

ژنراتور سنکرون

ساختمان ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون یا الترناتورها، ماشین‌های سنکرونی هستند که برای تبدیل توان مکانیکی به توان الکتریکی AC به کار می‌روند. برای تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها (به عبارت دیگر تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی) از ژنراتورهای سنکرون سه فاز متناوب استفاده می‌شود. نوع ساختمان مورد استفاده در ژنراتورهای سنکرون بستگی به نوع چرخاننده آن دارد. بر اساس انواع چرخاننده‌ها، ژنراتورها را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- **توربوژنراتورها:** ژنراتوری که گرداننده آن توربین بخار یا گازی است. بازده توربین بخار در سرعت‌های زیاد بالا می‌باشد، بنابراین ماشین‌های سنکرونی که بوسیله توربین‌های بخار می‌چرخند پرسرعتند. سرعت زیاد محور ایجاب می‌نماید که ماشین با قطر کم آرمیچر، جهت محدود نمودن نیروی گریز از مرکز، طراحی گردد.

۲- **هیدرو ژنراتورها:** ژنراتوری که گرداننده آن توربین آبی باشد. توربین‌های آبی انواع مختلفی دارد. نوع توربین مورد استفاده بستگی به ارتفاع سد دارد. اگر ارتفاع آب زیاد باشد سرعت توربین زیاد و نوع آن پلتن است. و اگر ارتفاع آب کم باشد توربین **فرانسیس و کاپلان** است. سرعت توربین‌های آبی کم و محور این ماشین‌ها معمولاً به صورت عمودی قرار می‌گیرند.

۳- **دیزل ژنراتورها:** ژنراتوری که گرداننده آن موتور دیزل باشد. موتور دیزل ماشین کم سرعتی است که مولد سنکرون مربوطه باید با قطب برجسته باشد.

ژنراتورها در حالت کلی به دو جزء اصلی ثابت و متحرک تقسیم می‌گردند. قسمت ثابت آن از بدنه (قاب) استاتور، هسته و سیم‌پیچ‌های استاتور تشکیل شده است. در ژنراتور سنکرون یک جریان DC به سیم‌پیچ قسمت گرداننده اعمال می‌شود، که میدان مغناطیسی رتور را تولید می‌کند. رتور ژنراتور توسط یک محرک اولیه به گردش در می‌آید و به این ترتیب یک میدان مغناطیسی دوار درون ماشین ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی دوار در سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور یک ولتاژ سه فاز القا می‌کند. به طور کلی اصطلاح سیم‌پیچ‌های میدان به سیم‌پیچ‌های اطلاق می‌شود که میدان مغناطیسی اصلی ماشین را تولید می‌کند و اصطلاح سیم‌پیچ‌های آرمیچر به سیم‌پیچ‌های اطلاق می‌شود که ولتاژ اصلی ماشین را تولید یا میدان مغناطیسی در آنها القا می‌شود. در حقیقت تجربیات طولانی در مورد ساختمان و کار ماشین‌های سنکرون نشان می‌دهد که بلحاظ اقتصادی و فنی مناسبتر است که قطب‌های میدان با جریان مستقیم تحریک و بر روی قسمت گردان قرار گیرند و سیم‌پیچی آرمیچر بر روی قسمت ساکن قرار داده شود.

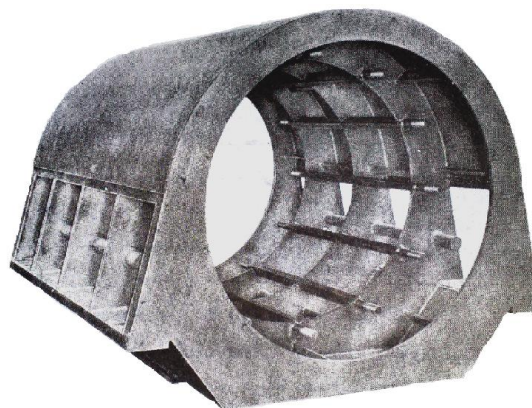
مزایای داشتن آرمیچر ساکن و سیستم تحریک گردان عبارتست از :

- ۱- جریان خروجی می تواند مستقیماً از ترمینال های ثابت موجود در استاتور و بدون عبور از کنتاکت های جاروبک به مدار بار هدایت شود.
- ۲- در این حالت عایق نمودن سیم پیچ آرمیچر ساکن در ولتاژهای AC زیاد که ممکن است دارای ولتاژ 30 KV یا بیشتر باشد ، ساده تر است.
- ۳- کنتاکت های لغزان یا حلقه های لغزان به مدار ولتاژ کم و میدان DC با توان کم منتقل می شوند که بنابراین به سهولت عایق می گردند.
- ۴- سیم پیچ های آرمیچر را می توان به سادگی و محکم بست تا در مقابل هر گونه تغییر شکلی که توسط فشارهای مکانیکی ناشی از اتصال کوتاه ، ایجاد می شود ، حفظ کند.

استاتور (Stator)

۱- قاب استاتور^۱ :

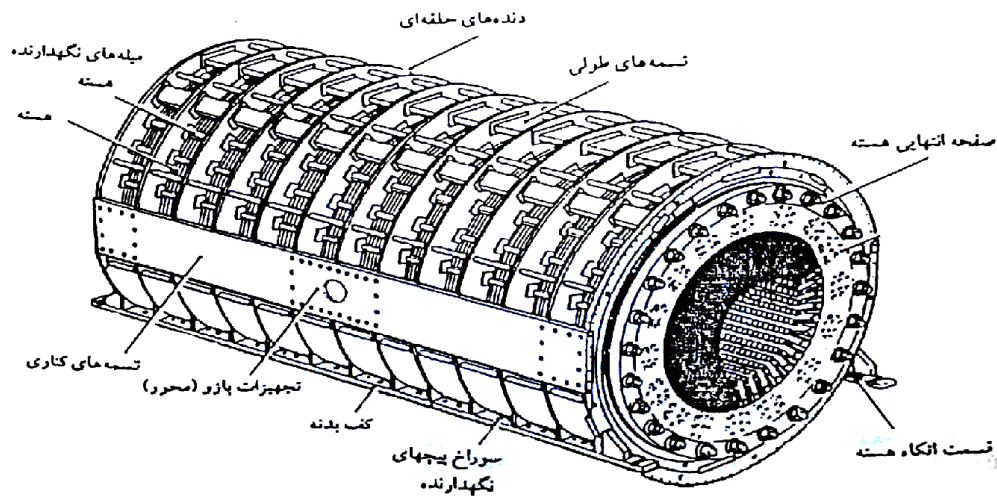
در ماشین های DC بدنه بیرونی (یوغ) برای عبور شار مغناطیسی به کار گرفته می شود ولی در آلترناتورها از آن برای نگهداشتن سیم پیچ ها و محافظ های آرمیچر به کار می رود. آلترناتورهای بزرگ و سرعت کم دارای بدنه هایی هستند که به علت آسانی در ساخت به صورت قسمت های ریخته گری شده ساخته شده اند . امروزه به جای استفاده از ریخته گری ، عموماً از صفحه های فولادی نرمی ساخته شده اند ، که به طریقی به هم جوش خورده اند. به منظور محکم نمودن قسمت های مختلف بدنه ، از میله های بزرگی که در داخل قاب استاتور نصب می شوند ، استفاده می شود.



در ژنراتورهای با قدرت بالا در داخل بدنه (قاب خارجی) قفسه داخلی دیگری به شکل مدور ساخته می شود که همراه با شیارهای محوری است . این شیارها ، بدنه قاب را از قسمتهایی جدا می کند که از

^۱ - Stator Core frame

میان آنها ، هیدروژن در کانال شعاعی در هسته استاتور جاری می شود و در میان آن ، خنک کننده های گازی که در قاب جا داده شده اند ، گردش می کند .



۲- هسته استاتور^۱

وظیفه هسته استاتور ایجاد مسیرهای بسته برای فوران ایجاد شده توسط میدان میدان می باشد. از ورقه هایی از جنس آهن مغناطیسی خاص یا آلیاژ فولاد (فولاد سیلیکون) ساخته شده است . هسته ها جهت حداقل کردن تلفات ناشی از جریان های گردابی ورقه ، ورقه ساخته می شوند. این ورقه ها به صورت حلقه های کامل برای ماشین های کوچک و یا قطعه هایی از حلقه برای ماشین های بزرگ ساخته شده اند. ضخامت ورقه های هسته ای که اکنون در ساخت توربوژنراتورهای بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد ، عموماً بین ۰/۳۳ تا ۰/۳۵ میلیمتر است. در این ژنراتورها صفحات هسته را بسته های ورقه ای فشرده شده ، ایجاد می کنند. این بسته ها با ضخامت ۳/۸۱ تا ۶/۳۵ سانتیمتر توسط مجراهای شعاعی تهویه به عرض ۵ تا ۱۰ سانتیمتر مجزا شده اند تا گذرگاهی برای هیدروژن بگذارند. در بعضی از طرح ها ، هسته استاتور به صورت محوری خنک می شود که در این صورت برای عبور هیدروژن سوراخ هایی در ورقه ها ایجاد می کنند. هسته استاتور مسیری با رلوکتانس مغناطیسی پایین جهت عبور شار مغناطیسی فراهم می سازد. قبل از آنکه سیم بندی روی هسته سوار شود ، آزمایش های استاتیکی جهت ارزیابی تقریبی هسته به عمل می آید . شدت شار در هسته ، توسط بوبین هایی اندازه گیری شده و اشباع

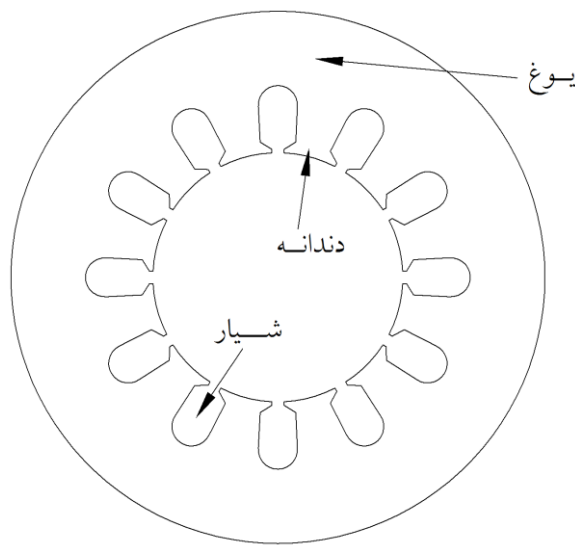
^۱ - Stator Core

هسته در آن سطح نیز بدست می آید. قطر داخلی استاتور بوسیله گشتاور در حجم (Torque Per Volume) و اثر لختی GD^2 تعیین می شود .

هسته استاتور از دو قسمت تشکیل شده است :

۱. یوغ (Yoke) : قسمتی است که بین شیار و قطر خارجی قرار می گیرد.

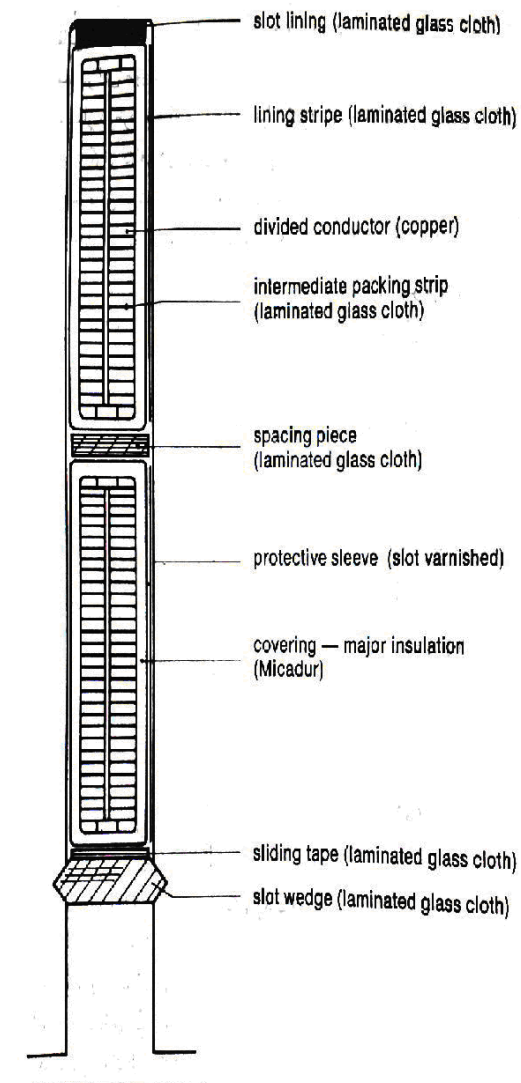
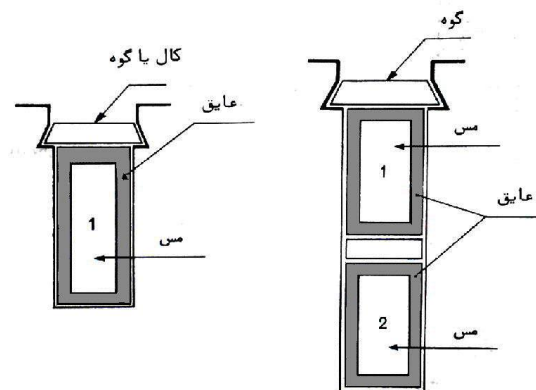
۲. دندانه ها (Teeth) : قسمتهایی از هسته که بین شیارها قرار می گیرد.



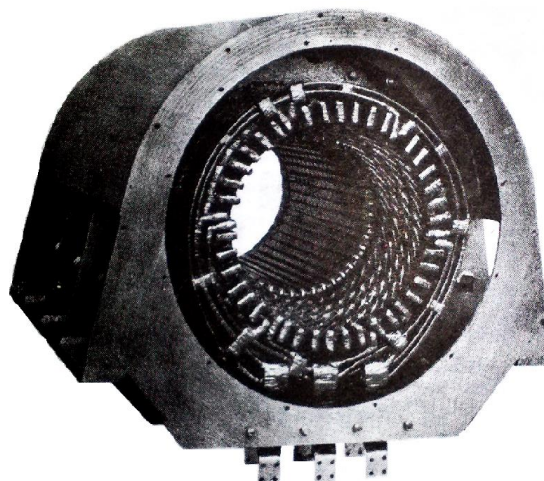
۳- سیم پیچ های استاتور^۱

سیم پیچ های استاتور از نوارهای مسی تشکیل می گردند و برای عایق کاری آنها از نوارهای عایقی آغشته به لاک استفاده می شود. این نوارهای عایقی به دور شمش های مسی پیچیده شده و تحت شرایط خلا در اثر حرارت پرس می شوند. در نهایت ، نوارهای عایقی پرس شده با شمش های مسی ، یک کلاف عایق کاری شده کاملاً محکمی را تشکیل می دهند. سپس این کلاف ها در شیارهای استاتور جاسازی می شوند و به وسیله گوه (چوب های مخصوص مخروطی شکل) در شیارها محکم می گردند. این کلاف ها در انتها به هم متصل می شوند و تشکیل حلقه های انتهایی در هر طرف هسته را می دهند. این حلقه های انتهایی بوسیله برنج ، کاملاً محکم ، و با مواد عایقی ، عایق کاری می شوند تا در مقابل نیروهای ناشی از جریان های اتصال کوتاه و یا اتفاقات دیگر مقاوم باشند. در ژنراتورهای جدید ، سیم پیچ ها از لوله های مسی ساخته می شوند تا با عبور جریان آب در داخل آنها بتوان ژنراتور را خنک نمود .

در شکل‌های زیر انواع مختلفی از سیم‌پیچ‌های استاتور که در داخل شیار قرار گرفته‌اند را همراه با توضیحات نشان می‌دهد.

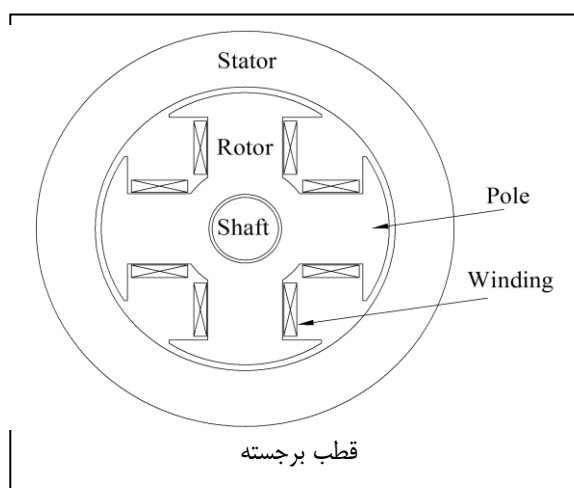
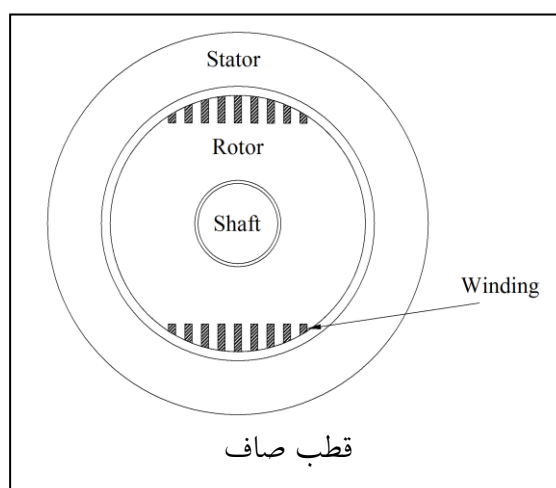


همچنین شکل زیر طرح کاملی از استاتور به همراه بدنه، سیم‌پیچ و باس‌های خروجی را نشان می‌دهد.



روتور (Rotor)

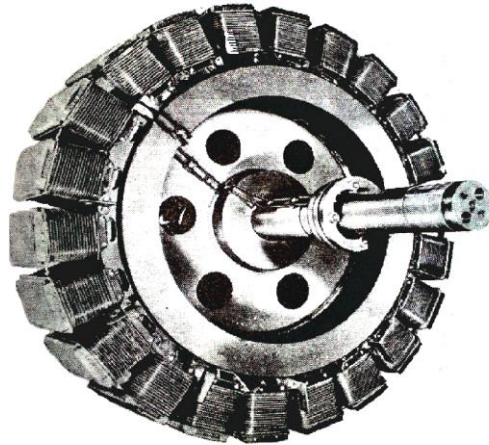
رتور ژنراتورها وظیفه دارند تا علاوه بر تحمل سیم‌پیچ‌های تحریک، یک مسیر مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی کم را برای شار مغناطیسی مهیا نموده و گشتاور نامی را از توریین به عکس‌العمل الکترومغناطیسی در فاصله هوایی منتقل نماید. فولاد تنها ماده‌ای است که توانائی برآورده ساختن این نیازها را دارد. رتور ژنراتور از قسمت‌های متعددی تشکیل شده است که در اینجا به قسمت‌های آن اشاره می‌شود. به طور کلی رتور به دو نوع قطب صاف و قطب برجسته تقسیم می‌گردد.



۱- هسته روتور

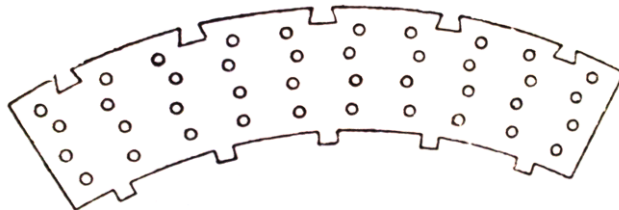
همانطور که بیان شد بر اساس شکل دو نوع روتور در آلترناتور داریم

۱-۱- قطب برجسته (Saleint Pole)

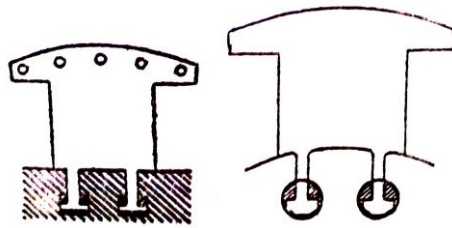


ماشین‌ها با روتور قطب برجسته از اجزای زیر تشکیل شده است .

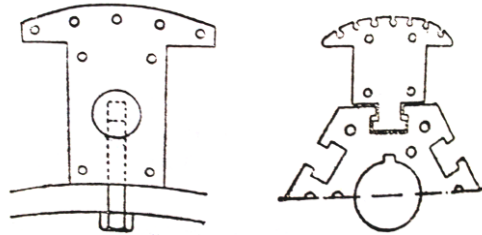
آ - یوغ : یوغ مغناطیسی معمولاً در ماشین‌های کوچک و وقتی که قطر آن طوری باشد که بتوان آن را یک تیکه حمل و نقل کرد ، به صورت ریخته می‌باشد. یوغ از فولاد ریخته‌ای مغناطیسی ساخته می‌شود و سپس روی چرخ روتور سوار می‌گردد. اگر طول ماشین بزرگ باشد می‌توان از دو چرخ استفاده کرد . در مولدهای خیلی بزرگ یوغ مورق ساخته می‌شود. در شکل زیر یک قطعه از یوغ نشان داده شده است .



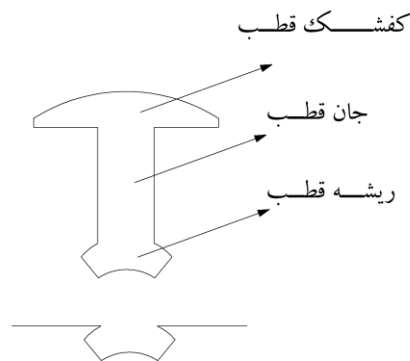
یوغ مغناطیسی مورق با قطعاتی به ضخامت ۲ تا ۳ میلیمتر و طول مماسی ۲/۵ متر ساخته می‌شود. در قطعات یوغ سوراخ‌هایی تعبیه می‌شود . پیچ‌هایی که به ورق‌ها فشرده می‌شود آنها را در جای خود نگهداشته و نیروهای مماسی را می‌گیرد . پس از آنکه یوغ کاملاً سوار شد به محور روتور ثابت می‌شود. در شکل زیر نحوه قرار گیری قطب در یوغ را نشان می‌دهد . در مولدهای توربین آبی با سرعت بین ۲۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه برای ثابت کردن قطب‌ها به یوغ از زائده دم چلچله‌ای یا سرچکشی استفاده می‌شود .



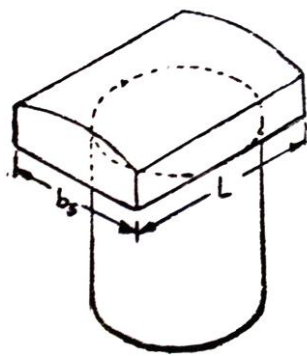
در حالتی که قطب‌ها خیلی عریض باشند از زائده‌های دم چلچله‌ای دو گانه استفاده می‌شود .



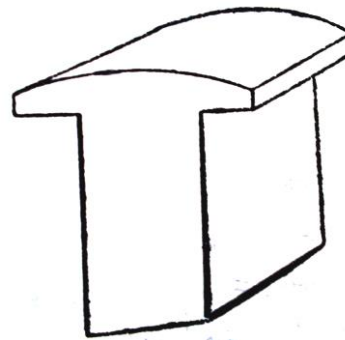
ب - قطبها : قطبها می‌توانند یکپارچه یا مورق باشند . قطب‌های مورق در تمام ماشین‌های کم سرعت و یا با سرعت متوسط بکار می‌روند. در زیر اجزای قطب رتور ماشین قطب برجسته را نشان می‌دهد.



در ماشین‌های قطب برجسته به خاطر ریشه قطب ، نیروی گریز از مرکز قادر به کندن آن نمی‌باشد. قطب‌ها به صورت‌های مختلف بسته یا ثابت می‌شوند . در مولدهای وصل به توربین آبی با سرعت محیطی تا ۵۰ متر بر ثانیه قطب‌ها به یوغ پیچ می‌شوند . مولدهای قطب برجسته‌ای که سرعت نسبتاً بیشتری دارند دارای تعداد قطب کمتر و قطر کوچکتر می‌باشد . بدنه رتور را در چنین حالتی می‌توان فولاد ریخته‌ای یکپارچه ساخت و یا ممکن از تعدادی صفحات فولادی ضخیم که مستقیماً به محور خاربندی شده‌اند ، تشکیل گردد. کفش قطب‌ها مورق ساخته می‌شود تا از تلفات ناشی از ضربان شار و هارمونیک‌های بالاتر اجتناب شود. سطح مقطع قطب‌ها ممکن است مستطیلی یا مدور باشد . سطح مقطع مدور را در صورتی می‌توان بکار برد که قطب‌ها یکپارچه باشند .



