افزایش بار افت می کند و هرگز در سرعت سنکرون نمی چرخد.	در تمام بارهای ممکن با سرعت سنکرون می چرخد.
به تحریک DC نیاز ندارد.	به تحریک DC نیاز دارد.
ضریب قدرت این موتور همواره پ فاز است.	می تواند در ضریب قدرت های متفاوت پس فاز یا پیش فاز و یا واحد کار کند.
برای گردش بارهای مکانیکی به کار گرفته می شود.	هم برای گردش بارهای مکانیکی و هم به عنوان اصلاح گر ضریب قدرت در شبکه می تواند استفاده شود.

جدول ۱- مقایسه موتورهای سنکرون و آسنکرون

#### پرسش‌های پایان فصل (۴)

- ۱) انواع روش‌های تولید برق، توسط مولد سنکرون را بیان نمائید.
- ۲) چرا با آنکه رتور مولد سنکرون مانند آهنربای دائم عمل میکند، هسته آن را ورقه ورقه می‌سازند؟
- ۳) شکل فیزیکی یک رتور دو قطبی با قطب صاف و رتور با قطب برجسته را ترسیم کنید.
- ۴) چگونه می‌توان ولتاژ خروجی مولد سنکرون را کنترل نمود؟
- ۵) چگونه می‌توان فرکانس خروجی مولد سنکرون را کنترل نمود؟
- ۶) شرایط موازی کردن مولدهای سنکرون را بنویسید.
- ۷) معمولاً از نیروگاه‌های آبی و گازی در چه مواقعی استفاده می‌شود؟
- ۸) ساختمان مولد و موتور سنکرون چه شباهت‌ها و چه تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند؟
- ۹) استفاده از روش راه‌اندازی القایی نسبت به روش خارجی چه مزایایی دارد؟
- ۱۰) چرا به موتور سنکرون، خازن سنکرون می‌گویند؟
- ۱۱) چهار مورد از تفاوت‌های موتور سنکرون و موتور آسنکرون را بیان کنید.

#### مسائل پایان فصل (۴)

- ۱) استاتور یک مولد سنکرون که با اتصال ستاره به بار خروجی متصل است، دارای جریان خط  $173\text{ A}$  بوده و مقاومت هر فاز آن  $0.25\ \Omega$  می‌باشد. چنانچه مقاومت مدار تحریک  $50\ \Omega$  و ولتاژ تحریک رتور  $125\text{ V}$  باشد، تلفات مسی رتور و استاتور را بدست آورید.
- ۲) یک مولد سنکرون توان اکتیو  $354/65\text{ kW}$  را با ولتاژ خط  $2\text{ KV}$  و جریان  $125\text{ A}$  به بار مصرفی می‌دهد چنانچه راندمان ماشین  $0.93$  باشد بدست آورید:
  - الف) ضریب قدرت مولد
  - ب) توان دریافتی مولد
  - ج) تلفات کل مولد
  - د) اگر توان ورودی  $1344\text{ W, DC}$  باشد توان مکانیکی ورودی چقدر است؟