قطب مدور



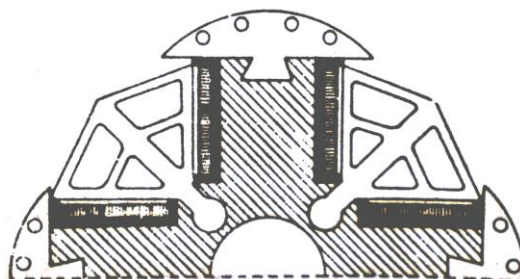
قطب مستطیلی

قطب‌های مدور بر مستطیلی دارای مزایای زیر می‌باشند :

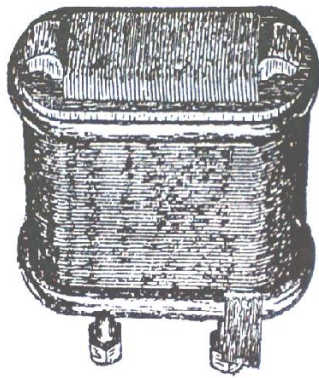
- طول حلقه متوسط سیم‌پیچی با قطب‌های مدور حداقل است و این هزینه مس و تلفات مسی تحریک را کاهش می‌دهد.

- سطح کل سیم‌پیچی مواجه با هوا یکنواخت است و بنابراین تهویه بهتر خواهد بود.

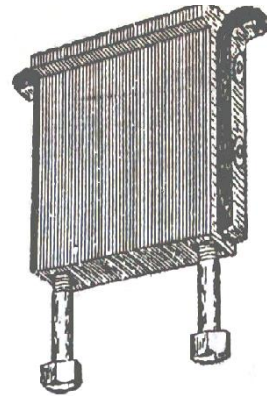
- پیچک‌های میدان با قطب‌های مدور شکل استوانه‌ای داشته و بنابراین در اثر نیروهای گریز از مرکز بسادگی تغییر شکل نمی‌دهند . در حالی که در پیچک‌های مستطیلی شکل در اثر نیروی گریز از مرکز بسادگی متورم شده و برای نگهداری آنها در جای خود باید از بلوکهای مخصوصی استفاده نمود که در شکل زیر نشان داده شده است . همچنین قطب برجسته بدون سیم‌پیچی و قطب برجسته که بر آن سیم‌پیچ تحریک قرار گرفته است را نشان می‌دهد.



قطب برجسته به همراه بلوک‌های نگهدارنده

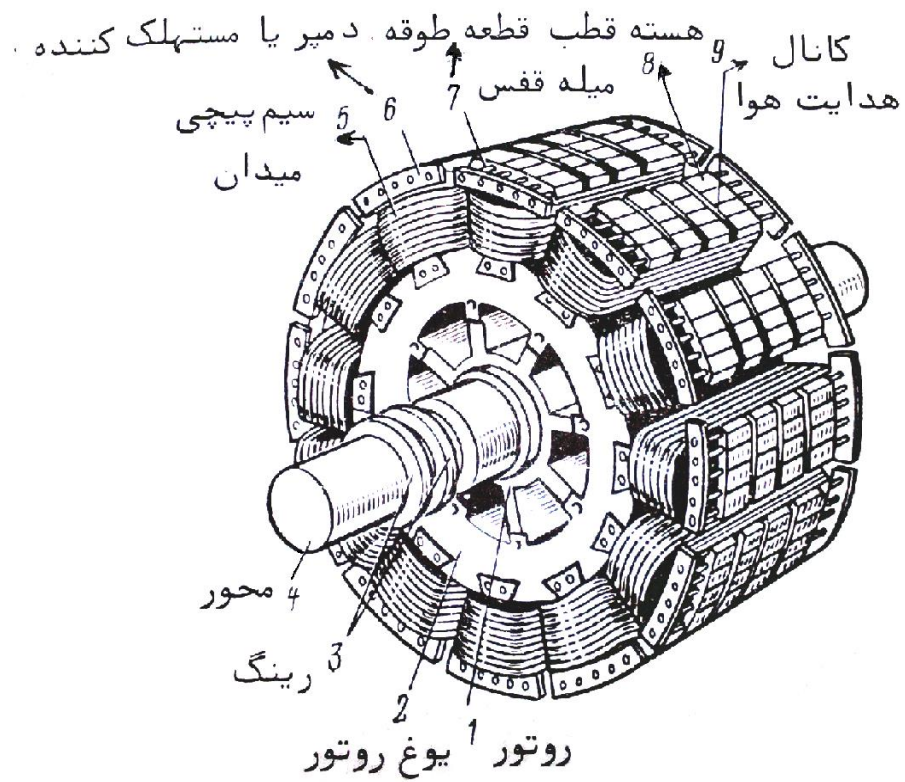


قطب برجسته همراه با سیم پیچی

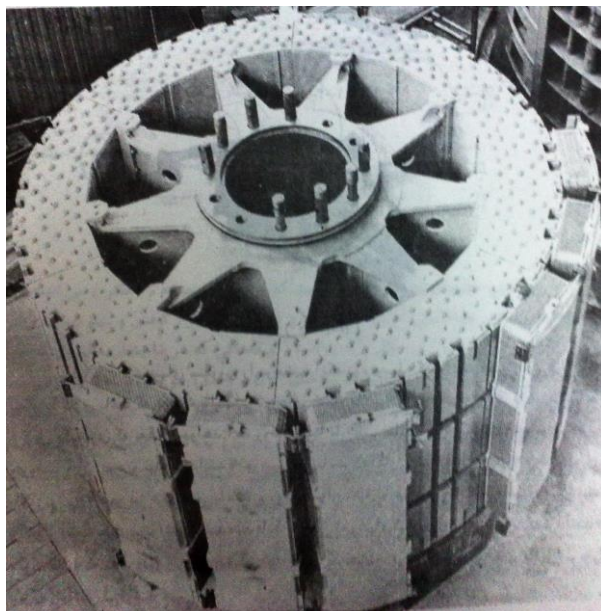


قطب برجسته بدون سیم پیچی

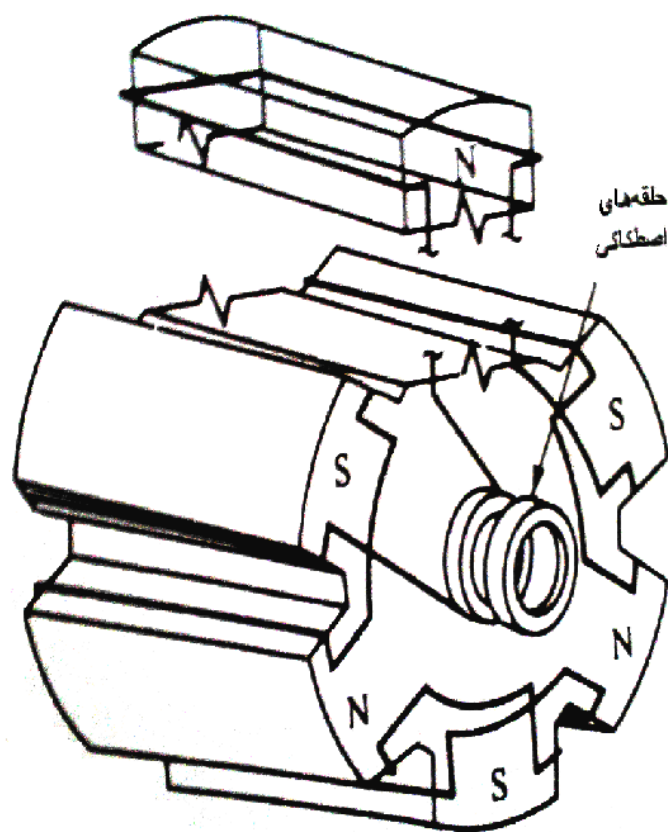
شکل زیر نشان دهنده یک روتور قطب برجسته به همراه تمام جزئیات می باشد .



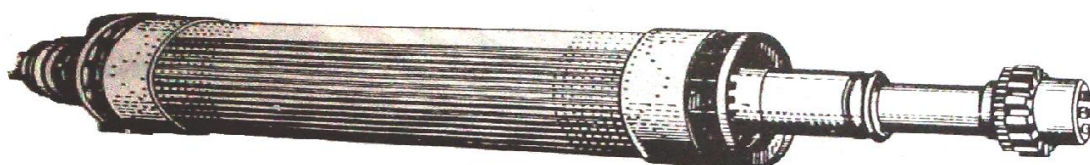
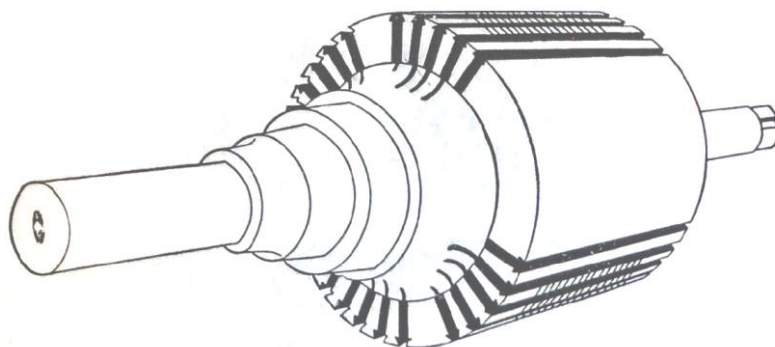
شکل زیر نحوه قرار دادن قطب‌های برجسته را در روی بدنه گردان روتور نشان می‌دهد .



همینطور شکل زیر یک روتور قطب برجسته ۶ قطبی همراه با حلقه‌های اصطکاکی را نشان می‌دهد .

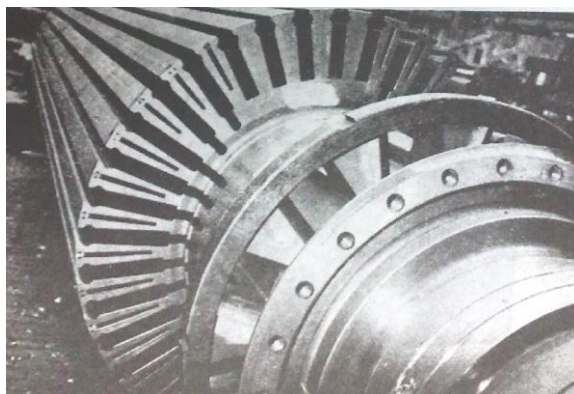


۱-۲- قطب صاف (cylindrical Pole)



ساختمان رتور ژنراتور پیچیده تر از استاتور می باشد. با توجه به اینکه رتور ژنراتورهای مدرن با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می چرخند ، لذا نیروی گریز از مرکز بسیار زیادی بر روی رتور ایجاد می شود.

روتور در حقیقت یک ماده الکترومغناطیسی است و برای این که دارای قدرت مغناطیسی کافی باشد ، باید از سیم پیچ آن جریان زیادی عبوری کند. عبور جریان از سیم پیچ های رتور باعث ایجاد حرارت می شود که نباید از حد مجاز فراتر رود. در غیر این صورت ، اشکالاتی را در عایق کاری بوجود می آورد. برای کاهش درجه حرارت ، می توان سطح مقطع سیم ها را بزرگتر انتخاب نمود. ولی وقتی سطح مقطع سیم پیچ ها بزرگ شود ، باید شیارهای پهن تر و عمیق تری را در درون رتور ایجاد نمود که این عمل ، مقاومت مکانیکی روتور را کاهش می دهد. این مسئله را می توان با بکار بردن حداکثر مس در سیم پیچ های روتور و با طراحی خوب و دقت زیاد در ساختمان روتور حل نمود.

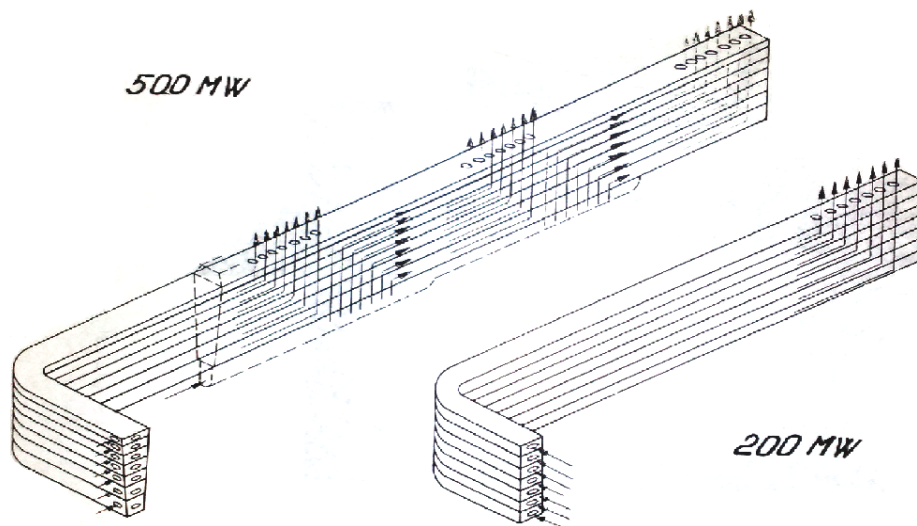


روتور در ابتدا به صورت یک شمش فولادی است که دارای مقداری نیکل ، کرم ، مولیبدن و وانادیوم می باشد . فولاد مذکور ، سخت و قابل تراش است و خواص مغناطیسی خوبی دارد که در کارگاه های مخصوص ، عملیات فلزکاری و ماشینکاری روی آن انجام می شود و سپس کارهای تراشکاری نهائی روی آن انجام می شود . در هنگام ساختن روتور ، معمولاً سوراخی در امتداد محور روتور از یک انتها به انتهای دیگر بوجود می آورند که با این عمل ، سطح داخلی رتور را می توان مورد بازرسی قرار داد. این عمل به کمک دستگاهی بنام بروسکوپ^۱ انجام می شود . سپس برای نصب سیم پیچی و عبور سیال خنک کننده ، شیارهایی در روی روتور ایجاد می شود. البته شیار زنی باعث تضعیف روتور می گردد. این کار یکی از علل نواسانات روتور با فرکانس دوبرابر می باشد که همیشه در ماشین های دوقطبی وجود دارد. طراحی شیارها از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است و باید با دقت خاصی طراحی و انجام شود. زیرا باید میان مساله لزوم جریان زیاد سیم پیچی و موضوع استواری و استحکام روتور ، توازن مناسب و مطلوبی برقرار شود. این شیارها بیش از ۶۸ تا ۷۴ درصد سطح روتور را اشغال می کنند . لیکن در بیشتر طرح ها ، شیارهای کمکی برای برابر سازی سختی روتور در تمامی سطوح ایجاد می شود. این شیارها در بهبود تبرید روتور موثر است .

^۱-Boroscope

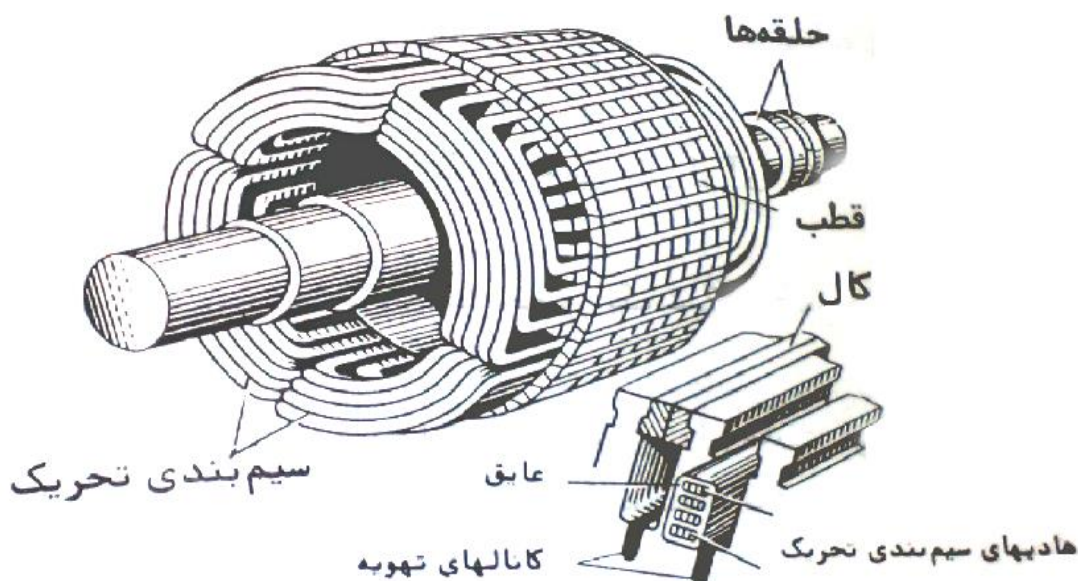
۲- سیم‌پیچی روتور^۱

سیم‌پیچ‌های هر قطب از سیم‌های مسی که روی آن آب نقره می‌دهند، استفاده می‌شود. سپس سیم‌پیچ‌های هر قطب در چارچوب‌های مستطیلی شکل قرار می‌گیرند تا آماده جایگذاری در شیارها شوند. قبل از قرار دادن هادی‌ها در داخل شیارها، باید سطح داخلی شیارها را با آزیست پیچیده شده با عایق میکا، نوارهای شیشه‌ای، یا دیگر عایق‌های رده B فرش نمود. سپس هادی در شیار جای داده شده و فشرده می‌شود و توسط جداکننده‌های عایقی (مثلاً عایق میکا) از هادی‌های دیگر عایق می‌گردد. امروزه در روتورهای بزرگ، ترکیبی از سیم‌های توخالی و شیارهای با سوراخ‌هایی جهت عبور و گردش گاز خنک کننده از داخل سیم‌های هادی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه روتورها با سرعت زیاد می‌چرخند، نیروی گریز از مرکز سعی دارد تا سیم‌پیچ‌ها را از داخل شیار خارج نماید. لذا سیم‌پیچی توسط حلقه‌های نگهدارنده‌ای به شیارها محکم می‌شوند. سپس روتور را در معرض درجه حرارت بالا قرار می‌دهند تا اصطلاحاً پخته شود. پس از خنک شدن روتور عایق بیشتری روی بالای هادی‌ها و روی دهانه دم چلچله‌ای قرار می‌دهند. در نهایت برای مقابله با نیروی گریز از مرکز، گوه‌های T شکل را در داخل شیارها و روی سیم‌پیچ‌ها نصب می‌کنند تا هادی را به صورت استوانه‌ای در جای خود نگه دارد. در اغلب موارد، یک میله مسی، زیر هر گوه قرار می‌دهند که بخشی از سیم‌پیچ میرا کننده را جهت بهبود بخشیدن رفتار ژنراتور تحت شرایط بار نامتعادل تشکیل می‌دهد. شکل زیر دیاگرام سیستم تهویه مستقیم سیم‌پیچی روتور ۵۰۰ مگاوات و ۲۰۰ مگاوات را نشان می‌دهد.



^۱-Rotor Winding

همچنین در شکل زیر یک روتور قطب صاف سیم‌پیچی شده با تمام جزئیات آن نشان داده شده است .



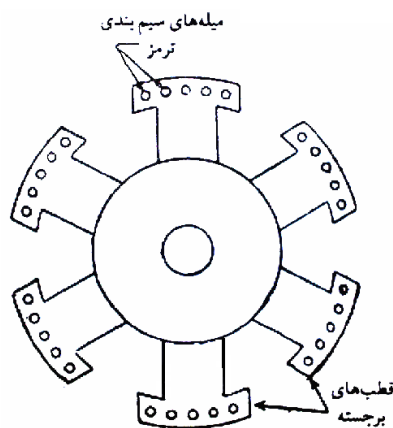
۳- حلقه‌های نگهدارنده انتهائی سیم‌پیچی

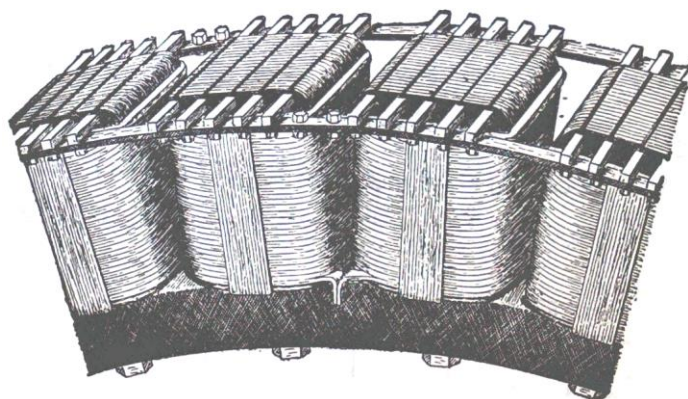
چنانچه سیم‌پیچ‌های انتهائی روتور به وسیله حلقه‌های وزین نگهداری کننده با استقامت کششی بالا نگهداری نشوند ، در سرعت کار عادی روتور ، سیم‌پیچ‌های آن از جای خود کنده شده و به بیرون پرتاب می‌شوند. بدین منظور از حلقه‌هایی استفاده می‌شود که در خارج شیارها و در قسمت انتهائی روتور به وسیله یک رینگ انتهائی از فولاد ریخته‌گری شده نیکل- کرم دار غیر مغناطیسی ساخته می‌شوند. (گرچه در موارد معدودی هنوز از فولاد مغناطیسی هم استفاده می‌شود) . این حلقه‌ها که از نزدیک روی سیم‌پیچ‌های انتهائی عایق شده ، قرار می‌گیرند ، در هر انتهای بدنه روتور بر روی شیارهایی نصب می‌شوند ، به طوری که دو انتهای بیرونی روی صفحه‌های فولادی مناسبی واقع می‌شوند. البته همان دقتی که حین ساخت بدنه روتور مراعات می‌شود ، باید در مورد حلقه‌ها نیز بکار گرفته شود ، زیرا حلقه‌ها باید بتوانند نه تنها نیروی اعمال شده بر سیم‌پیچی انتهای رتور را تحمل کنند ، بلکه نیروی از هم پاشی خودش را نیز (که به میزان بسیار زیادی است) تحمل نمایند. لازم به ذکر است که حلقه‌های نگهدارنده در تمامی مراحل ساخت مورد بررسی قرار می‌گیرند و برش‌های آن تجزیه و تحلیل می‌شود .

۴- سیم پیچ های میرا کننده (Damper Winding)

در ژنراتورهای قطب برجسته ، کفشک قطب های اغلب الترناتورها برای نصب میله های مسی سوراخ یا شیار دار شده اند . این سیم پیچ ها که قفس سنجابی نامیده می شوند با استفاده از حلقه های مسی ضخیم در دو انتها اتصال کوتاه شده اند . این خفه کن ها برای جلوگیری از نوسانات آنی ژنراتور مفید می باشد و در موتور سنکرون برای فراهم آوردن گشتاور راه اندازی به کار می رود .

معمولاً توربو ژنراتورها این سیم پیچ ها را ندارند (به جز در حالت خاصی که به عمل سنکرون کنندگی کمک می کند) زیرا قطب های میدان خود به صورت سیم پیچ های میرا کننده عمل می کنند . تحت شرایط عادی کاری از این سیم پیچ ها هیچ جریانی عبور نکرده زیرا رتور با سرعت سنکرون کار می کند و از طرفی این سیم پیچ ها در حالت عدم تعادل بار ولتاژهای متعادل سه فاز را ثابت نگه می دارند . در برخی از ماشین های قطب برجسته علاوه بر سیم پیچ های میرا کننده ، سیم پیچ دیگری بنام کلار (Collar) نیز داریم که در گلوئی هر قطب یا زیر کفشک هر قطب اتصال کوتاه می شوند و بیشتر جهت گذرایی می باشد . شکل های زیر مکان نصب میله های دمپر و همچنین قطب هایی که میله های میرا کننده بر روی آن نصب شده است ، را نشان می دهد .





۵- حلقه‌های لغزان^۱

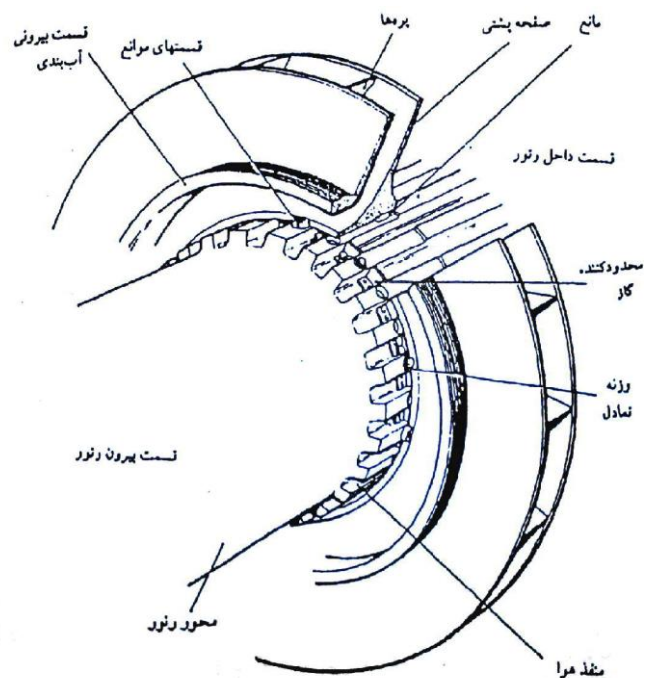
جریان روتور بوسیله حلقه‌های لغزان که از فولاد مرغوب ساخته می‌شود، جمع می‌گردد. این حلقه‌ها روی یک غلاف عایق شده سخت که به بوش فولادی متصل است، منقبض می‌گردند و سپس قسمت‌های روی هم سوار شده، بر روی محور روتور پرس می‌شوند. حلقه‌های لغزان همراه با نگهدارنده جاروبک، بین یاتاقان‌های خارجی ژنراتور و تحریک کننده قرار می‌گیرند. در ژنراتورهای بزرگ از دو یا چهار حلقه لغزان می‌توان استفاده کرد که به ازای هر حلقه، تعدادی جاروبک برای انتقال جریان لازم است.

سطوح حلقه‌های لغزان معمولاً شیار مارپیچی خورده‌اند تا به توزیع یکنواخت جریان در سطوح تماس با جاروبک و نیز به خنک شدن آن کمک کند. هوای خنک‌کننده در یک مدار بسته یا همراه با سیستم تهویه تحریک کننده اصلی است و یا به طور مستقل توسط یک فن که روی شافت روتور قرار دارد، ایجاد می‌شود.

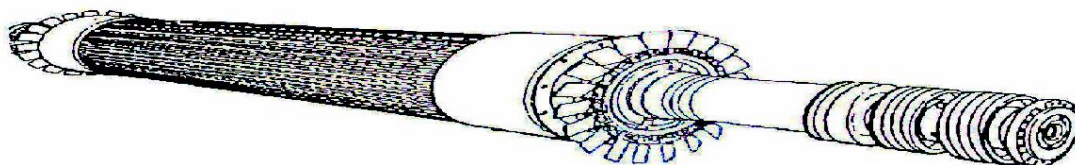
۶- فن‌های واقع بر روتور

به منظور به چرخش در آوردن هیدروژن خنک‌کننده از میان استاتور و تجهیزات ژنراتور، از فن‌هایی واقع بر روی روتور استفاده می‌شود. این فن‌ها در دو طرف محور روتور نصب می‌گردند و هر کدام، وظیفه تهویه نصف طول ژنراتور را بر عهده دارند. این فن‌ها به دو نوع گریز از مرکز (شعاعی یا سانتریفوژ) و جریان محوری ساخته می‌شوند که در شکل زیر نشان داده شده‌اند.

^۱ - Retaining Ring

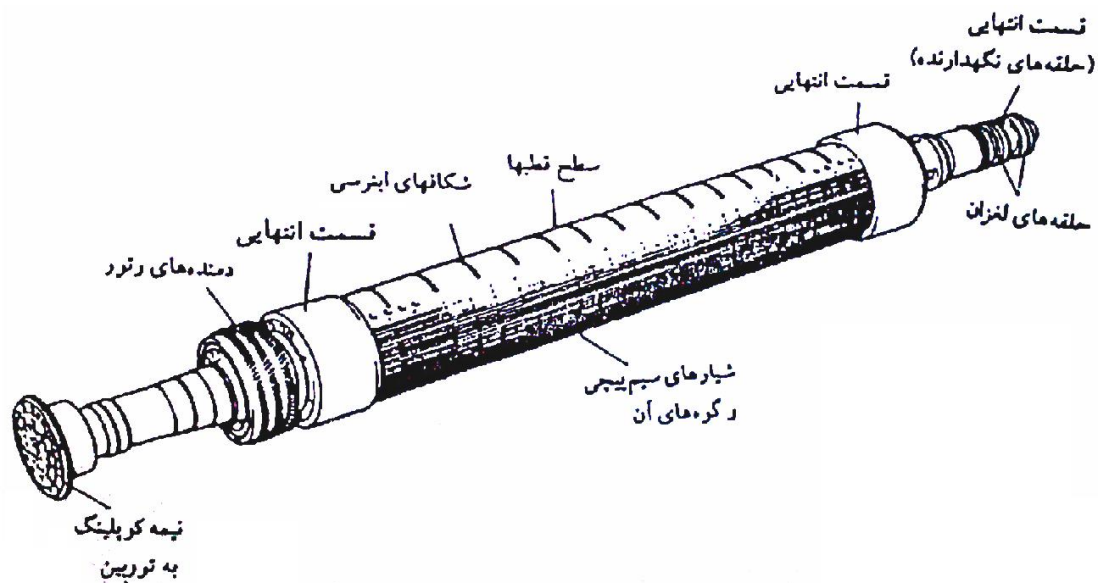


فن واقع بر روتور از نوع گریز از مرکز



فن واقع بر روی روتور از نوع جریان محور به همراه حلقه‌های نگهدارنده

در نوع گریز از مرکز ، پره‌های زیادی در یک سیستم حلقه مانند قرار می‌گیرند ، ولی در نوع جریان محوری ، پره‌های ملخی شکل بر روی محور روتور نصب می‌شوند. فاصله نوک پره‌های مقابل از یکدیگر (قطر خارجی واقع بر نوک پره‌های مقابل) باید از قطر داخلی استاتور بیشتر باشد تا پس از قرار گرفتن روتور در داخل استاتور ، پره‌ها سطح مقطع روتور را به طور کامل بپوشانند. با توجه به اینکه این فن‌ها از شرایط ایده‌آل عملکرد به دور هستند ، لذا از پره‌های راهنمای ثابت برای کاهش جریان گردابی هوا استفاده می‌شود . همچنین کاهش صدای این فن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار نمی‌باشند ، زیرا بدنه خارجی استاتورها مجهز به موانع انتشار صدا هستند. در شکل زیر اجزای کلی روتور یک ژنراتور از قبیل شیارهای سیم‌پیچی ، گوه‌ها ، سطح قطب ، پره‌های انتهائی روتور ، حلقه‌های لغزان و حلقه‌های نگهدارنده نشان داده شده است.



روتور باید نسبت به محورش متقارن و یکنواخت باشد. برای انجام این عمل باید وزنه های متعادل کننده نصب شود. این وزنه ها به گونه ای نصب می شوند که روتور، در سرعتی به مقدار ۱۵٪ بیشتر از سرعت نامی بچرخد و هیچ گونه نوسانی در روتور بوجود نیاید. در شکل زیر یک نمونه روتور قطب صاف، همراه با فن هایی از نوع جریان محور و حلقه های نگهدارنده که مربوط به یک واحد نیروگاهی در نیروگاه مشهد است، نشان داده شده است.



عایقکاری محور روتور و مجموعه یاتاقانها

هنگامی که ژنراتور کار می کند همیشه مقدار مشخصی عدم توازن مغناطیسی در ماشین وجود دارد که این موضوع، منجر به القاء ولتاژ کمی در بدنه و محور روتور می شود. چنانچه این ولتاژ، محدود نشود جریان شدیدی را از مدار آهنی با امپدانس کم (متشکل از بدنه روتور، مجموعه یاتاقانها و آب بندی، قسمت کاسه نمد و شاسی، و صفحه پایه ژنراتور) خواهد گذراند. چنین جریانی می تواند صدمه جدی به سطوح یاتاقانها و روغن روانکاری وارد آورد. جریان شفت به وسیله عایق محکمی در محل لازم

برای عایق‌بندی یاتاقان‌ها ، آب‌بندی محور ، پاک‌کننده‌های روغن و شبکه لوله‌هایی که در بدنه ژنراتور وجود دارد ، انجام می‌شود. روشهای متعددی برای این منظور وجود دارد و آن که متداولتر است ، عایق‌کاری قسمت خارجی مجموعه یاتاقان‌ها است. در این روش ساخت ، هنگامی که مجموعه یاتاقان‌ها تکمیل شد ، مقاومت الکتریکی بین محور روتور و بدنه ژنراتور باید آنقدر زیاد باشد که امکان عبور جریان‌های محوری پدید نیاید . در زیر شکل‌هائی از استاتور و رتور یک ژنراتور قطب برجسته مربوط به یک هیدروژنراتور و رتور یک ژنراتور قطب صاف مربوط به یک توربوژنراتور نشان داده شده است .

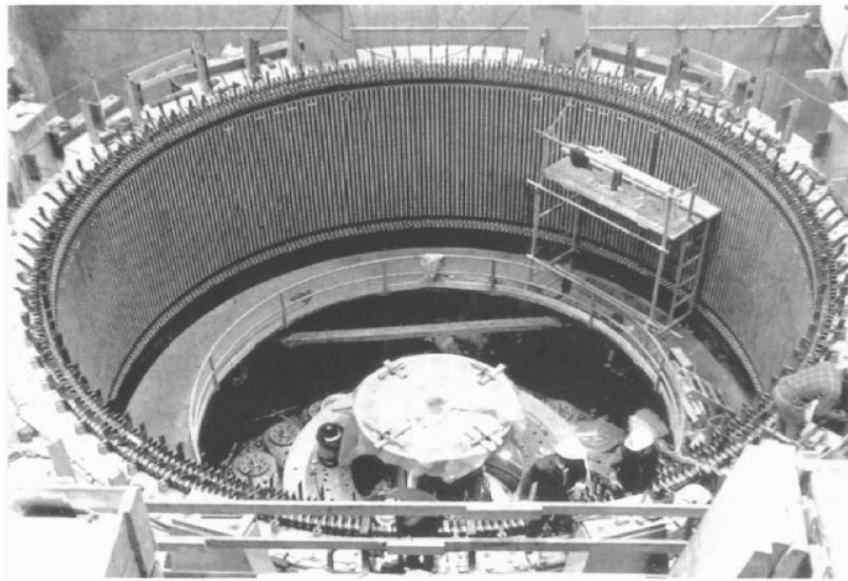


Figure 16.2a
Stator of a 3-phase, 500 MVA, 0.95 power factor, 15 kV, 60 Hz, 200 r/min generator. Internal diameter: 9250 mm; effective axial length of iron stacking: 2350 mm; 378 slots.
(Courtesy of Marine Industrie)

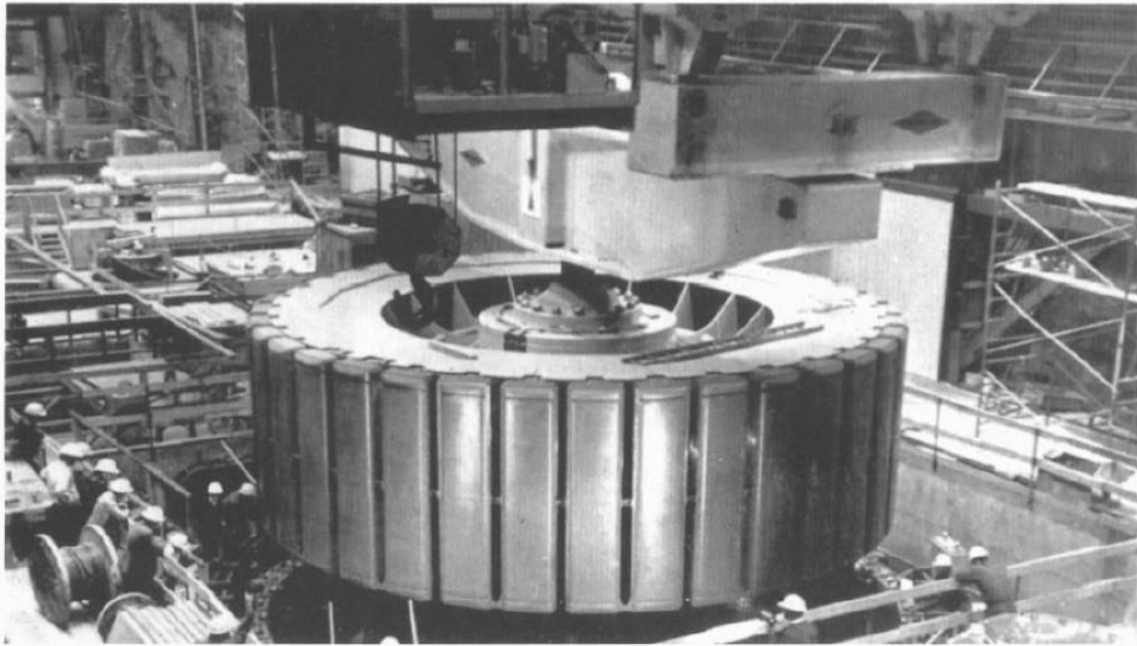


Figure 16.4

This 36-pole rotor is being lowered into the stator shown in Fig. 16.2. The 2400 A dc exciting current is supplied by a 330 V, electronic rectifier. Other details are: mass: 600 t; moment of inertia: $4140 \text{ t}\cdot\text{m}^2$; air gap: 33 mm.
(Courtesy of Marine Industrie)

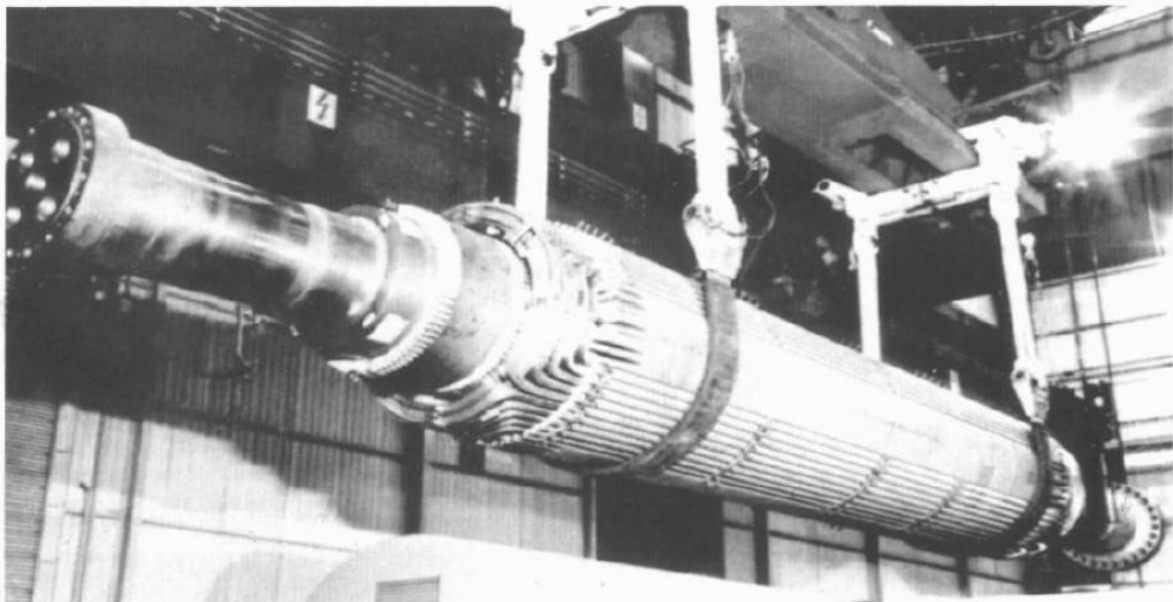


Figure 16.7b

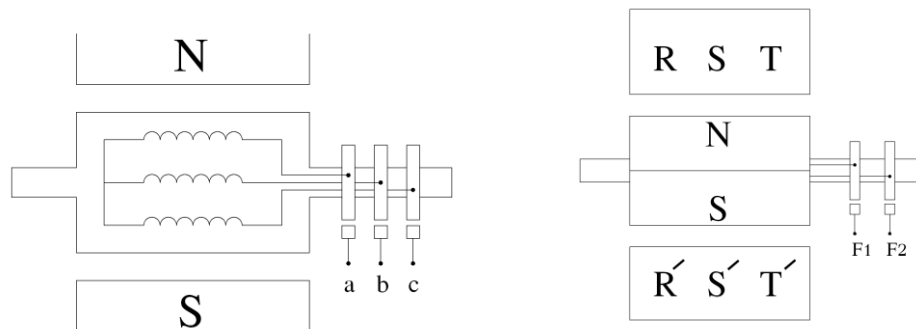
Rotor with its 4-pole dc winding. Total mass: 204 t; moment of inertia: $85 \text{ t}\cdot\text{m}^2$; air gap: 120 mm. The dc exciting current of 11.2 kA is supplied by a 600 V dc brushless exciter bolted to the end of the main shaft.
(Courtesy of Allis-Chalmers Power Systems Inc., West Allis, Wisconsin)

یک جریان DC باید به میدان رتور اعمال شود . چون رتور در حال دوران است برای دادن توان DC به سیم پیچ میدان آن آرایش خاصی لازم دارد . برای فراهم کردن این توان دو روش متداول وجود دارد .

۱- با استفاده از حلقه های لغزان و جاروبک

۲- از یک منبع تغذیه DC خاص که مستقیماً بر روی محور ژنراتور نصب شده است .

حلقه های لغزان ، حلقه هایی هستند که محور ماشین را کاملاً احاطه کرده اند ، اما نسبت به آن عایق شده اند . هر کدام از سرهای سیم پیچی رتور به یکی از ۲ حلقه لغزان روی محور ماشین متصل می شوند . هنگامی که برای تأمین توان از این حلقه ها استفاده می شود چند مشکل وجود دارد . مراقبت و نگهداری ماشین باید بیش از پیش صورت گیرد ، زیرا جاروبک ها را باید از نظر فرسودگی به طور منظم کنترل کرد . به علاوه در ماشین هایی که جریان میدان بزرگی دارند ، افت ولتاژ جاروبک ها می تواند یک عامل مهم افت توان باشد . با وجود این مسئله از این حلقه ها در ماشین های کوچک استفاده می شود . گاهی محور ماشین دارای ۳ الی ۴ رینگ می باشد که در این حالت سیم پیچ سه فاز بر روی رتور و سیم پیچ میدان بر روی استاتور قرار گرفته .



در ماشین های بزرگ برای تأمین توان DC از تحریک بدون جاروبک استفاده می شود . در واقع یک ژنراتور AC کوچک است که میدان آن در استاتور و آرمیچر آن در رتور قرار دارد . خروجی سه فاز ژنراتور تحریک ، توسط مدار یکسوکننده سه فاز ، که آن نیز روی محور ژنراتور سوار شده است ، یکسو و به مدار میدان DC اصلی داده می شود . با کنترل جریان کوچک DC میدان ژنراتور تحریک (که در استاتور قرار دارد) می توان جریان میدان ماشین اصلی را بدون استفاده از حلقه های لغزان و جاروبک تنظیم کرد . برای اینکه تحریک ژنراتور کاملاً مستقل از تغذیه خارجی باشد ، معمولاً یک تحریک راهنما به سیستم اضافه می کنند . تحریک راهنما یک ژنراتور AC کوچک یا مغناطیس دائم می باشد . مغناطیس دائم ها روی محور رتور و سیم پیچی سه فاز روی استاتور قرار دارد . این ژنراتور توان میدان تحریک را فراهم و تحریک به نوبه خود مدار میدان ماشین اصلی را کنترل می کند . در بسیاری از ژنراتورهای سنکرون دارای تحریک بدون جاروبک ، حلقه های لغزان و جاروبک نیز تعبیه شده اند ، تا در مواقع اضطراری بتوان توسط یک منبع جریان

DC ، میدان ماشین اصلی را تامین نمود. در شکل زیر مراحل گفته شده در یک ژنراتور سنکرون بدون جاروبک نشان داده شده است.

	Stator	Rotor
تحرک راهنما		
ژنراتور تحرک		
ژنراتور اصلی		

اساس کار ژنراتورهای سنکرون بر قانون القاء فاراده استوار است . مطابق این قانون اگر سیمی را در میدان مغناطیسی حرکت دهیم در آن سیم ولتاژی تولید می گردد که طبق رابطه زیر برابر است با :

$$e = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \theta$$

در این رابطه V سرعت حرکت سیم نسبت به خطوط میدان مغناطیسی است . در مولدهای کوچک سنکرون سیم هایی که قرار است در آنها ولتاژ القاء گردد یعنی سیم های آرمیچر بر روی روتور سوار بوده و در داخل میدان مغناطیسی چرخانیده می شوند .

تاریخچه ایجاد ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون تاریخچه‌ای بیش از صد سال دارد. اولین تحولات ژنراتور سنکرون در دهه ۱۸۸۰ رخ داد. در نمونه‌های اولیه مانند ماشین جریان مستقیم، روی آرمیچر گردان یک یا دو جفت سیم‌پیچ وجود داشت که انتهای آنها به حلقه‌های لغزان متصل می‌شد و قطبهای ثابت روی استاتور، میدان تحریک را تامین می‌کردند. به این طرح اصطلاحاً قطب خارجی می‌گفتند. در سالهای بعد نمونه دیگری که در آن محل قرار گرفتن میدان و آرمیچر جابجا شده بود مورد توجه قرار گرفت. این نمونه که شکل اولیه ژنراتور سنکرون بود، تحت عنوان ژنراتور قطب داخلی شناخته و جایگاه مناسبی در صنعت برق پیدا کرد. شکلهای مختلفی از قطبهای مغناطیسی و سیم‌پیچهای میدان روی رتور استفاده شد، در حالی که سیم‌پیچی استاتور، تکفاز یا سه‌فاز بود. محققان بزودی دریافتند که حالت بهینه از ترکیب سه جریان متناوب با اختلاف فاز نسبت به هم بدست می‌آید. استاتور از سه جفت سیم‌پیچ تشکیل شده بود که در یک طرف به نقطه اتصال ستاره و در طرف دیگر به خط انتقال متصل بودند. در واقع ایده ماشین جریان متناوب سه فاز، مرهون تلاشهای دانشمندان برجسته‌ای مانند نیکولا تسلا، گالیلئو فراریس، چارلز برادلی، دبروولسکی، هاسلوآندر بود.

هاسلوآندر اولین ژنراتور سنکرون سه فاز را در سال ۱۸۸۷ ساخت که توانی در حدود ۲/۸ کیلووات را در سرعت ۹۶۰ دور بر دقیقه (فرکانس ۳۲ هرتز) تولید می‌کرد. این ماشین دارای آرمیچر سه فاز ثابت و رتور سیم‌پیچی شده چهار قطبی بود که میدان تحریک لازم را تامین می‌کرد. این ژنراتور برای تامین بارهای محلی مورد استفاده قرار می‌گرفت. در سال ۱۸۹۱ برای اولین بار ترکیب ژنراتور و خط بلند انتقال به منظور تامین بارهای دوردست با موفقیت تست شد. انرژی الکتریکی تولیدی این ژنراتور توسط یک خط انتقال سه فاز از لافن به نمایشگاه بین‌المللی فرانکفورت در فاصله ۱۷۵ کیلومتری منتقل می‌شد. ولتاژ فاز به فاز ۹۵ ولت، جریان فاز ۱۴۰۰ آمپر و فرکانس نامی ۴۰ هرتز بود. رتور این ژنراتور که برای سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه طراحی شده بود، ۳۲ قطب داشت. قطر آن ۱۷۵۲ میلیمتر و طول موثر آن ۳۸۰ میلیمتر بود. جریان تحریک توسط یک ماشین جریان مستقیم تامین می‌شد. استاتور آن ۹۶ شیار داشت که در هر شیار یک میله مسی به قطر ۲۹ میلیمتر قرار می‌گرفت. از آنجا که اثر پوستی تا آن زمان شناخته نشده بود، سیم‌پیچی استاتور متشکل از یک میله برای هر قطب / فاز بود. بازده این ژنراتور ۹۶/۵٪ بود که در مقایسه با تکنولوژی آن زمان بسیار عالی می‌نمود. طراحی و ساخت این ژنراتور را چارلز براون انجام داد.

در آغاز، اکثر ژنراتورهای سنکرون برای اتصال به توربینهای آبی طراحی می‌شدند، اما بعد از ساخت توربینهای بخار قدرتمند، نیاز به توربوژنراتورهای سازگار با سرعت بالا احساس شد. در پاسخ به این نیاز اولین توربورتور در یکی از زمینه‌های مهم در بحث ژنراتورهای سنکرون، سیستم عایقی است. مواد عایقی اولیه مورد استفاده مواد طبیعی مانند فیبرها، سلولز، ابریشم، کتان، پشم و دیگر الیاف طبیعی بودند. همچنین

رزینهای طبیعی بدست آمده از گیاهان و ترکیبات نفت خام برای ساخت مواد عایقی مورد استفاده قرار می گرفتند. در سال ۱۹۰۸ تحقیقات روی عایقهای مصنوعی توسط دکتر بایکلند آغاز شد. در طول جنگ جهانی اولی رزینهای آسفالتی که بیتومن نامیده می شدند، برای اولین بار همراه با قطعات میکا جهت عایق شیار در سیم پیچهای استاتور توربوژنراتورها مورد استفاده قرار گرفتند. این قطعات در هر دو طرف، با کاغذ سلولز مرغوب احاطه می شدند. در این روش سیم پیچهای استاتور ابتدا با نوارهای سلولز و سپس با دو لایه نوار کتان پوشیده می شدند. سیم پیچها در محفظه ای حرارت می دیدند و سپس تحت خلا قرار می گرفتند. بعد از چند ساعت عایق خشک و متخلخل حاصل می شد. سپس تحت خلا، حجم زیادی از قیر داغ روی سیم پیچها ریخته می شد. در ادامه محفظه با گاز نیتروژن خشک با فشار ۵۵۰ کیلو پاسکال پر و پس از چند ساعت گاز نیتروژن تخلیه و سیم پیچها در دمای محیط خنک و سفت می شدند. این فرآیند وی پی آی نامیده می شد.

در اواخر دهه 1940 کمپانی جنرال الکتریک به منظور بهبود سیستم عایق سیم پیچی استاتور ترکیبات اپوکسی را برگزید. در نتیجه این تحقیقات، یک سیستم به اصطلاح رزین ریچ عرضه شد که در آن رزین در نوارها و یا وارنیش مورد استفاده بین لایه ها قرار می گرفت.

در دهه های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۰ همراه با افزایش ظرفیت ژنراتورها و در نتیجه افزایش استرسهای حرارتی، تعداد خطاهای عایقی به طرز چشمگیری افزایش یافت. پس از بررسی مشخص شد علت اکثر این خطاها بروز پدیده جدا شدن نوار یا ترک خوردن آن است. این پدیده به علت انبساط و انقباض ناهماهنگ هادی مسی و هسته آهنی به وجود می آمد. برای حل این مشکل بعد از جنگ جهانی دوم محققان شرکت وستینگهاوس کار آزمایشگاهی را بر روی پلی استرهای جدید آغاز کرده و سیستمی با نام تجاری ترمالاستیک عرضه کردند.

نسل بعدی عایقها که در نیمه اول دهه ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفتند، کاغذهای فایبرگلاس بودند. در ادامه در سال ۱۹۵۵ یک نوع عایق مقاوم در برابر تخلیه جزیی از ترکیب ۵۰ درصد رشته های فایبرگلاس و ۵۰ درصد رشته های PET بدست آمد که روی هادی پوشانده می شد و سپس با حرارت دادن در کوره های مخصوص، PET ذوب شده و روی فایبرگلاس را می پوشاند. این عایق بسته به نیاز به صورت یک یا چند لایه مورد استفاده قرار می گرفت. عایق مذکور با نام عمومی پلی گلاس و نام تجاری داگلاس وارد بازار شد. مهمترین استرسهای وارد بر عایق استرسهای حرارتی است. بنابراین سیستم های عایقی همواره در ارتباط تنگاتنگ با سیستم های خنک سازی بوده اند. خنک سازی در ژنراتورهای اولیه توسط هوا انجام می گرفت. بهترین نتیجه بدست آمده با این روش خنک سازی یک ژنراتور 200 MVA با سرعت 1800 rpm بود که در سال ۱۹۳۲ در منطقه بروکلین نیویورک نصب شد. اما با افزایش ظرفیت ژنراتورها نیاز به سیستم

خنک‌سازی موثرتری احساس شد. ایده خنک‌سازی با هیدروژن اولین بار در سال ۱۹۱۵ توسط ماکس شولر مطرح شد.

تلاش او برای ساخت چنین سیستمی از ۱۹۲۸ آغاز و در سال ۱۹۳۶ با ساخت اولین نمونه با سرعت 3600 rpm به نتیجه رسید. در سال ۱۹۳۷ جنرال الکتریک اولین توربوژنراتور تجاری خنک‌شونده با هیدروژن را روانه بازار کرد. این تکنولوژی در اروپا بعد از سال ۱۹۴۵ رایج شد. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ روشهای مختلف خنک‌سازی مستقیم مانند خنک‌سازی سیم‌پیچ استاتور با گاز، روغن و آب پا به عرصه ظهور گذاشتند تا آنجا که در اواسط دهه ۱۹۶۰ اغلب ژنراتورهای بزرگ با آب خنک می‌شدند. ظهور تکنولوژی خنک‌سازی مستقیم موجب افزایش ظرفیت ژنراتورها به میزان 1500 MVA شد. یکی از تحولات برجسته‌ای که در دهه ۱۹۶۰ به وقوع پیوست تولید اولین ماده ابررسانای تجاری یعنی نیوبیوم-تیتانیوم بود که در دهه‌های بعدی بسیار مورد توجه قرار گرفت.

تحولات دهه ۱۹۷۰

در این دهه تحول مهمی در فرآیند عایق کاری ژنراتور رخ داد. قبل از سال ۱۹۷۵ اغلب عایقها را توسط رزینهای محلول در ترکیبات آلی فرار اشباع می‌کردند. در این فرآیند، ترکیبات مذکور تبخیر و در جو منتشر می‌شد. با توجه به وضع قوانین زیست محیطی و آغاز نهضت سبز در اوایل دهه 1970، محدودیتهای شدیدی بر میزان انتشار این مواد اعمال شد که حذف آنها را از این فرآیند در پی داشت. در نتیجه استفاده از مواد سازگار با محیط زیست در تولید و تعمیر ماشینهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. استفاده از رزینهای با پایه آبی یکی از اولین پیشنهاداتی بود که مطرح شد، اما یک راه‌حل جامع‌تر که امروزه نیز مرسوم است، کاربرد چسبهای جامد بود. در همین راستا تولید نوارهای میکای رزین ریچ بدون حلال نیز توسعه یافت.

از دیگر پیشرفتهای مهم این دهه ظهور ژنراتورهای ابررسانا بود. یک ماشین ابررسانا عموماً از یک سیم‌پیچ میدان ابررسانا و یک سیم‌پیچ آرمیچر مسی تشکیل شده است. هسته رتور عموماً آهنی نیست، چرا که آهن به دلیل شدت بالای میدان تولیدی توسط سیم‌پیچی میدان اشباع می‌شود. فقط در یوغ استاتور از آهن مغناطیسی استفاده می‌شود تا به عنوان شیلد و همچنین منتقل کننده شار بین قطبها عمل کند. عدم استفاده از آهن، موجب کاهش راکتانس سنکرون به حدود 3-5 pu در این ماشینها شده که طبعاً موجب پایداری دینامیکی بهتر می‌شود. همانطور که اشاره شد، اولین ماده ابررسانای تجاری نیوبیوم-تیتانیوم بود که تا دمای ۵ درجه کلون خاصیت ابررسانایی داشت. البته در دهه‌های بعد پیشرفت این صنعت به معرفی مواد ابررسانایی با دمای عملکرد ۱۱۰ درجه کلون انجامید. براین اساس مواد ابررسانا را به دو گروه دما پایین

مانند نیویوم - تیتانیوم و دما بالا مانند BSCCO-2223 تقسیم می‌کنند. از اوایل دهه 1970 تحقیقات بر روی ژنراتورهای ابررسانا با استفاده از هادیهای دما پایین آغاز شد. در این دهه کمپانی وستینگهاوس تحقیقات برای ساخت یک نمونه دوقطبی را با استفاده از هادیهای دما پایین آغاز کرد. نتیجه این پروژه ساخت و تست یک ژنراتور 5 MVA در سال 1972 بود.

در سال ۱۹۷۰ کمپانی جنرال الکتریک ساخت یک ژنراتور ابررسانا را با استفاده از هادیهای دما پایین، با هدف نصب در شبکه آغاز کرد.

ساخت و تست این ژنراتور 20 MVA، دو قطب و 3600 rpm در سال ۱۹۷۹ به پایان رسید. در این ماشین از روش طراحی هسته هوایی بهره گرفته شده بود و سیم‌پیچ میدان آن توسط هلیم مایع خنک می‌شد. این ژنراتور، بزرگترین ژنراتور ابررسانای تست شده تا آن زمان (۱۹۷۹) بود.

در سال ۱۹۷۹ وستینگهاوس و اپری ساخت یک ژنراتور ابررسانای 300 MVA را آغاز کردند. این پروژه در سال ۱۹۸۳ به علت شرایط بازار جهانی با توافق طرفین لغو شد.

در همین زمینه کمپانی زیمنس ساخت ژنراتورهای دما پایین را در اوایل دهه ۱۹۷۰ شروع کرد. در این مدت یک نمونه رتور و یک نمونه استاتور با هسته آهنی برای ژنراتور 850 MVA با سرعت 3000 rpm ساخته شد، اما به دلیل مشکلاتی تست عملکرد واقعی آن انجام نشد. در این دهه آلستوم نیز طراحی یک رتور ابررسانا برای یک توربو ژنراتور سنکرون را آغاز کرد. این رتور در یک ماشین 250 MW به کار رفت. با توجه به اهمیت خنک‌سازی در کارکرد مناسب ژنراتورهای ابررسانا، همگام با توسعه این صنعت، طرحهای خنک‌سازی جدیدی ارایه شد. در ۱۹۷۷ آقای لاسکاریس یک سیستم خنک‌سازی دوفاز (مایع - گاز) برای ژنراتورهای ابررسانا ارایه کرد. در این طرح بخشی از سیم‌پیچ در هلیم مایع قرار می‌گرفت و با جوشش هلیم در دمای ۴/۲ کلین خنک می‌شد. جداسازی مایع از گاز توسط نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش رتور صورت می‌گرفت.

جمع‌بندی تحولات دهه ۱۹۷۰

با بررسی مقالات IEEE این دهه (۲۸ مقاله) در موضوعات مختلف مرتبط با ژنراتور سنکرون به نتایج زیر می‌رسیم:

۱- شایان ذکر است بررسی کل مقالات در دهه‌های مختلف نشان می‌دهد که زمینه‌های اصلی مورد توجه طرحهای بدون جاروبک، سیستمهای خنک‌سازی، سیستمهای تحریک، روشهای عددی، سیستم عایقی، ملاحظات مکانیکی، ژنراتور آهنربای دائم، پاورفرمر و ژنراتورهای ابررسانا بوده‌اند. تمرکز اکثر تحقیقات بر روی کاربرد مواد ابررسانا در ژنراتورها بوده است.

۲- استفاده از روشهای کامپیوتری برای تحلیل و طراحی ماشینهای الکتریکی آغاز شد.

۳- حلالها از سیستمهای عایق کاری حذف شدند و تکنولوژی رزین ریچ بدون حلال ارایه شد.

تحولات دهه ۱۹۸۰

در این دهه نیز همچون دهه‌های گذشته سیستم‌های عایقی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی بوده است. در این دهه آلستوم یک فرمول جدید اپوکسی بدون حلال کلاس F در ترکیب با گلاس فابریک و نوع خاصی از کاغذ میکا با نام تجاری دورتناکس را ارایه داد. این سیستم عایق کاری دارای استحکام مکانیکی بیشتر، استقامت عایقی بالاتر، تلفات دی‌الکتریک پایینتر و مقاومت حرارتی کمتری نسبت به نمونه‌های قبلی بود.

در ادامه کار بر روی پروژه‌های ابررسانا، در سال ۱۹۸۸ سازمان توسعه تکنولوژی صنعتی و انرژیهای نو ژاپن پروژه ملی ۱۲ ساله سوپر جی‌ام را آغاز کرد که نتیجه آن در دهه‌های بعدی به ثمر رسید. سیستم‌های خنک‌سازی ژنراتورهای ابررسانا هنوز در حال پیشرفت بودند. در این زمینه می‌توان به ارایه طرح سیستم خنک‌سازی تحت فشار توسط انستیتو جاپنی ژاپن اشاره کرد. این طرح که در سال ۱۹۸۵ ارایه شد دارای یک مبدل حرارتی پیشرفته و یک مایع‌ساز هلیوم با ظرفیت ۳۵۰ لیتر بر ثانیه بود.

در این مقطع شاهد تحقیقاتی در زمینه مواد آهن‌ربای دائم بودیم. استفاده از آهن‌رباهای نئودیمیوم - آهن - بورون در این دهه تحول عظیمی در ساخت ماشینهای آهن‌ربای دائم ایجاد کرد. مهمترین خصوصیت آهن‌رباهای نئودیمیوم - آهن - بورون انرژی مغناطیسی (BHmax) بالای آنهاست که سبب می‌شود قیمت هر واحد انرژی مغناطیسی کاهش یابد. علاوه بر این، انرژی زیاد تولیدی امکان به کارگیری آهن‌رباهای کوچکتر را نیز فراهم می‌کند، بنابراین اندازه سایر اجزا ماشین از قبیل قطعات آهن و سیم‌پیچی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه ممکن است هزینه کل کمتر شود. شایان ذکر است حجم بالایی از تحقیقات انجام شده این دهه در زمینه ژنراتورهای بدون جاروبک و خودتحریکه برای کاربردهای خاص بوده که به علت عمومیت نیافتن در صنعت ژنراتورهای نیروگاهی از شرح آنها صرفنظر می‌شود.

جمع‌بندی تحولات دهه ۱۹۸۰

با بررسی مقالات IEEE این دهه (۴۱ مقاله) در موضوعات مختلف مرتبط با ژنراتور سنکرون به نتایج زیر می‌رسیم:

۱- روشهای قبلی عایق کاری به منظور کاهش مقاومت حرارتی عایق بهبود یافت.

۲- مطالعات وسیعی روی ژنراتورهای سنکرون بدون جاروبک بدون تحریک صورت گرفت.

۳- فعالیت روی پروژه‌های ژنراتورهای ابررسانای آغاز شده در دهه قبل ادامه یافت.

۴- سیستمهای خنک‌سازی جدیدی برای ژنراتورهای ابررسانا ارائه شد.

۵- روش اجزای محدود در طراحی و تحلیل ژنراتورهای سنکرون خصوصاً ژنراتورهای آهنربای دائم به شکل گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

تحولات دهه ۱۹۹۰

در این دهه نیز همچون دهه‌های گذشته تلاشهای زیادی در جهت بهبود سیستمهای عایقی صورت گرفت. در این میان می‌توان به ارائه سیستمهای عایق میکاپال که توسط کمپانی جنرال الکتریک از ترکیب انواع آلکیدا و اپوکسیها در سال ۱۹۹۰ بدست آمده بود، اشاره کرد. در سال ۱۹۹۲ شرکت وستینگهاوس الکتریک یک سیستم جدید عایق سیم‌پیچ رتور کلاس F را ارائه کرد. این سیستم شامل یک لایه اپوکسی گلاس بود که با چسب پلی‌آمید- اپوکسی روی هادی مسی چسبانده می‌شد. مقاومت در برابر خراشیدگی، استرسهای الکتریکی و مکانیکی و کاهش زوال حرارتی از مزایای این سیستم بود. گروه صنعتی ماشینهای الکتریکی و توربین نانجینگ عایق سیم‌پیچ رتور جدیدی از جنس نومکس اشباع شده با وارنیش چسبی را در سال ۱۹۹۸ ارائه کرد. از مهمترین مزایای این سیستم می‌توان به انعطاف‌پذیری و استقامت عایقی، بهبود اشباع شونده با وارنیش، تمیزکاری آسان و عدم جذب رطوبت اشاره کرد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ تلاشهایی برای افزایش هدایت گرمایی عایقها صورت گرفت. آقای میلر از شرکت زیمنس- وستینگهاوس روشی را ارائه کرد که در آن لایه پرکننده مورد استفاده در طرحهای قبلی به وسیله رزینهای مخصوصی جایگزین می‌شد. مزیت اصلی این روش پرشدن فاصله هوایی بین لایه پرکننده و دیواره استاتور بود که موجب می‌شد هدایت گرمایی عایق استاتور به طرز چشمگیری افزایش پیدا کند.

در این دهه مسائل مکانیکی در عملکرد ماشینهای سنکرون بیشتر مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۹۳ آقای جانگ از دانشگاه برکلی روشی برای کاهش لرزش در ژنراتورهای آهنربای دائم ارائه کرد. لرزش در ژنراتورهای آهنربای دائم در اثر نیروهای جذبی اعمال شده توسط آهنرباهای دائم گردان به استاتور است. در این روش لرزشها با استفاده از سنسورهای ماکسول، روش اجزاء محدود و بسط فوریه مورد بررسی قرار می‌گرفت و نهایتاً برای کاهش لرزشها، ابعاد هندسی جدیدی برای آهنرباها ارائه می‌شد البته با این شرط که کارایی ماشین افت نکند.

همزمان با پیشرفتهای مذکور، افزایش سرعت و حافظه کامپیوترها و ظهور نرم‌افزارهای قدرتمند موجب شد تا راه برای استفاده از کامپیوترها در تحلیل و طراحی ژنراتورهای سنکرون بیش از پیش باز شود. در سال ۱۹۹۵ آقای کوان روشی برای طراحی سیستمهای خنک‌سازی با هیدروژن ارائه کرد که بر مبنای محاسبات

کامپیوتری دینامیک شاره پایه‌ریزی شده بود. در این روش با استفاده از یک مدل معادل سیستم خنک‌سازی، توزیع دما در بخشهای مختلف ژنراتور پیش‌بینی می‌شد.

نحوه پیاده‌سازی سیستمهای خنک‌سازی نیز از جمله موضوعاتی بود که مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۹۵ آقای آیدیر تاثیر مکان حفره‌های تهویه بر میدان مغناطیسی ژنراتور سنکرون را با استفاده از روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داد و نشان داد که انتخاب مکان مناسب حفره‌های تهویه جهت جلوگیری از افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی و پدیده اشباع بسیار حائز اهمیت است. مکان حفره‌ها تاثیر قابل توجهی بر شار یوغ دارد.

از مهمترین تحولاتی که در این دهه در زمینه ژنراتورهای ابررسانا صورت گرفت می‌توان به نتایج پروژه سوپرجمی‌ام که از دهه قبل در ژاپن آغاز شده بود، اشاره کرد. حاصل این پروژه ساخت و تست سه مدل رتور ابررسانا برای یک استاتور بود. مدل اول که در ترکیب با استاتور، خروجی 79 MW را می‌داد در سال ۱۹۹۷ و مدل دوم در سال ۱۹۹۸ با خروجی $7/79\text{ MW}$ تست شد. نهایتاً مدل سوم که دارای یک سیستم تحریک پاسخ سریع بود در سال ۱۹۹۹ تست و در شبکه قدرت نصب شد.

با بکارگیری مواد ابررسانای دمابالا در این دهه، تکنولوژی ژنراتورهای سنکرون ابررسانا وارد مرحله جدیدی شد. کمپانی جنرال الکتریک طراحی، ساخت و تست یک سیم‌پیچ دمابالا را در اواسط این دهه به پایان رساند. در ادامه، همکاری وستینگهاوس و شرکت ابررسانای آمریکا به طراحی یک ژنراتور ابررسانای دمابالای ۴ قطب، 1800 rpm ، 60 Hz انجامید.

این دهه شاهد پیشرفتهای مهمی در زمینه سیستمهای تحریک مانند ظهور سیستمهای تحریک استاتیک الکترونیکی بود. استفاده از اینگونه سیستمها باعث انعطاف‌پذیری در طراحی سیستمهای تحریک و جذب مشکلات نگهداری جاروبک در اکسایترهای گردان می‌شد. یکی از اولین نمونه‌های این سیستمها در سال ۱۹۹۷ توسط آقای شافر از کمپانی باسلر الکتریک آلمان ارایه شد.

در این مقطع زمانی کاربرد سیستمهای دیجیتال در تحریک ژنراتورها آغاز شد. یکی از اولین نمونه‌های سیستم تحریک دیجیتالی، سیستمی بود که در سال ۱۹۹۹ توسط آقای ارسنگ از دانشگاه زاگرب کرواسی ارایه شد.

در ادامه تلاشهای صورت گرفته برای بهبود خنک‌سازی، شرکت زیمنس - وستینگهاوس طرح یک ژنراتور بزرگ با خنک‌سازی هوایی را در سال ۱۹۹۹ ارایه داد. ارایه این طرح آغازی بر تغییر طرحهای خنک‌سازی از هیدروژنی به هوایی بود. استفاده از عایقهای استاتور نازک دمابالا و کاربرد محاسبات کامپیوتری دینامیک شاره موجب اقتصادی شدن این طرح نسبت به خنک‌سازی هیدروژنی شد.

پایان دهه 90 مصادف با ظهور تکنولوژی پاورفرمر بود. در اوایل بهار سال ۱۹۹۸ دکتر لیجون از کمپانی ABB سوئد، ایده تولید انرژی الکتریکی در ولتاژهای بالا را ارائه کرد. مهمترین ویژگی این طرح استفاده از کابل‌های فشار قوی پلی اتیلن متقاطع معمول در سیستم‌های انتقال و توزیع در سیم‌پیچی استاتور است. در این طرح به علت سطح ولتاژ بسیار بالا از کابل‌های استوانه‌ای به منظور حذف تخلیه جزیی و کرونا استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۸ اولین نمونه پاورفرمر در نیروگاه پرجوس واقع در شمال سوئد نصب شد. این پاورفرمر دارای ولتاژ نامی 45 KV، توان نامی 11 MVA و سرعت نامی 600 rpm بود. یکی از مسائل مهم مطرح در پاورفرمر فیکس شدن دقیق کابل‌ها در شیارها به منظور جلوگیری از تخریب لایه بیرونی نیمه هادی کابل در اثر لرزشها است. به این منظور کابل‌ها را با استفاده از قطعات مثلی سیلیکون - رابر فیکس می‌کنند.

به علت پایین بودن جریان سیم‌پیچ استاتور پاورفرمر تلفات مسی ناچیز است، لذا استفاده از یک مدار خنک‌سازی آبی کافی است. سیستم خنک‌سازی دمای عملکرد کابل‌ها را در حدود ۷۰ درجه سانتیگراد نگه می‌دارد، در حالی که طراحی عایقی کابل‌ها برای دمای نامی ۹۰ درجه انجام شده است. لذا می‌توان پاورفرمر را بدون مشکل خاصی زیر اضافه بار برد.

جمع‌بندی تحولات دهه ۱۹۹۰

با بررسی مقالات IEEE این دهه (۱۵۷ مقاله) در موضوعات مختلف مرتبط با ژنراتور سنکرون به نتایج زیر می‌رسیم:

- ۱- تمرکز موضوعی مقالات
- ۲- فعالیت روی ژنراتورهای ابررسانای دمابالا آغاز شد.
- ۳- کاربرد سیستم‌های تحریک استاتیک و دیجیتال گسترش یافت.
- ۴- روشهای کاهش لرزش حین عملکرد ژنراتور مورد توجه قرار گرفت.
- ۵- در اوایل دهه رویکرد طراحان بهبود عملکرد سیستم‌های خنک‌سازی هیدروژنی بود، اما در اواخر دهه سیستم‌های خنک‌سازی با هوا به دلایل زیر مجدداً مورد توجه قرار گرفتند:
 - الف) تولید عایق‌های استاتور نازکتر با مقاومت حرارتی پایینتر
 - ب) ظهور روشهای محاسبات کامپیوتری دینامیک شاره
 - ج) ارزانی و سادگی ساخت سیستم‌های خنک‌سازی با هوا
- ۶- تکنولوژی پاورفرمر ابداع شد.

۷- رویکرد طراحان از افزایش ظرفیت ژنراتورها به سمت ارایه طرحهای برنده -برنده یعنی کیفیت و هزینه مورد قبول برای مشتری و تولیدکننده تغییر کرد.

تحولات ۲۰۰۰ به بعد

همچون دهه‌های پیش، روند روزافزون استفاده از روشهای عددی خصوصاً روش اجزاء محدود ادامه یافت. آقای زولی‌انگ یک روش اجزاء محدود جدید را با بهره‌گیری از عناصر قوسی شکل در مختصات استوانه‌ای ارایه کرد. مزایای این روش دقت زیاد و فرمولبندی ساده بود. این روش برای تحلیل میدان درشکلهای استوانه‌ای مانند ماشینهای الکتریکی بسیار مناسب است.

در سال ۲۰۰۴ آقای شولت روش نوینی برای طراحی ماشینهای الکتریکی ارایه داد که ترکیبی از روش اجزاء محدود و روشهای تحلیلی بود. از روش تحلیلی برای طراحی اولیه بر مبنای گشتاور، جریان و سرعت نامی و از روش اجزاء محدود برای تحلیل دقیق میدانها به منظور تکامل طرح اولیه استفاده می‌شد. به این ترتیب زمان و هزینه مورد نیاز طراحی کاهش می‌یافت.

در زمینه عایق تلاشها جهت بهبود هدایت گرمایی در سال ۲۰۰۱ به ارایه یک سیستم با هدایت گرمایی بالا توسط کمپانیهای توشیبا و ونرول ایزولا انجامید. اثر بهبود هدایت گرمایی در این سیستم نسبت به سیستم معمول مشهود است.

در زمینه ژنراتورهای ابررسانا می‌توان به تحولات زیر اشاره کرد. در سال ۲۰۰۲ کمپانی جنرال‌الکتریک برنامه‌ای را با هدف ساخت و تست یک ژنراتور 100 MVA آغاز کرده است. هسته رتور و استاتور این ژنراتور مانند ژنراتورهای معمولی است. هدف این است که یک رتور معمولی بتواند میدان حاصل از سیم‌پیچی ابررسانا را بدون اشباع شدن از خود عبور دهد. مهمترین قسمتهای این پروژه، سیم‌پیچ میدان دمابالا و سیستم خنک‌سازی است

از سال ۲۰۰۰ به بعد فعالیتهای گسترده‌ای در جهت ساخت و نصب پاورفرمرها صورت گرفته است که نتیجه آن نصب چندین پاورفرمر در نیروگاههای مختلف است. این پاورفرمرها و مشخصات آنها عبارتند از:

- پاورفرمر نیروگاه توربو ژنراتوری اسکیلزتونا سوئد با مشخصات 3000 rpm، 42 MVA، 136 KV
- پاورفرمر نیروگاه هیدرو ژنراتوری پرسی سوئد با مشخصات 125 rpm، 75 MVA، 155 kv
- پاورفرمر نیروگاه هیدرو ژنراتوری هلجبرو سوئد با مشخصات 4/115 rpm، 25 MVA، 78 KV
- پاورفرمر نیروگاه هیدرو ژنراتوری میلرگریک کانادا با مشخصات 720 rpm، 8/32 MVA، 25 KV
- پاورفرمر نیروگاه هیدرو ژنراتوری کاتسورازاوا با مشخصات 5/428 rpm، 9 MVA، 66 KV

جمع‌بندی تحولات ۲۰۰۰ به بعد

با بررسی مقالات IEEE این سالها (۱۴۹ مقاله) در موضوعات مختلف مرتبط با ژنراتور سنکرون به نتایج زیر می‌رسیم:

- ۱- تمرکز موضوعی مقالات
- ۲- تلاشهای زیادی برای بهبود هدایت حرارتی عایق سیم‌پیچی استاتور خنک شونده با هوا با هدف رسیدن به ظرفیتهای بالاتر صورت گرفت.
- ۳- پاورفرمرها در نیروگاههای مختلف نصب شدند.
- ۴- فعالیت روی پروژه‌های ژنراتورهای ابررسانای دمابالا آغاز شده در دهه قبل ادامه یافت.
- ۵- کاربرد سیستمهای تحریک دیجیتالی به خصوص سیستمهای با چند ریزپردازنده گسترش یافت.
- ۶- استفاده از روشهای عددی در طراحی و آنالیز ژنراتورهای سنکرون به ویژه سیستمهای خنک‌سازی بسیار گسترش یافت.

نتیجه‌گیری

ژنراتورهای سنکرون همواره حجم عمده‌ای از تحقیقات را در دهه‌های مختلف به خود اختصاص داده‌اند، تا جایی که بعد از گذشت بیش از ۱۰۰ سال از ارایه اولین نوع ژنراتور سنکرون همچنان شاهد ظهور تکنولوژیهای جدید در این عرصه هستیم. تکنولوژیهای کلیدی کماکان مسائل عایق کاری و خنک‌سازی هستند.

تکنولوژی پیشرفته تولید ژنراتور و ریسک بالقوه موجود باعث شده است تعداد سازندگان مستقل ژنراتور کاهش یابد.

متأسفانه، علی‌رغم اینکه بالا بردن نقطه زانویی اشباع مواد مغناطیسی می‌تواند تاثیر به سزایی در پیشرفت ژنراتورها داشته باشد، تاکنون دستاورد مهمی در این زمینه حاصل نشده است. البته تلاشهایی در گذشته برای کاهش تلفات الکتریکی لایه‌های هسته صورت گرفته است، اما پیشرفتهای حاصله منوط به کاهش ضخامت لایه‌ها یا افزایش غیرقابل قبول قیمت آنهاست. متأسفانه پیشرفت مهمی نیز در آینده پیش‌بینی نمی‌شود.

نیاز امروزه بازار ژنراتورهایی است که به نحوی پکیج شده باشند که به راحتی در سایت قابل نصب باشند. پکیجهایی که از یکپارچگی بالایی برخوردارند به طوری که نويز حاصل از عملکرد ژنراتور را در خود نگاه می‌دارند، در برابر شرایط جوی مقاومند، ترانسفورماتور جریان و ترانسفورماتور ولتاژ دارند، نقطه نوترال در

آنها تعبیه شده و حفاظت اضافه ولتاژ دارند. همچنین سیستم تحریک نیز در این پکیجها تعبیه شده است و تقریباً بی نیاز از نگهداری هستند.

می شود روند جایگزینی سیستمهای خنک سازی هیدروژنی به وسیله سیستمهای خنک سازی با هوا ادامه یابد و این در حالی است که بهبود بازده سیستمهای خنک سازی هیدروژنی همچنان مورد توجه است.

با توجه به حجم گسترده تحقیقات در حال انجام روی ژنراتورهای ابررسانای دمابالا، تولید گسترده اینگونه ژنراتورها در آینده نزدیک قابل پیش بینی است. پیشرفتهای مورد نیاز در این زمینه به شرح زیر است:

- تولید هادیهای رشته ای و استفاده از آنها به جای نوارهای دمابالای امروزی جهت افزایش چگالی جریان
- افزایش قابلیت خم کردن سیمهای دمابالا به منظور ایجاد شکل سه بعدی مناسب سیم پیچی رتور درنواحی انتهایی سیم پیچ

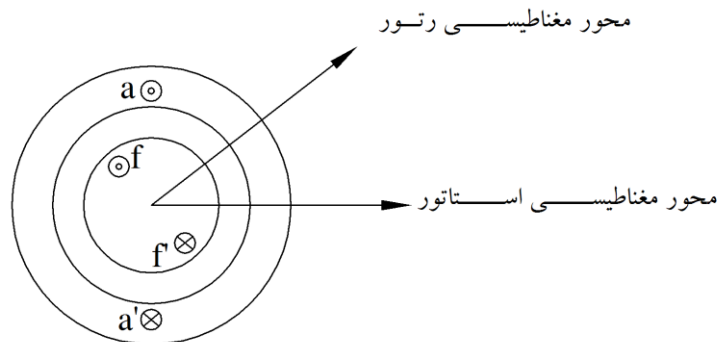
- استفاده از سیم پیچی لایه ای به جای سیم پیچی های پنکیک به منظور حداقل سازی اتصالات بین کویلها

از موضوعات قابل توجه دیگری که پیش بینی می شود صنعت ژنراتور را در سالهای آینده تحت تاثیر قرار دهد، تولید انبوه پاور فرمر و رسیدن به سطوح بالاتر ولتاژ است به طوریکه در آینده نزدیک پاور فرمرهایی با ولتاژ 170 KV برای نیروگاههای توربو ژنراتوری و 200 KV برای نیروگاههای هیدروژنراتوری ساخته خواهند شد و امید است که سطح ولتاژ خروجی آنها به 400 KV هم برسد.

انتظار می رود پیشرفت سیستمهای عایقی ادامه یابد. ممکن است از تکنولوژیهای جدید عایقی مانند سیستمهای عایق پلیمری پیشرفته استفاده شود و این سیستمها بتوانند با نوارهای میکا-گلاس امروزی رقابت کنند. این پیشرفتهای می تواند به بهبود کابلهای پاور فرمر نیز بینجامد.

القائی و مدار معادل ماشین‌های سنکرون

طرحی از یک ماشین سنکرون سه فاز رتور استوانه‌ای در زیر دیده می‌شود. سیم‌پیچ میدان ff' واقع بر روی رتور یک سیم‌پیچ توزیع شده است که یک mmf سینوسی و موج چگالی شار با محور منطبق بر محور مغناطیسی‌اش ایجاد می‌کند و همواره با رتور می‌چرخد. همانگونه که از ساختمان و عملکرد ماشین بر می‌آید ۲ نوع شار و فلو در ماشین وجود دارد .



۱- شار مشترک یا پیوندی (**Linkage Flux**) : شاری است که توسط سیم‌پیچ‌های رتور ، استاتور از شکاف هوایی و هر دو سیم‌پیچ عبور می‌نماید. این شار با شار متقابل یا مغناطیس کننده ترانسفورماتور متناظر است و در ایجاد گشتاور دخالت مستقیم دارد. مسیر این شار آهن استاتور ، فاصله هوایی و رتور است . پس از طبیعت مغناطیسی خودش یعنی آهن پیروی نموده و دارای منحنی مغناطیسی (B-H) " غیر خطی " می‌باشد.

۲- شار نشتی (**Leakage Flux**) : بخشی از شار ناشی از سیم‌پیچ‌های رتور و استاتور که از شکاف هوایی نمی‌گذرند ، می‌باشد. این شار از مولفه‌های نشت شیار و دندانه ، نشت دور آخری و هارمونیک‌های فضائی میدان شکاف هوایی تشکیل شده است. این شارها بدلیل ولتاژهایی که در سیم‌پیچ‌های متناظرشان ایجاد می‌کنند در عملکرد ماشین موثراند. این شار وارد آهن نمی‌شود پس از طبیعت مغناطیسی خودش یعنی هوا پیروی نموده و دارای منحنی مغناطیسی (B-H) " خطی " می‌باشد.

نکته : حرکت ماشین‌های دوار در میزان شار جاری آنها تاثیر نمی‌گذارد چراکه ابعاد هندسی آنها ثابت می‌باشد.

گذر شار از فازهای a,b,c و سیم پیچ میدان f را می توان بصورت زیر بر حسب القائاتی ها و مقادیر جریان ها بیان کرد.

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell_{aa} & \ell_{ab} & \ell_{ac} & \ell_{af} \\ \ell_{ba} & \ell_{bb} & \ell_{bc} & \ell_{bf} \\ \ell_{ca} & \ell_{cb} & \ell_{cc} & \ell_{cf} \\ \ell_{fa} & \ell_{fb} & \ell_{fc} & \ell_{ff} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{pmatrix}$$

در معادله ماتریسی اخیر λ همان شار دور یا شار پیوندی می باشد. ضرائب خودالقائی با استفاده از فرمول زیر بدست می آیند.

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N \cdot \varphi}{i}$$

چنانچه ضریب خودالقائی با زاویه رتور یا به عبارتی با موقعیت رتور تغییر کند آن را با ℓ نشان داده و چنانچه نسبت به موقعیت رتور تغییراتی نداشته باشد، آن را با L نشان داده. اکنون به بررسی و تعریف ضرائب معادله بالا می پردازیم.

آ. ضریب خودالقائی استاتور

مقاومت مغناطیسی معادل با شار نشت را با R_l و مقاومت مغناطیسی معادل با شار پیوندی را با R_m نمایش می دهیم. مقدار مقاومت نشت ناشناخته و محاسبه آن پیچیده می باشد ولی مقدار مقاومت شار پیوندی با استفاده از معادله زیر بدست می آید.

$$R_m = R_{StatorCore} + 2R_{airgap} + R_{RotorCore}$$

اکنون با استفاده معادله نیرو محرکه مغناطیسی ضرائب خودالقائی را بدست می آوریم.

$$F_a = N_a \cdot I_a = R_m \cdot \varphi_m$$

$$\varphi_m = \frac{N_a \cdot I_a}{R_m}$$

$$L_{aa_0} = \frac{\lambda_a}{i_a} = \frac{N_a^2}{R_m}$$

$$L_{al} = \frac{N_a^2}{R_l}$$

$$L_{aa} = L_{aa_0} + L_{al}$$

که در این معادله :

L_{aa_0} : مولفه پایه و اصلی شار فاصله هوایی است .

L_{al} : ناشی از شار نشتی سیم پیچ میدان می باشد.

برای فازهای دیگر هم به همین صورت می باشد.

$$\ell_{aa} = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{aa_0} + L_{al}$$

ب . ضریب خودالقائی رتور

برای محاسبه ضریب خودالقائی رتور نیز همانند حالت قبل محاسبات را انجام داده ولی نکته ای که باید به آن توجه نمود این است که مقاومت مغناطیسی شار پیوندی در معادلات زیر با حالت قبلی برابر می باشد . زیرا این شار یک مسیر مشابه را طی می نماید در حالی که مقدار شار نشتی آن فرق می نماید .

$$F_R = N_f \cdot I_f = R_m \cdot \phi_{mf}$$

$$\phi_{mf} = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$$

$$L_{ff_0} = \frac{\lambda_f}{i_f} = \frac{N_f^2}{R_m}$$

$$L_{fl} = \frac{N_f^2}{R_{fl}}$$

$$\ell_{ff} = L_{ff} = L_{ff_0} + L_{fl}$$

ج . ضریب القاکنائی متقابل استاتور

در این حالت باید بررسی گردد که چه مقدار از شار تولیدی سیم پیچ a از سیم پیچ b عبور می کند. برای این منظور فرض کنید سیم پیچ فاز b روی فاز a پیچیده شده است در نتیجه تمام شار از داخل آن عبور می نماید و اگر قائم بر آن پیچیده شده باشد آنگاه شار عبوری از فاز b صفر خواهد بود. پس می توان گفت با توجه به اینکه محور مغناطیسی فاز a با فاز b ، ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند در نتیجه تمام شار فاز a از b عبور نکرده و مقدار ضریب القاکنائی متقابل آن به صورت زیر تعیین می شود.

$$L_{ab} = \frac{N_b(\phi_m \cdot \cos 120)}{i_a} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N_b^2}{R_m} = -\frac{1}{2} L_{aa_0}$$

در نتیجه برای فازهای دیگر هم به همین صورت تعیین شده.

$$\ell_{ab} = \ell_{ba} = \ell_{ac} = \ell_{ca} = \ell_{bc} = \ell_{cb} = -\frac{1}{2} L_{aa_0}$$

د. ضریب القانائی متقابل استاتور و رتور

در این حالت باید بررسی گردد که چه مقدار از شار فاز a از رتور می‌گذرد. چنانچه محورهای مغناطیسی فاز a با رتور زاویه θ بسازد داریم:

$$\varphi_m = \frac{N_a \cdot I_a}{R_m}$$

$$\ell_{af} = \frac{N_f (\varphi_m \cdot \cos \theta)}{i_a} = \frac{N_f \cdot N_a \cdot \cos \theta}{R_m} = L_{mf} \cdot \cos \theta$$

و اکنون فرض نمائید اگر رتور تحریک شود چه مقدار از شار تولیدی آن از فاز a عبور می‌نماید.

$$\ell_{fa} = \frac{N_a (\varphi_m \cdot \cos \theta)}{i_f}$$

$$\varphi_m = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$$

$$\ell_{fa} = \frac{N_f \cdot N_a \cdot \cos \theta}{R_m} = L_{mf} \cdot \cos \theta$$

برای فاز دیگر نیز مقدار پیک آن تغییری نکرده و فقط مقدار زاویه آن ۱۲۰ درجه فرق می‌نماید.

اکنون با توجه به مطالب قبلی به محاسبه شار پیوندی فاز a با توجه به معادله ابتدای این مبحث می‌پردازیم.

$$\lambda_a = \ell_{aa} \cdot i_a + \ell_{ab} \cdot i_b + \ell_{ac} \cdot i_c + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa_0} + L_{al}) \cdot i_a + (-\frac{1}{2} L_{aa_0})(i_b + i_c) + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$i_b + i_c = -i_a$$

$$\lambda_a = (\frac{3}{2} L_{aa_0} + L_{al}) \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = (L_s) \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

همانگونه که در معادله اخیر دیده می‌شود L_s همان ضریب خودالقائی سنکرون یا القانائی موثر دیده شده توسط یک فاز در شرایط حالت ماندگار یک ماشین سه فاز است.

مدار معادل ماشین سنکرون

ولتاژ پایانه‌ای فاز a مجموع افت ولتاژ روی مقاومت آرمیچر $R_a i_a$ و ولتاژهای القائی است. ولتاژ القائی توسط شار سیم‌پیچ میدان را می‌توان با استفاده از معادله زیر با توجه به اینکه جریان استاتور صفر می‌باشد، بدست آورد.

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \frac{d}{dt}(L_{af} \cos \theta) \cdot i_f$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(L_{af} \cos(\omega t + \delta)) \cdot i_f$$

$$e_{af} = -\omega L_{af} \cdot i_f \cdot \sin(\theta)$$

ولتاژ پایانه‌ای استاتور برابر است با :

$$\hat{V}_a = R_a \cdot \hat{i}_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a \cdot \hat{i}_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \hat{e}_{af}$$

$$\hat{V}_a = R_a \cdot \hat{i}_a + jX_s \hat{i}_a + \hat{e}_{af}$$

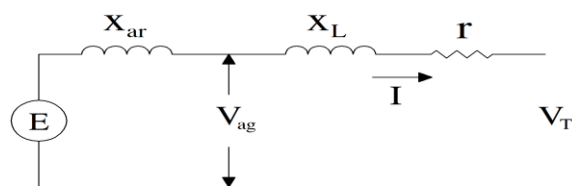
$$X_s = L_s \cdot \omega = \omega \cdot \left(\frac{3}{2} L_{aa_0} + L_{al}\right) = \frac{3}{2} \omega L_{aa_0} + \omega L_{al}$$

$$X_s = X_{ar} + X_{al}$$

این معادلات بر اساس حالت موتور بودن و برای حالت ژنراتوری به صورت $\hat{e}_{af} = \hat{V}_a + R_a \cdot \hat{i}_a + jX_s \hat{i}_a$ می‌باشد.

X_{ar} : راکتانس عکس العمل آرمیچر و یا راکتانس مغناطیس کنندگی سیم‌پیچ آرمیچر.

X_{al} : راکتانس نشتی آرمیچر. در نتیجه مدار معادل آن به صورت زیر می‌باشد.



V_{ag} همان ولتاژ تولید شده توسط شار برآیند شکاف هوائی است و به آن ولتاژ "راکتانس نشتی" یا "پشت" یا "نتیجه" (V_{Result}) گویند.

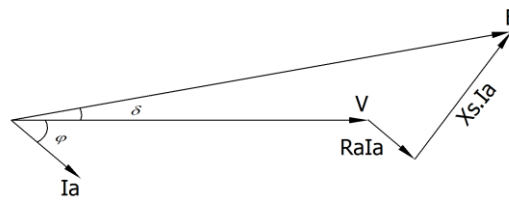
دیگرام‌های برداری ژنراتور سنکرون در حالات مختلف

با توجه به معادله $\hat{e}_{af} = \hat{V}_a + R_a \cdot \hat{i}_a + jX_s \hat{i}_a$ و مبنا قرار دادن ولتاژ ترمینال در بارهای مختلف داریم.

آ. بار سلفی (پس فاز - lag) :

$$\hat{V} = V \angle 0$$

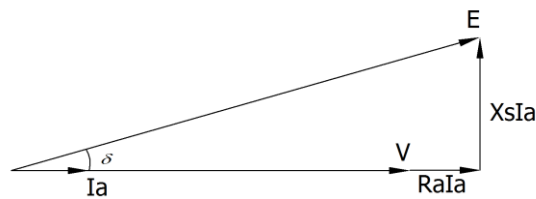
$$\hat{i}_a = i_a \angle -\varphi$$



آ. بار اهمی:

$$\hat{V} = V \angle 0$$

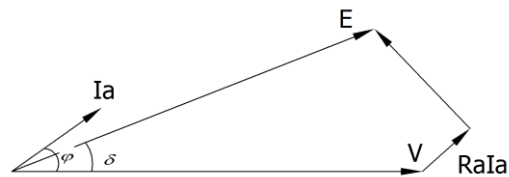
$$\hat{I}_a = i_a \angle 0$$



ج. بار خازنی (پیش فاز - lead):

$$\hat{V} = V \angle 0$$

$$\hat{I}_a = i_a \angle +\varphi$$



نتایج:

۱- به ازای یک ولتاژ و جریان فاز معین، بارهای پس فاز نسبت به بارهای پیش فاز به ولتاژ داخلی بزرگتری نیاز دارند. عبارتی دیگر برای ایجاد یک ولتاژ ترمینال ثابت، بار سلفی نسبت به بار خازنی

$$E_{f.lag} > E_{f.normal} > E_{f.lead} \quad \text{نیازمند تحریک بیشتری می باشد.}$$

۲- زاویه قدرت برای داشتن ولتاژ ترمینال ثابت به صورت زیر تعیین شده.

$$\delta_{f.lag} < \delta_{f.normal} < \delta_{f.lead}$$

پس در بار خازنی گرچه نیازمند تحریک کمتری می باشیم ولی زاویه قدرت بزرگتر شده و به محدوده ناپایدار نزدیکتر شده.

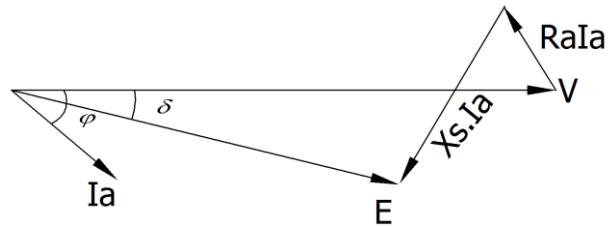
۳- در حالت ژنراتوری E_a جلوتر از V است یا $\delta > 0$ می باشد.

دیاگرام‌های برداری موتور سنکرون در حالات مختلف

معادله موتور عبارتست از $\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$ که دیاگرام آن در بارهای مختلف عبارتست از:
 آ. بار سلفی (پس فاز) :

$$\hat{V} = V \angle 0$$

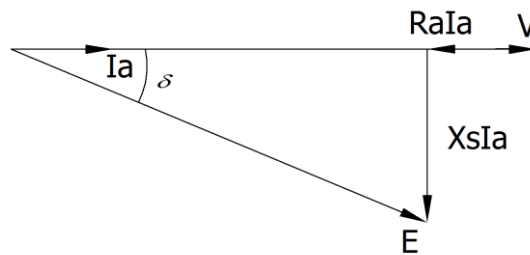
$$\hat{I}_a = i_a \angle -\varphi$$



آ. بار اهمی:

$$\hat{V} = V \angle 0$$

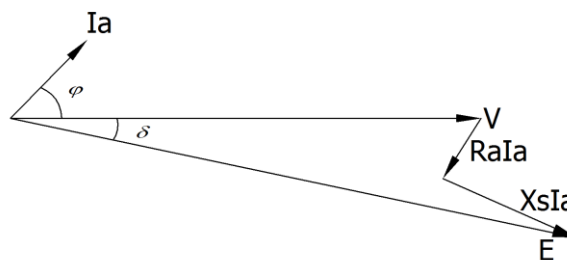
$$\hat{I}_a = i_a \angle 0$$



ج. بار خازنی (پیش فاز) :

$$\hat{V} = V \angle 0$$

$$\hat{I}_a = i_a \angle +\varphi$$

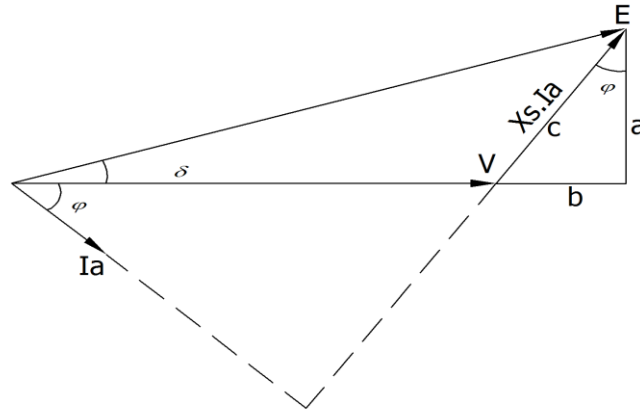


نتایج :

در حالت موتوری E_a عقبتر از V می‌باشد یا بعبارتی $\delta < 0$ است.

روابط توان و گشتاور در ژنراتورهای قطب صاف

چنانچه از مقاومت رتور صرفنظر نمائیم داگرام برداری ژنراتور به صورت زیر تغییر شکل می دهد.



$$P = 3V_t I_a \cos \varphi$$

با توجه به مثلث abc این معادله برابر است با :

$$a = E_f \sin \delta$$

$$c = X_s I_a$$

$$\cos \varphi = \frac{a}{c}$$

$$P = 3V_t I_a \cdot \frac{E_f \sin \delta}{X_s I_a}$$

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \sin \delta$$

و معادله توان واکنشی برابر است با :

$$Q = 3V_t I_a \sin \varphi$$

با توجه به مثلث abc این معادله برابر است با :

$$a = E_f \cos \delta - V_t$$

$$c = X_s I_a$$

$$\sin \varphi = \frac{b}{c}$$

$$Q = 3V_t I_a \cdot \frac{(E_f \cos \delta - V_t)}{X_s I_a}$$

$$Q = 3V_t \cdot \frac{(E_f \cos \delta - V_t)}{X_s}$$

نکات :

۱-

$$\text{if } \delta = 0 \rightarrow P = 0$$

$$\text{if } \delta = \frac{\pi}{2} \rightarrow P = P_{\max} = \frac{3V.E}{X_s}$$

۲- همواره توان راکتیو از نقطه‌ای با ولتاژ بیشتر به نقطه‌ای با ولتاژ کمتر انتقال می‌یابد.

۳- زمانی که $E_f \cos \delta > V$ باشد حالت فوق تحریک می‌باشد. زیرا در این حالت $Q > 0$ است و ماشین تولید کننده توان راکتیو است.

۴- زمانی که $E_f \cos \delta < V$ باشد حالت زیر تحریک می‌باشد. زیرا در این حالت $Q < 0$ است و ماشین مصرف کننده توان راکتیو است.

۵- زمانی که $E_f \cos \delta = V$ باشد حالت تحریک نرمال می‌باشد. زیرا در این حالت $Q = 0$ است.

۶- توان اکتیو از نقطه‌ای با ولتاژ پیش فازتر به نقطه‌ای با ولتاژ پس فازتر انتقال می‌یابد.

۷- در حالت ژنراتوری $\delta > 0$ است در نتیجه تولید کننده توان اکتیو است.

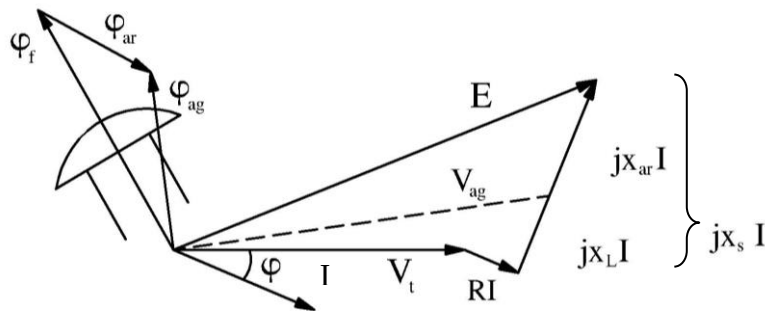
۸- در حالت موتوری $\delta < 0$ است در نتیجه مصرف کننده توان اکتیو است.

۹-

این نتایج را می‌توان در جدول زیر تنظیم نمود.

ژنراتوری		شناوری		موتوری		
$P > 0$ $Q > 0$	سلفی	$P = 0$ $Q > 0$		$P < 0$ $Q > 0$	خازنی	فوق تحریک Over Excited
$P > 0$ $Q = 0$	اهمی	$P = 0$ $Q = 0$		$P < 0$ $Q = 0$	اهمی	تحریک عادی Normal Excited
$P > 0$ $Q < 0$	خازنی	$P = 0$ $Q < 0$		$P < 0$ $Q < 0$	سلفی	زیر تحریک Under Excited
$\delta > 0$		$\delta = 0$		$\delta < 0$		

دیاگرام برداری ولتاژها و فوران ها در بار سلفی



ϕ_f : فوران قطب ها ناشی از جریان تحریک I_f که بر E عمود است .
 ϕ_{ar} : فوران عکس العمل آرمیچر که ناشی از عبور جریان از سیم پیچ های آرمیچر است و با I_a موازی است .

ϕ_{ag} : فوران برآیند در فاصله هوایی ژنراتور است و بر V_{ag} عمود است .
 در حالت بی باری ، جریان آرمیچر صفر بوده و ولتاژ ترمینال همان ولتاژ بی باری (E_a) می باشد. فوران در حالت بی باری (ϕ_f) در جهت قطب ها بوده و با توجه به رابطه $E = -N \frac{d(\phi)}{dt}$ ، 90° درجه نسبت به E_a اختلاف فاز داشته و عمود بر آن می باشد. زمانی که ژنراتور باردار می شود ، فورانی در جهت جریان آرمیچر ایجاد شده که به آن فوران عکس العمل آرمیچر گویند (ϕ_{ar}). برآیند این ۲ فوران را فوران برآیند یا فاصله هوایی گویند. این فوران عمود بر V_{ag} یا ولتاژ فاصله هوایی می باشد.

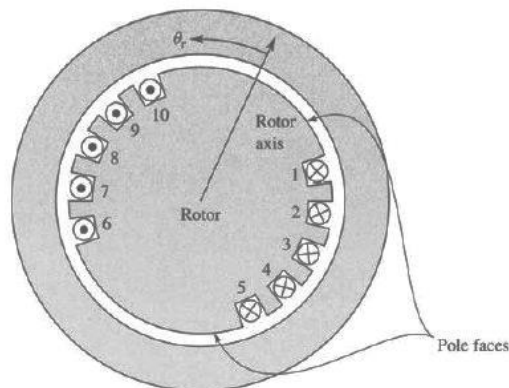
$$\phi_{ag} = \phi_f + \phi_{ar}$$

همانطور که در دیاگرام دیده می شود ϕ_{ar} دارای یک مؤلفه منفی در خلاف جهت ϕ_f می باشد ، که باعث کاهش آن می شود و این موضوع در حالت بار اهمی - سلفی به چشم می خورد. همواره از مثلث های موجود در دیاگرام بالا می توان روابط زیر را بدست آورد.

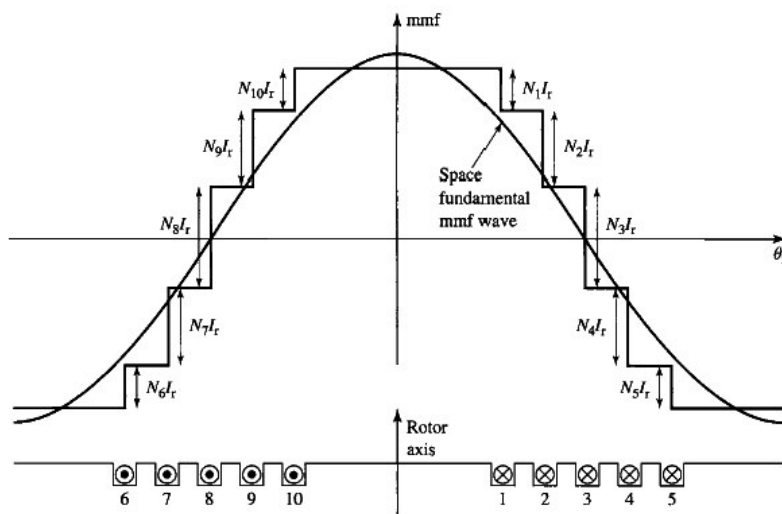
$$\frac{\phi_f}{E_a} = \frac{\phi_{ag}}{V_{ag}} = \frac{\phi_{ar}}{X_{ar} I_a}$$

معادل جریان روتور در سمت استاتور

شکل زیر که نشان دهنده روتور یک ژنراتور قطب صاف می باشد را در نظر بگیرید .



در این شکل چنانچه نیرو محرکه مغناطیسی را بر حسب زاویه θ_r رسم نماییم ، به صورت زیر در خواهد آمد .



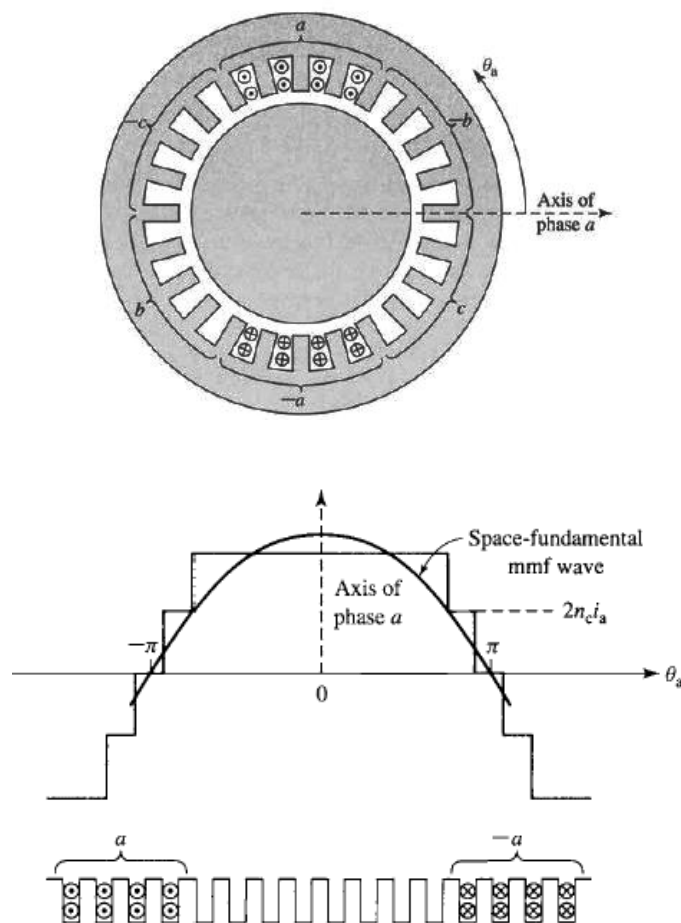
نکته ای را که می توان از شکل بالا دریافت نمود این است که ما همواره به دنبال توزیع هر چه بیشتر سینوسی نیرو محرکه و چگالی شار در فاصله هوایی می باشیم . لذا برای تحقق چنین هدفی در ژنراتورهای قطب برجسته که دارای NI ثابت است ، با تغییر در متغیر g یا همان فاصله هوایی توزیع سینوسی نیرو محرکه و چگالی فوران را ایجاد می نماییم و در ژنراتورهای قطب صاف که دارای فاصله هوایی

یکنواخت می‌باشد، با تغییر در متغیر دور این کار را انجام می‌دهیم. همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود شیارهای ۸ و ۳ دارای بیشترین دور و شیارهای ۱،۶ و ۱۰،۱ دارای کمترین دور می‌باشند، تاشکل موج نیرو محرکه سینوسی‌تر گردد.

تابع توزیع نیرومحرکه بر حسب زاویه به صورت زیر می‌باشد.

$$F_r = \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_r K_r}{P} \right) i_f \cos\left(\frac{P}{2} \theta_r\right) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_r K_r}{P} \right) i_f \cos(\theta)$$

همچنین نیرومحرکه‌ای که جریان‌های سه فاز در استاتور تولید می‌نمایند با توجه به شکل زیر برابر با مقدار زیر خواهد بود. این شکل یک فاز را نمایش می‌دهد.



توزیع نیرومحرکه فاز a :

$$F_a = \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_w K_w}{P} \right) i_a \cos\left(\frac{P}{2} \theta_a\right)$$

چنانچه جریان‌های سه فاز زیر را به استاتور اعمال نمایم، برآیند نیرومحرکه‌های سه فاز بدست می‌آید.

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \alpha')$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120 + \alpha')$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120 + \alpha')$$

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t + \alpha' - \theta) = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{K_w \cdot N_w}{P} \right) I_m \cdot \cos(\omega t + \alpha' - \theta)$$

پس در سمت استاتور سه جریان ac داریم که میدان گردانی برابر با همان میدان گردان dc تولید می کند .

$$F(\theta, t) = F_r$$

فوران قطبها در جهت قطبها است و فوران آرمیچر در جهت α است . پس باید $\alpha' = \theta$ باشد.

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{K_w \cdot N_w}{P} \right) I_m = \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{K_r \cdot N_r}{P} \right) I_f$$

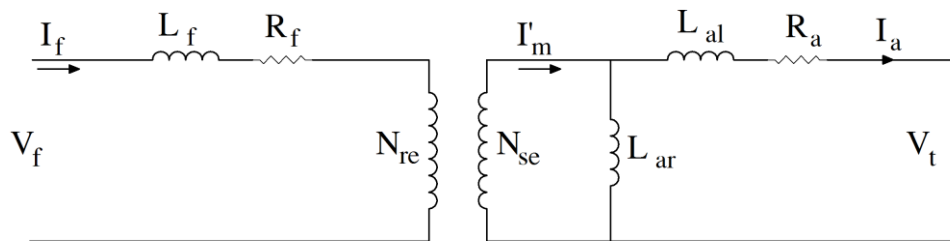
$$N_{re} = N_r \cdot K_r$$

$$N_{se} = N_w \cdot K_w$$

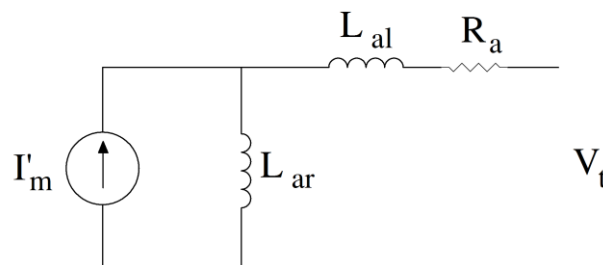
$$I'_m = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{N_{re}}{N_{se}} \right) \cdot I_f$$

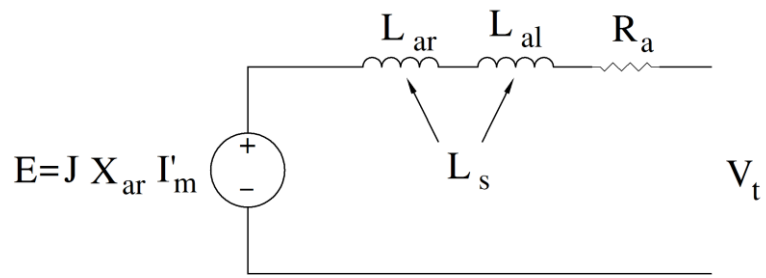
$$I'_{rms} = \frac{I'_m}{\sqrt{2}} \angle \alpha = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \left(\frac{N_{re}}{N_{se}} \right) \cdot I_f \angle \theta$$

مدار معادل ژنراتور به صورت زیر در خواهد آمد :

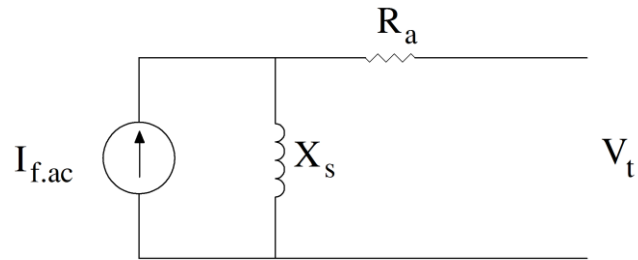


مدار معادل تونن سمت استاتور برابر است با :





که مدار معادل تونن نهایی شکل بالا به صورت زیر خواهد بود .



$$I_{f.ac} = \frac{E}{JX_s} = \frac{JX_{ar}.I'_m}{JX_s}$$

$$I_{f.ac} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{X_{ar}}{X_s} \cdot \frac{N_{re}}{N_{se}} . I_f \angle \theta$$

درصد تنظیم ولتاژ Voltage Regulation

درصد تنظیم ولتاژ یا درصد افت ولتاژ که به رگولاسیون ولتاژ نیز معروف است به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\% V.R = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100 = \frac{E - V}{V} \times 100$$

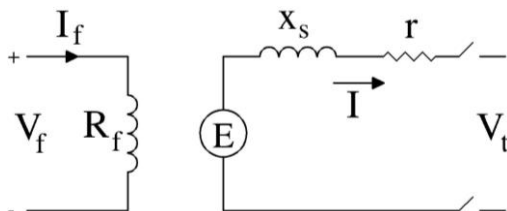
در این رابطه V_{NL} ولتاژ هر فاز ژنراتور در بی باری است که با نیروی محرکه E برابر است. V_{FL} ولتاژ ژنراتور در بار کامل یا بار نامی می‌باشد. هرچه رگولاسیون کمتر باشد، افت ولتاژ کمتر است.

تعیین ثوابت ماشین سنکرون

مشخصات اصلی یک ماشین سنکرون را می‌توان با دو آزمون تعیین نمود.

آ. آزمون بی باری :

در این آزمون می‌توان به مشخصه مدار باز یک ژنراتور سنکرون یا همان منحنی مشخصه Open Coil Curve (O.C.C) رسید. اتصال ژنراتور ها عمدتاً ستاره بوده و در طرح‌های موجود حداکثر ولتاژ ژنراتور حدود 30 kV می‌باشد. روابط و دیاگرام‌های برداری در هر فاز :

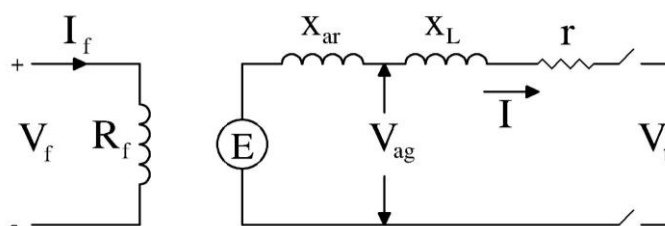


$$\bar{E} = \bar{V}_t + R \bar{I} + j X_s \bar{I}$$

در این رابطه E نیرو محرکه القاء شده در هر فاز و V_t ولتاژ فازی در ترمینال خروجی مولد می‌باشد. R مقاومت اهمی هر فاز است که مقدار آن در مولدهای بزرگ بسیار کوچک بوده و قابل صرفنظر کردن است. اما X_s راکتانس القایی سنکرون در هر فاز است و مقدار آن قابل ملاحظه می‌باشد. X_s نیز از سه قسمت تشکیل یافته است : ۱. پراکندگی ، ۲. اثر خودالقایی در سیم پیچ‌های هر فاز و ۳. اثر القای متقابل هر فاز با دو فاز دیگر.

$$X_s = \omega \left(\frac{3}{2} L_{aa} + L_{al} \right)$$

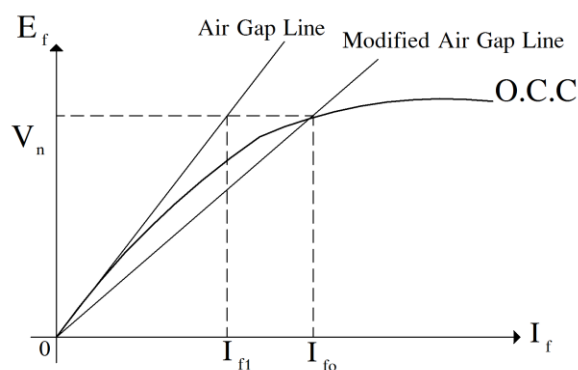
مدار معادل یک فاز ماشین سنکرون با جزئیات بیشتر نشان داده شده است.



V_{ag} ولتاژ فاصله هوایی نامیده می شود که با صرف نظر از راکتانس پراکندگی و مقاومت اهمی در خروجی ماشین می توان آن را بدست آورد . رابطه برداری آن با ولتاژ ترمینال را می توان بصورت زیر نوشت :

$$\hat{V}_{ag} = \hat{V}_t + R \cdot \hat{I} + j X_L \cdot \hat{I}$$

جهت انجام این آزمون ابتدا رتور را با سرعت نامی به چرخش در آورده و سپس با اعمال یک ولتاژ dc متغیر به سیم پیچ های میدان جریان تحریک را افزایش داده تا ولتاژ ترمینال های ژنراتور نیز افزایش یابند. افزایش تحریک را تا افزایش مقدار نامی ولتاژ ترمینال های ژنراتور ادامه داده. در نهایت منحنی تغییرات ولتاژ ژنراتور بر حسب جریان تحریک را رسم می نمایم. مشخصه مدار باز یک ژنراتور سنکرون ، همانند منحنی بی باری یک ماشین DC ، بیانگر تغییرات ولتاژ خروجی ژنراتور در حالت مدار باز بر حسب تغییر جریان تحریک می باشد. به بیان دیگر مشخصه مدار باز رابطه بین مؤلفه اول یا هارمونی اول شار شکاف هوایی و mmf وارد بر مدار مغناطیسی را در حالتی که سیم پیچ میدان تنها منبع تولید نیرو محرکه مغناطیسی می باشد را نشان می دهد.

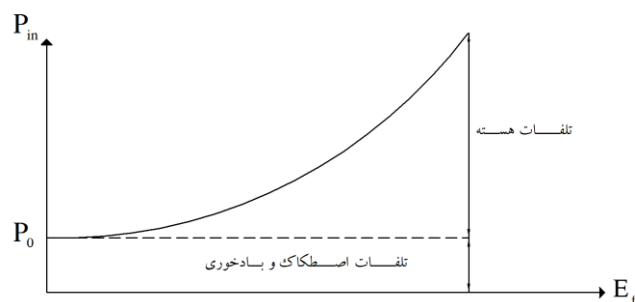


در منحنی بالا اثرات اشباع به وضوح دیده می شود. منحنی با افزایش جریان میدان و افزایش رلوکتانس مسیر شار داخل آهن در اثر اشباع ماده مغناطیسی رو به پایین خم شده و تاثیر میدان در ایجاد شار کاهش می یابد. بخش خطی منحنی را ، خط شکاف هوایی می نامند و نشان دهنده ولتاژ مدار باز در صورت نبودن اشباع مغناطیسی است. برای بدست آوردن این منحنی باید ژنراتور را با دورنامی چرخانده تا به یک پایداری حرارتی برسد. همانگونه که در منحنی بالا دیده می شود چنانچه از اثرات اشباع صرف نظر نمایم منحنی

مشخصه بی‌باری آن به صورت خط راستی در خواهد آمد که به آن خط شکاف هوایی (Air Gap Line) گویند. و همچنین اگر ماشین در اطراف نقطه نامی آن خطی فرض نمائیم ، خط جدید دیگری رسم خواهد شده که به آن خط فاصله هوایی اصلاح شده (Modified Airgap Line) گویند.

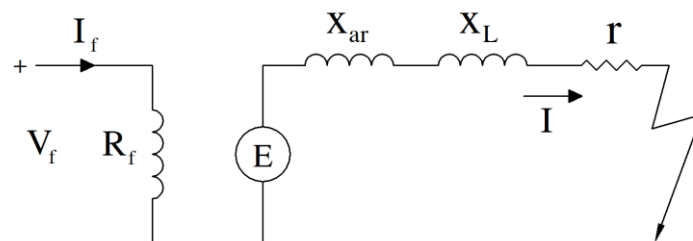
با توجه به رابطه $E_f = \omega \cdot L_{af} \cdot I_f$ و $L_{af} = \frac{E_f}{I_f \cdot \omega}$ با توجه به ثابت بودن مقدار E_f و ω ، در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع (خط فاصله هوایی) جریان تحریک بیشتری نیاز داریم ($I_{f1} < I_{f0}$) ، و لذا L_f حالت اشباع کمتر از L_f حالت غیر اشباع بوده و در نتیجه توزیع مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های میدان و آرمیچر را کم کرده.

در این آزمون چنانچه سرعت رتور همان سرعت نامی باشد و هیچگونه تحریکی را به آن اعمال ننمائیم ، توان ورودی ژنراتور صرف غلبه بر تلفات اصطکاک و بادخوری می‌شود. ولی چنانچه تحریک را افزایش دهیم توان ورودی علاوه بر تامین تلفات اصطکاک و بادخوری ، باید تلفات هسته (فوکو و هیستریزیس) را تامین نماید. تغییرات توان ورودی بر حسب ولتاژ ایجاد شده در سیم‌پیچ‌های ژنراتور به صورت زیر خواهد بود.:

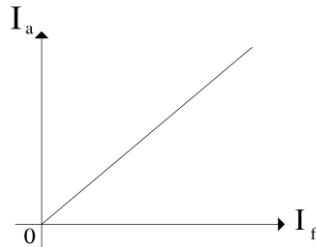


ب . آزمون اتصال کوتاه :

هدف از این آزمایش بدست آوردن منحنی مشخصه اتصال کوتاه یا Short Circuit Curve (SCC) می‌باشد. در این آزمایش می‌خواهیم ارتباط جریان آرمیچر را نسبت به جریان تحریک بسنجیم . در ژنراتورهای واقعی ، جهت اتصال کوتاه از باس‌های لوله‌ای شکل و آلومینیومی استفاده می‌نماییم .



در حالت اتصال کوتاه $V_t=0$ می باشد ، پس $E = rI + jX_s I$ می باشد. در این حالت ، با توجه به معادله ، می توان E را مبنا قرار داد. برای انجام این آزمایش ابتدا پایانه های ژنراتور را بوسیله آمپرمترهای مناسبی اتصال کوتاه نموده و رتور را با سرعت سنکرون به چرخش در آورده . سپس با افزایش جریان تحریک مقادیر جریان آرمیچر را یادداشت می نمائیم. این آزمایش را تا مقدار جریان نامی ژنراتور ادامه می دهیم .



در این آزمایش با توجه به مقدار قابل توجه جریان آرمیچر و ϕ_{ar} در نتیجه ϕ_{ag} کم می شود . بنابراین فوران برآیند در حالت اتصال کوتاه بسیار کم (۱۵٪ - ۱۰٪ مقدار نامی) می باشد. پس منحنی مشخصه اتصال کوتاه خطی بوده و به اشباع نخواهد رفت. معادله ولتاژ ژنراتور برابر است با :

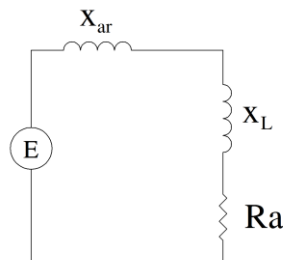
$$E = V + rI + jX_s I$$

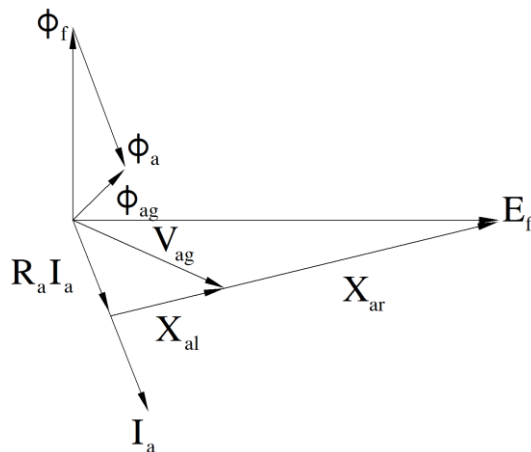
$$X_s = \omega \left(\frac{3}{2} L_{aa} + L_{al} \right)$$

در شرایط اتصال کوتاه :

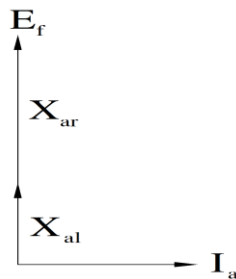
$$V = 0 \rightarrow E = Z.I$$

همواره طبیعت ماشین سنکرون ایجاب می نماید که $X_{ar} > X_{al} > R_a$ یا عبارتی $|X_{ar}| > |R_a + jX_{al}|$ باشد. پس با توجه به اینکه مقدار مقاومت بسیار کوچک می باشد در نتیجه در شرایط اتصال کوتاه بار ژنراتور همانند یک بار سلفی می باشد. بنابراین می توان مدار معادل ژنراتور را به شکل زیر در آورد. در این شرایط همانگونه که در شکل زیر دیده می شود با توجه به کم بودن مقدار R_a و X_{al} ولتاژ پایانه ها بسیار کم می باشد. بنابراین دیاگرام برداری ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه به صورت زیر خواهد بود.

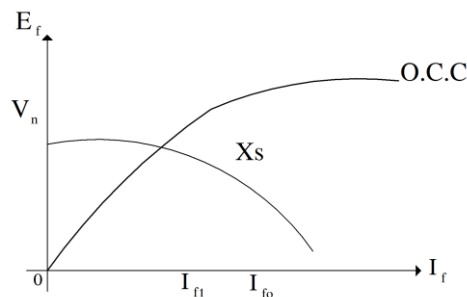




در شرایط اتصال کوتاه همانند بار سلفی فوران عکس‌العمل حالت مغناطیس زدائی دارد. و اگر از مقدار R_a صرف‌نظر نمائیم دیاگرام به شکل زیر در خواهد آمد.



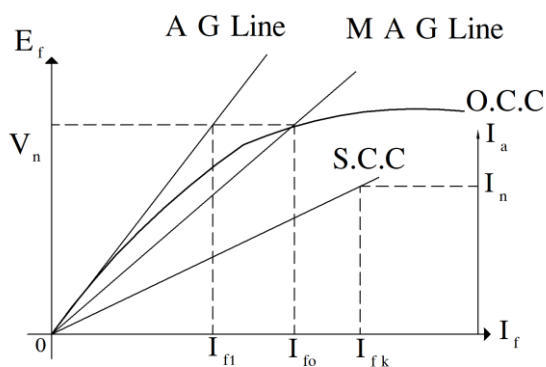
همانطور که گفته شد ولتاژ داخلی ژنراتور (E_f) از آزمایش بی‌باری بدست می‌آید و در این آزمایش به ازای جریان‌های بزرگ میدان، ماشین تا حدی در اشباع قرار دارد، در حالی که جریان آرمیچر (I_a) از آزمایش اتصال کوتاه بدست آمده که در آن مسئله اشباع مطرح نمی‌باشد. پس در جریان‌های بزرگ میدان ولتاژ گرفته شده از منحنی بی‌باری به ازای یک جریان معین همان ولتاژ شرایط اتصال کوتاه نمی‌باشد. با این وجود برای بدست آوردن راکتانس سنکرون با توجه به رابطه $X_s = \frac{E}{I_a}$ ، این روش تا نقطه اشباع دقیق می‌باشد. مقدار راکتانس با توجه به درجه اشباع تغییر می‌کند. منحنی زیر راکتانس سنکرون را به صورت تابعی از جریان میدان نشان می‌دهد.



نسبت اتصال کوتاه

پارامتر دیگری را که می‌توان مطرح نمود نسبت اتصال کوتاه یا Short Circuit Ratio (SCR) می‌باشد که طبق تعریف عبارتست از "نسبت جریان میدان لازم برای ایجاد ولتاژ نامی در شرایط مدار باز به جریان میدان لازم برای دستیابی به جریان آرمیچر نامی در شرایط اتصال کوتاه". در حالت پریونیت همواره رابطه زیر برقرار می‌باشد.

$$SCR = \frac{1}{X_s} \quad (\text{در حالت پریونیت})$$



$$SCR = \frac{I_{f0}}{I_{fk}}$$

مقدار SCR در ژنراتورهای قطب صاف بین 0.4 – 0.7 بوده ولی در ژنراتورهای قطب برجسته بین 1-1.4 می‌باشد.

از مزایای SCR بزرگ می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- افت ولتاژ کمتر و افزایش قابلیت اضافه بار.

۲- پایداری بیشتر.

۳- ایجاد توان ماکزیمم لحظه‌ای بیشتر.

و از معایب آن می‌توان به:

۱- وجود فاصله هوائی بزرگ و افزایش قیمت.

۲- جریان اتصال کوتاه بزرگ.

اشاره نمود. در واقع نسبت اتصال کوتاه طبق روابط زیر با فاصله هوائی مرتبط می‌باشد.

$$X_s = L_s \cdot \omega_s \rightarrow L_s \propto \frac{1}{g} \rightarrow SCR \propto g$$

g: فاصله هوائی ماشین.

L : اندوکتانس سنکرون .

X : راکتانس سنکرون .

W : فرکانس زاویه ای چرخش .

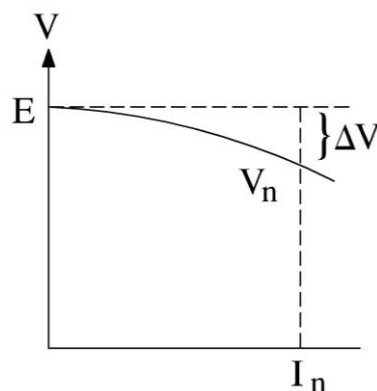
روش محاسبه تعیین درصد افت ولتاژ (رگولاسیون)

درصد افت ولتاژ یک ژنراتور سنکرون از رابطه $\% V \cdot R = \frac{E - V}{V} \times 100$ بدست می آید و باید برای تعیین

آن E را داشته باشیم . چهار روش برای تعیین E و در نتیجه محاسبه رگولاسیون ولتاژ وجود دارد .

الف - روش استفاده از منحنی بارگذاری .

این روش در مولدهای کوچک کاربرد دارد و مطابق روش آزمایش بارگذاری منحنی مشخصه بارگذاری ترسیم می گردد و توسط آن می توان افت ولتاژ را در هر باری مشخص نمود و رگولاسیون ولتاژ را بدست آورد .

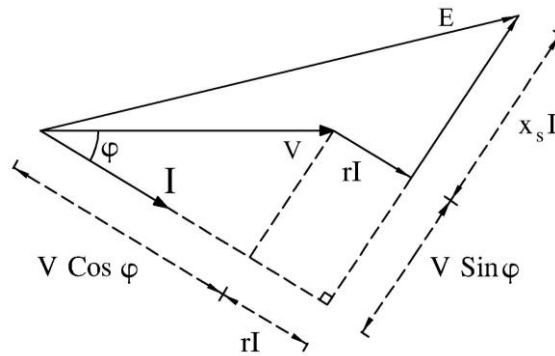


$$\% V \cdot R = \frac{\Delta V}{V_n} \times 100 = \frac{E - V}{V_n} \times 100$$

این روش را نمی توان در ماشین های بزرگ به سادگی بکار برد .

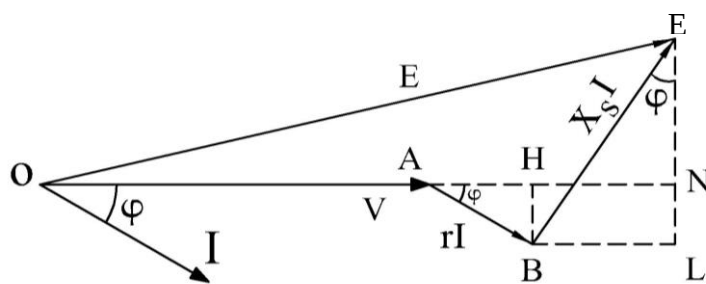
ب - روش امپدانس سنکرون .

امپدانس سنکرون را می توان از طریق آزمایش های بی باری و اتصال کوتاه تعیین نمود و با داشتن مقاومت اهمی سیم پیچ ها ، راکتانس سنکرون را نیز به دست آورد . در شکل زیر دیاگرام برداری ولتاژها و چگونگی محاسبه E نشان داده شده است .



$$E_{ph} = \sqrt{(V \cdot \cos \varphi + R I)^2 + (V \cdot \sin \varphi \pm x_s I)^2}$$

پس از تعیین E می توان رگولاسیون را از فرمول مربوطه محاسبه نمود. همچنین می توان با اندکی تقریب مقدار E را از شکل روبرو چنین بدست



$$E = OC \approx ON$$

$$= OA + AH + HN$$

$$= V + R \cdot I \cdot \cos \varphi + x_s \cdot I \cdot \sin \varphi$$

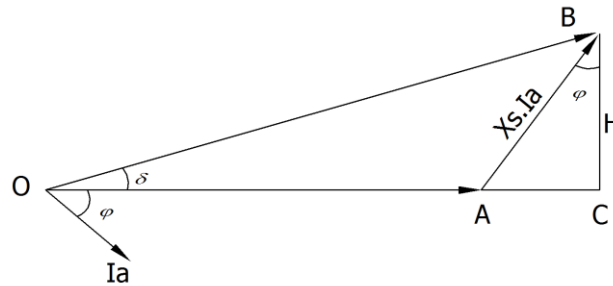
$$\Delta V = E - V = R \cdot I \cdot \cos \varphi + x_s \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$\% V \cdot R = \frac{R \cdot I \cdot \cos \varphi \pm x_s \cdot I \cdot \sin \varphi}{V} \times 100$$

در این رابطه و نیز رابطه قبل علامت مثبت برای بار سلفی و علامت منفی برای بار خازنی است.

رابطه توان با مساحت مثلث دیاگرام برداری ژنراتور

دیاگرام برداری زیر را در نظر بگیرید. می خواهیم بررسی نماییم مساحت مثلث ایجاد شده در این دیاگرام با توان ژنراتور چه ارتباطی دارد.



$$S_{\Delta} = \frac{OA \times BC}{2}$$

$$BC = H = OB \cdot \sin(\delta) = E \cdot \sin(\delta) = AB \cos(\varphi) = X_s \cdot I_a \cos(\varphi)$$

$$S_{\Delta} = \frac{E \cdot V}{2} \sin(\delta)$$

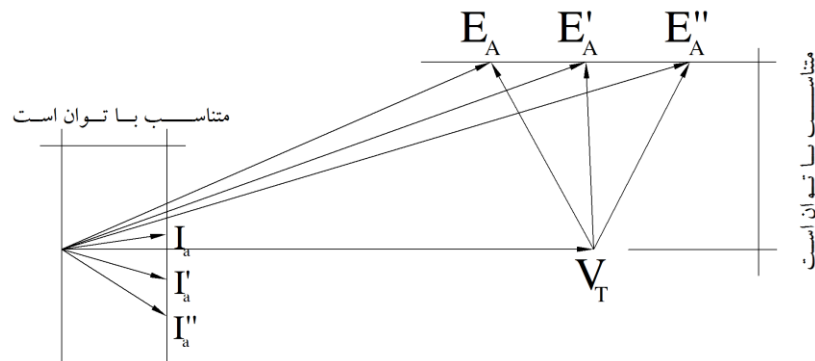
$$P = \frac{E \cdot V}{X_s} \sin(\delta)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} P \cdot X_s$$

همانگونه که در معادله اخیر دیده می شود مساحت مثلث با توان ارتباط دارد.

اثر تغییر میدان تحریک بر کار ژنراتور

با تغییر تحریک ژنراتور، توان ژنراتور تغییری نکرده ، چراکه توان ژنراتور با تغییر توان مکانیکی ورودی تغییر می نماید. در واقع به همان نسبت که E_a افزایش پیدا می کند ، $\sin(\delta)$ هم کاهش می یابد. اکنون که توان ثابت است در نتیجه باید مساحت مثلث توان ثابت باشد و بدلیل اینکه مساحت مثلث توان ثابت است ، پس باید ارتفاع مثلث ثابت بماند . (با فرض اینکه ولتاژ ترمینال ثابت است). به طور کلی با توجه به دو معادله $P = V \cdot I_a \cos(\varphi)$ و $P = \frac{E \cdot V}{X_s} \sin(\delta)$ و ثابت بودن توان ، باید عبارت های $I_a \cos(\varphi)$ و $E \sin(\delta)$ ثابت بماند. پس با افزایش تحریک تغییر دیاگرم به صورت زیر می باشد .



اثر تغییرات بار بر روی ژنراتور

رفتار ژنراتور سنکرون زیر بار بشدت تابع ضریب توان بار و کارکرد آن به تنهایی یا موازی با دیگر ژنراتورهای سنکرون است .

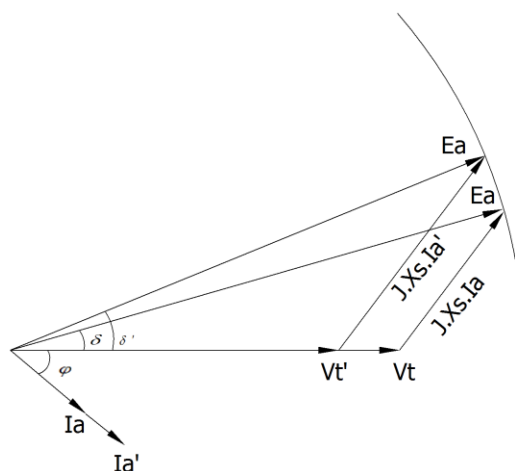
ژنراتوری را در نظر بگیرید که باری را تغذیه می کند . اگر با ژنراتور را زیاد کنیم چه روی می دهد.



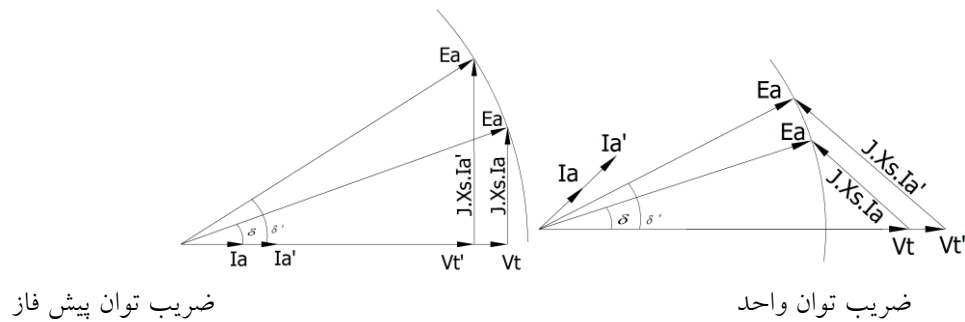
افزایش بار به معنای افزایش توان حقیقی و یا واکنشی است که از ژنراتور کشیده می شود. این افزایش بار باعث زیاد شدن جریان بارکشیده شده از ژنراتور می شود. چون مقاومت میدان تغییری نکرده است ، جریان میدان ثابت و بنابراین شار میدان (ϕ) نیز ثابت است . بدلیل اینکه سرعت ژنراتور را ثابت نگه داشته ایم ، اندازه ولتاژ داخلی E_a ثابت می ماند. پس با تغییر بار چه چیزی تغییر می کند؟ بارهای مختلف زیر را در نظر بگیرید :

آ . بار سلفی

اگر بار افزایش یابد بدین معناست که جریان بار ژنراتور نیز افزایش یافته است ، ولی نسبت به V_t همان زاویه قبلی ϕ را خواهند داشت . بنابراین ولتاژ عکس العمل $jX_s I_a$ بزرگتر از قبل می شود اما زاویه اش تغییر نمی کند. $jX_s I_a$ باید انتهای V_t را که در زاویه صفر درجه قرار دارد به انتهای E_a که به رغم تغییر بار اندازه اش ثابت است وصل کند. اگر این محدودیت ها را در رسم دیاگرام فازوری در نظر گیریم ، تنها یک نقطه وجود دارد که در آن ولتاژ عکس العمل با موقعیت قبلی اش موازی و اندازه اش افزایش یافته است.

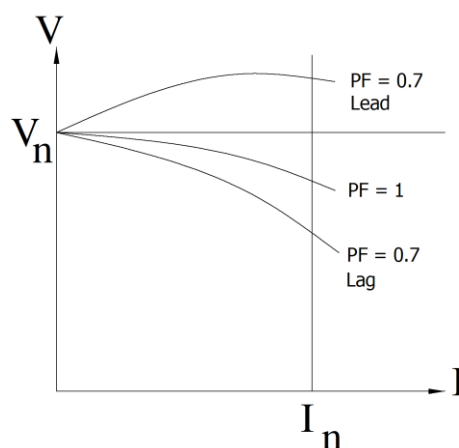


در نتیجه با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها دیده می‌شود که با افزایش بار ولتاژ ترمینال کاهش شدیدی می‌یابد و زاویه گشتاور (δ) افزایش یافته است. برای بار با ضریب توان واحد (اهمی) و پیش‌فاز هم به همین صورت می‌توان دیاگرام برداری را رسم نمود.



نتیجه گیری :

- ۲- اگر مقدار بار با ضریب توان پس فاز متصل به ژنراتور افزایش یابد، ولتاژ ترمینال (V_t) به شدت کاهش می‌یابد، E ثابت بوده و زاویه قدرت یا زاویه گشتاور (δ) افزایش یافته.
 - ۳- اگر مقدار بار با ضریب توان واحد متصل به ژنراتور افزایش یابد، ولتاژ ترمینال اندکی کاهش یافته، و δ هم اندکی افزایش می‌یابد.
 - ۴- اگر مقدار بار با ضریب پیش فاز متصل به ژنراتور افزایش یابد، ولتاژ ترمینال افزایش و زاویه گشتاور نیز اندکی افزایش می‌یابد.
- در حالت کلی با افزایش بار، ژنراتور ناپایدار می‌شود چراکه زاویه گشتاور در تمامی حالات افزایش یافته.

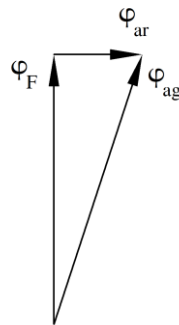


همانگونه که در شکل دیده می‌شود:

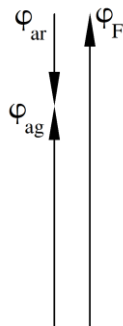
- ۱- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان پس فاز کار می‌کند تنظیم ولتاژ "مثبت و نسبتاً بزرگی" دارد .
- ۲- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان واحد کار می‌کند تنظیم ولتاژ "مثبت و کوچک" دارد.
- ۳- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان پیش فاز کار می‌کند ، تنظیم ولتاژ "منفی" دارد.

مقایسه فوران‌ها در بارهای مختلف

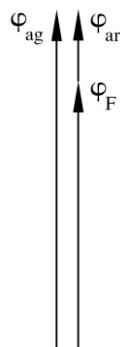
حالت اهمی :



حالت سلفی: این حالت خاصیت مغناطیس زدائی دارد و با تحریک ثابت ولتاژ کمتر داریم.



حالت خازنی: این حالت خاصیت مغناطیسی زیاد داشته و با تحریک ثابت ولتاژ بیشتری داریم

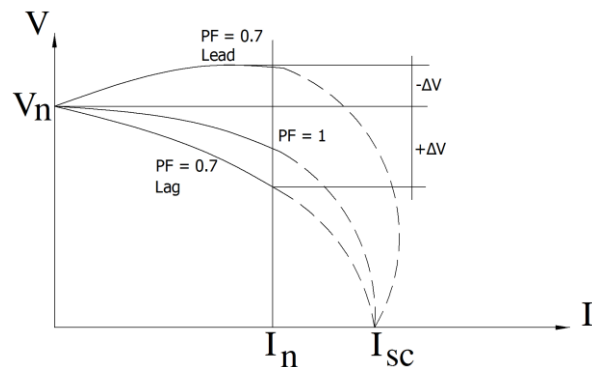


مشخصات عملکرد ژنراتور سنکرون در حالت ماندگار

مشخصات حالت ماندگار ماشین سنکرون بر اساس روابط بین ولتاژ پایانه‌ای، جریان میدان، جریان آرمیچر، ضریب توان و بازده بیان می‌شود.

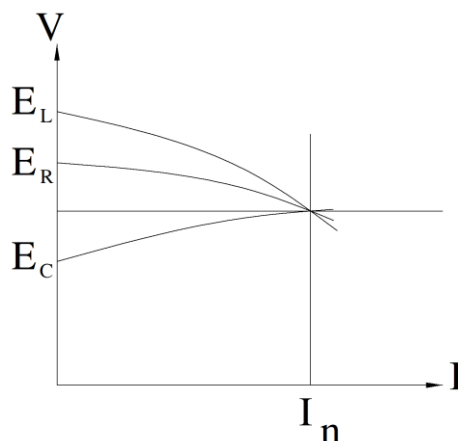
آ - منحنی بارداری ژنراتور در تحریک یکسان

بدلیل ثابت بودن تحریک E_a ثابت می‌باشد، و همانگونه که در مباحث قبلی گفته شد در بارهای مختلف با افزایش بار یا جریان آرمیچر، ولتاژ ترمینال تغییراتی را به صورت زیر داشت. افزایش بار در حالت خازنی موجب افزایش بیش از حد ولتاژ می‌گردد.



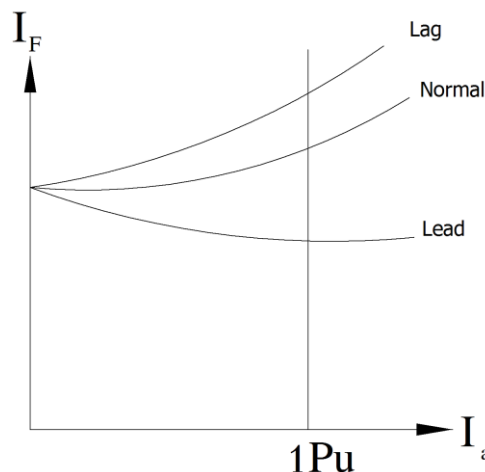
ب - منحنی بارداری ژنراتور سنکرون در نقطه نامی مشترک.

این منحنی از همان دیاگرام برداری ژنراتور سنکرون گرفته شده است، با این فرض که اگر بخواهیم ولتاژ ترمینال V_t ثابت بماند، پس در جریان نامی، بار سلفی به E_a بیشتر و بار خازنی به E_a کمتر نیازمند می‌باشد.



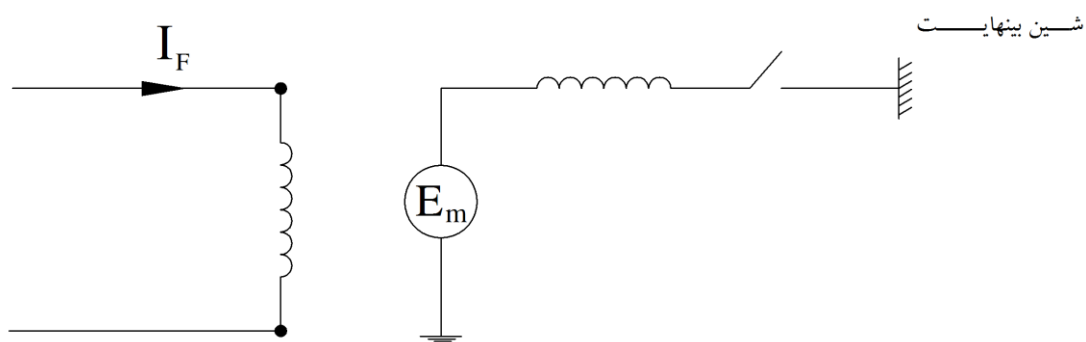
ج - منحنی کمپوندینگ

این منحنی نشان‌دهنده جریان میدان لازم، و جریان آرمیچر برای حفظ ولتاژ پایانه‌ای نامی بر حسب توان باری با ضریب توان ثابت را نشان می‌دهد. این منحنی با منحنی بارداری ژنراتور در تحریک ثابت مرتبط است. مثلاً در منحنی بارداری برای بار سلفی در E_a ثابت، با افزایش جریان، ولتاژ کاهش می‌یابد. پس نیازمند به تحریک بیشتری هستیم تا بتواند این کاهش ولتاژ را جبران نماید.



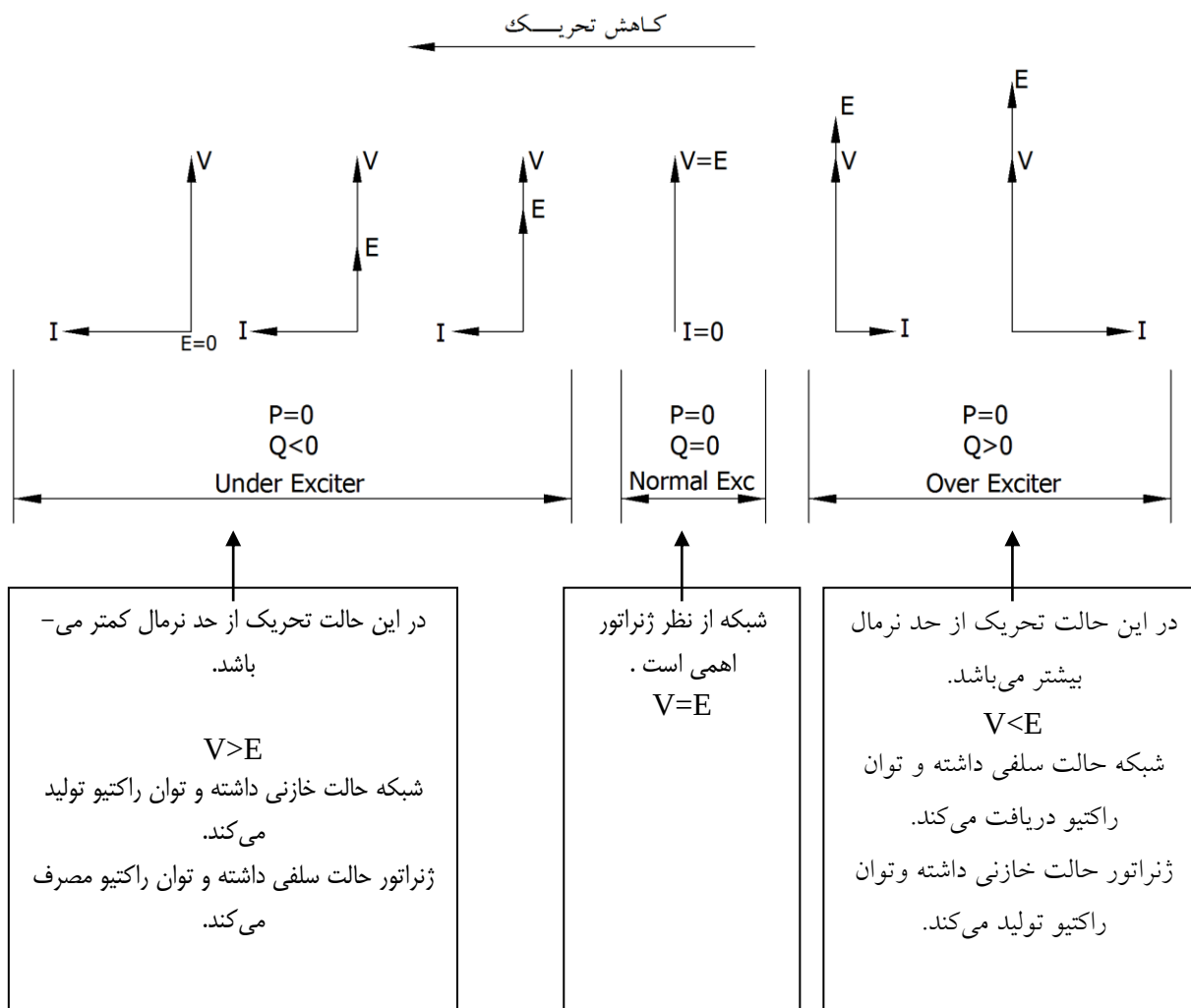
د - منحنی های V

این منحنی رابطه بین جریان آرمیچر و جریان میدان را در ولتاژ پایانه‌ای و توان اکتیو ثابت را بیان می‌کند. برای درک بهتر این منحنی رفتار ژنراتور در شبکه‌ای با توان اکتیو ثابت را بررسی می‌نماییم.

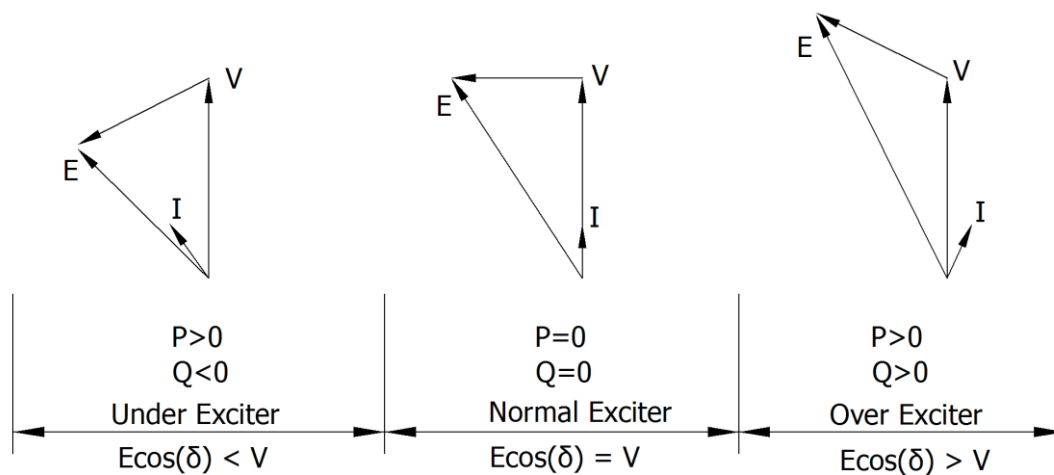


دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

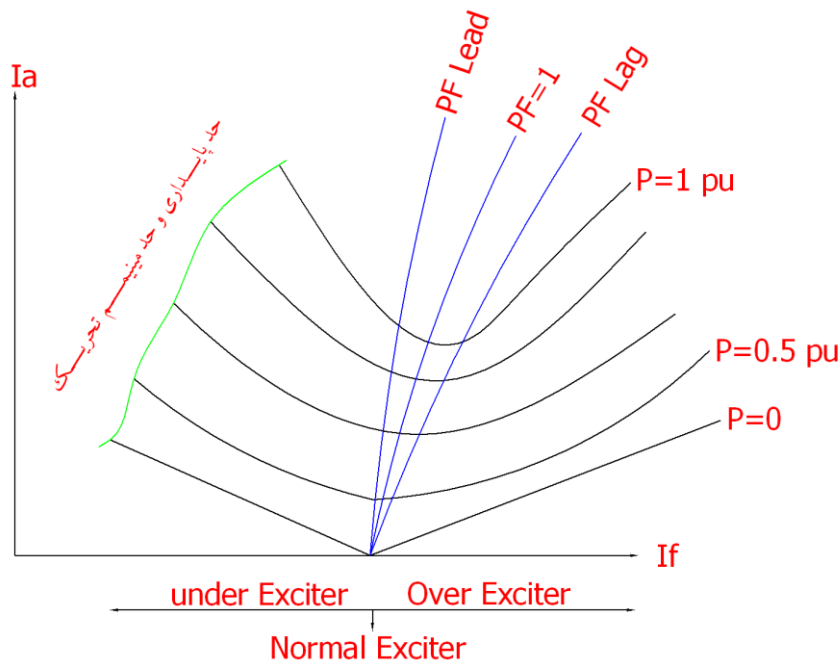
- ۱- توان ثابت و صفر باشد. ($P = 0$): زمانی توان صفر است که E و V بر هم منطبق باشند و یا $\delta = 0$ باشد. در این حالت فقط جریان راکتیو داریم. اکنون تحریک را از $E > V$ شروع به کاهش داده تا به تحریک صفر برسیم. جریان که در این حالت در شبکه جاری می‌باشد، جریان راکتیو است. رفتار مقدار جریان در شبکه به صورت زیر می‌باشد.



۲- توان ثابت و مثبت. ($P > 0$): در این حالت هم ، مانند حالت قبلی ولتاژ ثابت و $\delta > 0$ می-باشد . از طرفی بدلیل اینکه توان ثابت می-باشد ، پس $E \cdot \sin(\delta)$ و $I \cos(\varphi)$ هم ثابت می-باشد. باز هم با کاهش تحریک تغییرات مقدار جریان را بررسی می-نماییم .



همانگونه که در دو حالت قبل بررسی گردید ، در زمانی که تحریک زیاد می باشد (Over exciter) جریان هم زیاد است و شبکه حالت سلفی و ژنراتور حالت خازنی را دارا می باشد. با کاهش تحریک ، جریان کاهش یافته تا به تحریک نرمال برسیم . در تحریک نرمال $E \cos(\delta) = V$ می باشد و توان راکتیو برابر صفر است ($Q=0$) ، پس اگر توان اکتیو هم برابر صفر باشد ($P=0$) ، جریان هم صفر می شود. با کاهش هرچه بیشتر تحریک ، جریان بار حالت خازنی گرفته و ژنراتور حالت سلفی را پیدا نموده و به سمت ناپایداری پیش می رود ، ولی مقدار جریان باز افزایش می یابد.



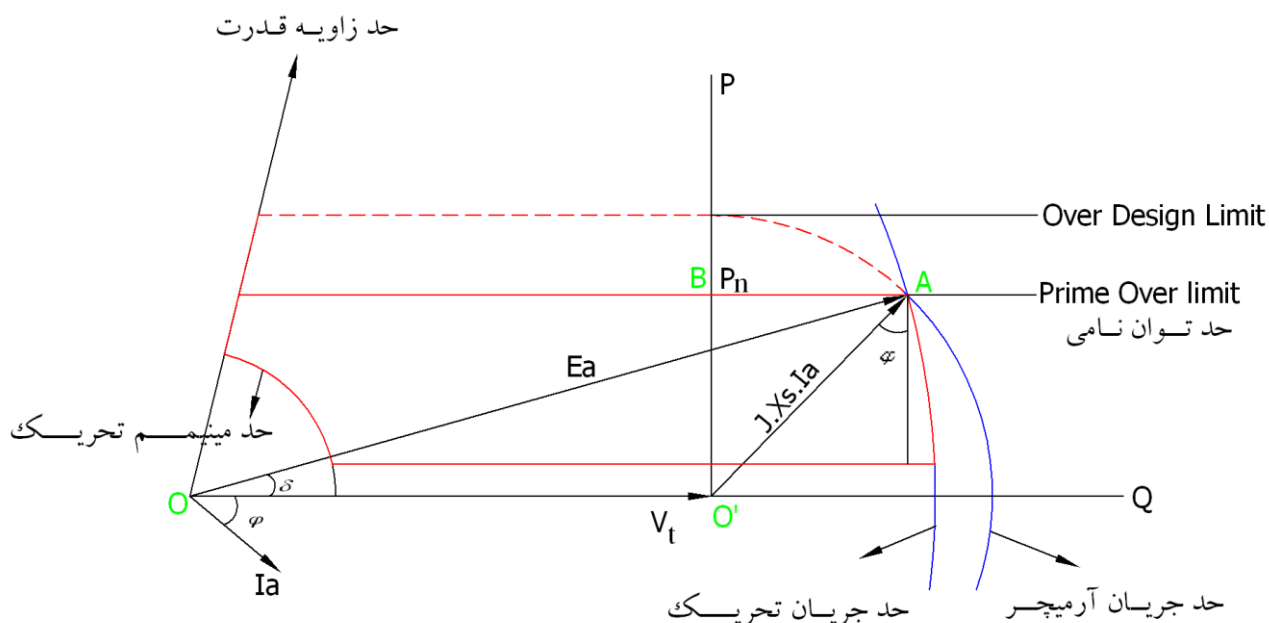
در شکل بالا خط چین ها را می توان مکان هندسی ضریب توان ثابت و یا همان منحنی کمپوندینگ است

و- منحنی قابلیت (Power Chart or Capability Curve)

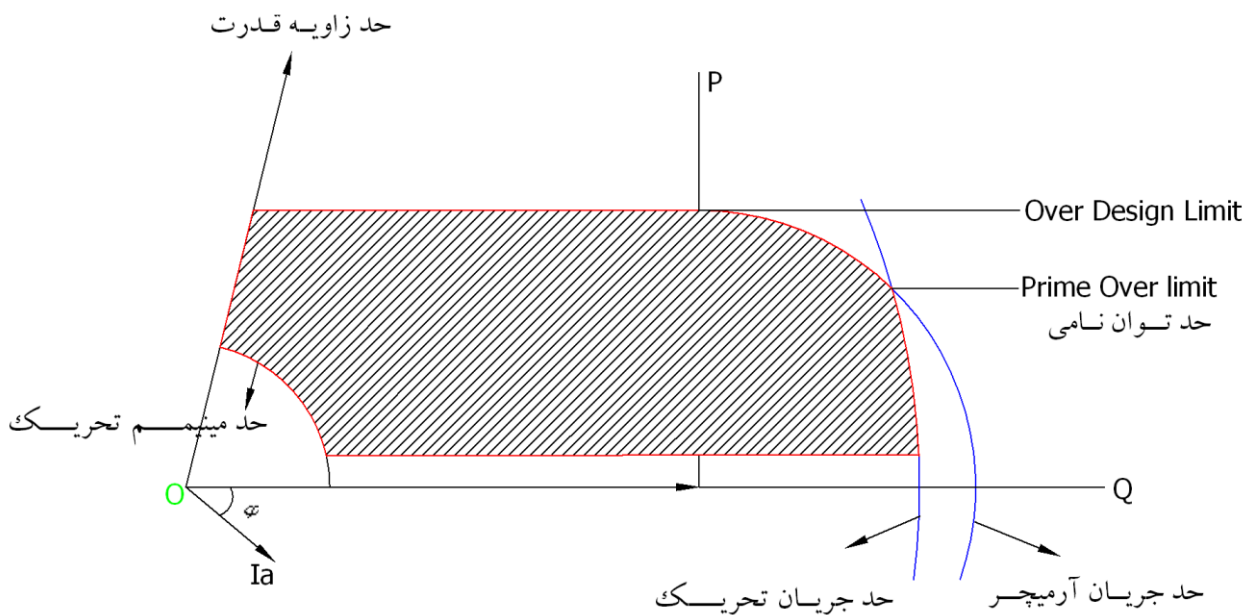
همواره محدودیت هایی بر عملکرد ماشین های الکتریکی مخصوصا ژنراتورها حاکم بوده . چنانچه بتوان این محدودیت ها را با رسم منحنی مشخص نمود می توان امکان کنترل و نگهداری هرچه بهتر را به اپراتور نیروگاه و یا هر فرد دیگر مرتبط با ماشین داد. برای ژنراتور محدودیت های زیر را مطرح می گردند :

- ۱- به لحاظ تئوری حد زاویه قدرت یا δ مقدار ۹۰ درجه می باشد ، که این مقدار را حد تئوری δ گویند . ولی معمولا ژنراتورها تا حد δ حدود ۸۵ درجه برای کوتاه مدت می توانند قرار گیرند.

- ۲- جریان تحریک از یک حدی نباید کمتر شود . چراکه باعث کاهش مقدار ولتاژ بی‌باری و افزایش زاویه قدرت و بدنبال آن ناپایداری را بدنبال خواهد داشت. به این حد ، حد مینیمم تحریک گویند.
- ۳- جریان تحریک نباید از یک مقدار بیشتر شود. زیرا بدنبال آن مسائل حرارتی و عایقی سیم‌پیچ رتور را خواهیم داشت ، که به آن حد ماکزیمم جریان تحریک گویند.
- ۴- جریان استاتور هم نباید بدلیل مسائل حرارتی و عایقی از یک حدی بیشتر شود.
- ۵- درجه حرارت توربین نباید از یک حدی پایین‌تر آید ، به همین دلیل توان ژنراتور نمی‌تواند خیلی کم باشد.
- ۶- ژنراتور تا یک حدی توان خواهد داد و آن را توان نامی گویند. ولی چنانچه از یک حدی بیشتر شود باعث ناپایداری می‌گردد. اگر توربین **Over Design** طراحی شده باشد، ژنراتور خواهد توانست توان بیشتری را بدهد. در غیر این صورت ژنراتور حد توان نامی یا حد توان **PrimeOver** را خواهد داد.
- با توجه به محدودیت‌های گفته شده می‌توان منحنی را این‌گونه رسم نمود .



همچنین در شکل زیر محدوده مورد نظر هاشور زده شده است .



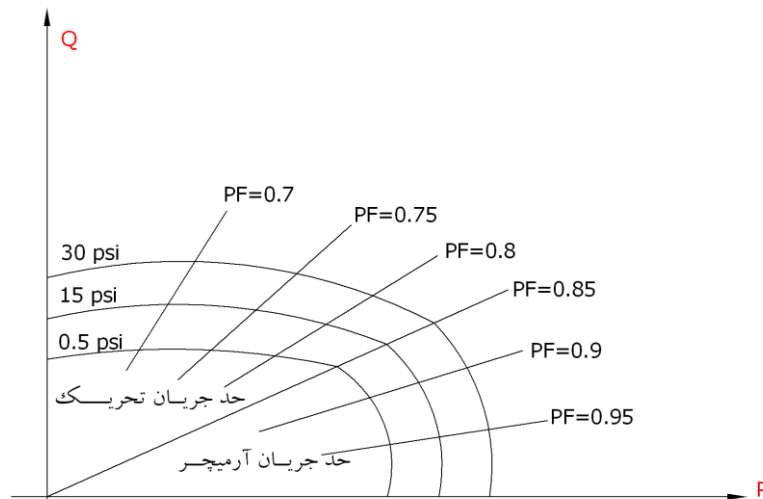
نکات رسم این منحنی عبارتند از :

- ۱- حد جریان تحریک را دایره‌ای به شعاع E_f و مرکز O نمایش دادیم زیرا که $E_f \propto I_f$ می‌باشد.
- ۲- حد جریان آرمیچر را با دایره‌ای به شعاع $X.I$ و مرکز O' نمایش دادیم. زیرا که $X.I \propto I_a$ می‌باشد.
- ۳- هر نقطه روی محور عمودی برابر است با تصویر جریان روی آن یا $O'B = I \cdot \cos(\phi)$ و چون ولتاژ ثابت می‌باشد، پس محور قائم می‌تواند محور توان اکتیو و محور افقی، محور توان راکتیو باشد.
- ۴- اگر ژنراتور با ضریب قدرت نامی کار کند پس $O'B$ یا توان نامی هم متناسب با آن می‌باشد، ولی اگر ژنراتور بتواند $\cos(\phi) = 1$ را تامین نماید یا توربین Over Design باشد، می‌تواند نقطه کاری A را تا نقطه ۱ پریونیت بالا ببرد. در چنین شرایطی منحنی قابلیت با خط چین نمایش داده شده.

۵- در ضریب توان بین ۱ و مقدار نامی، گرم شدن سیم‌پیچ آرمیچر، عامل محدودکننده می‌باشد.

۶- در ضریب توان‌های کمتر از مقدار نامی، گرم شدن سیم‌پیچ میدان، عامل محدود کننده است.

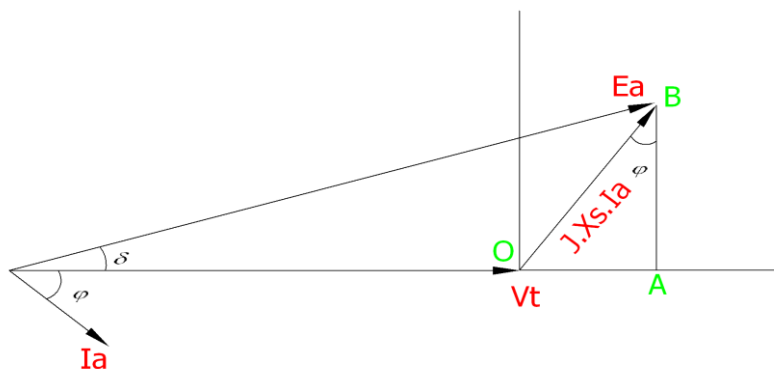
چنانچه مسائل خنک‌کنندگی را بخواهیم مد نظر قرار دهیم، در واقع حد جریان آرمیچر و تحریک را افزایش داده‌ایم. در زیر یک مجموعه منحنی قابلیت برای یک ژنراتور بزرگ توربینی که با هیدروژن خنک می‌شود را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها ماکزیمم بار واکنشی متناظر با مقادیر مختلف توان حقیقی، هنگام کار در ولتاژ پایانه‌ای نامی را نشان می‌دهد. در این منحنی نسبت به منحنی قبلی، مکان محورهای P و Q جابجا شده اند.



سه منحنی نشان داده شده در شکل بالا با مقادیر مختلف فشار گاز هیدروژن خنک کن ، متناظراند. همانطور که دیده می شود ، افزایش فشار گاز خنک سازی را بهتر می کند و امکان کار در بار بزرگتر را به ماشین می دهد . این منحنی راهنمای ارزشمندی برای طراحان و تکنسین ها می باشد. در نگاهی دیگر می توان گفت که این منحنی بر اساس کار در شرایط ولتاژ پایانه ای و جریان آرمیچر ثابت در ماکزیمم مقداری که سیستم خنک کنندگی امکان می دهد ، با ثابت بودن توان ظاهری که از حاصل ضرب ولتاژ در جریان بدست می آید ، متناسب است.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V.I$$

پس با ثابت بودن توان ظاهری ، نمودار توان واکنشی بر حسب توان حقیقی ، دایره ای به مرکز مبدأ بوده و همچنین اگر توان ظاهری ثابت باشد ، پس با توجه به اینکه ولتاژ پایانه ای را ثابت فرض نموده ایم ، جریان آرمیچر ثابت است که این با ایجاد گرمای ثابت در سیم پیچ آرمیچر متناظر است. پس منحنی قابلیت تصویری از توان مختلط $S = P + jQ$ است که با فرض ثابت بودن ولتاژ ترمینال (V_t) و برابر بودن آن با ولتاژ نامی ژنراتور ، می توان آن را از نمودار فیزوری ژنراتور بدست آورد. ولی باید این منحنی را با دیاگرام فیزوری ژنراتور با مقیاس بندی مناسب منطبق نمود.



$$AB = X_s \cdot I_a \cdot \cos(\varphi)$$

$$OA = X_s \cdot I_a \cdot \sin(\varphi)$$

$$P = 3V_t \cdot I_a \cos(\varphi)$$

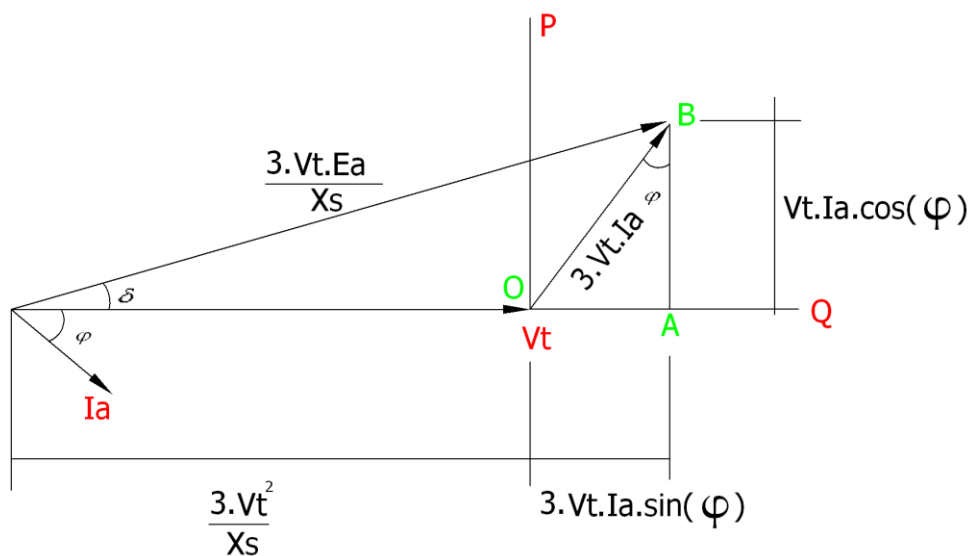
$$Q = 3V_t \cdot I_a \sin(\varphi)$$

$$S = 3V_t \cdot I_a^*$$

بنابراین با توجه به روابط بالا، می‌توان محورهای عمودی و افقی را بر حسب توان اکتیو و راکتیو تغییر مقیاس داد. ضریب این تغییر مقیاس برابر است با $\frac{3 \cdot V_t}{X_s}$.

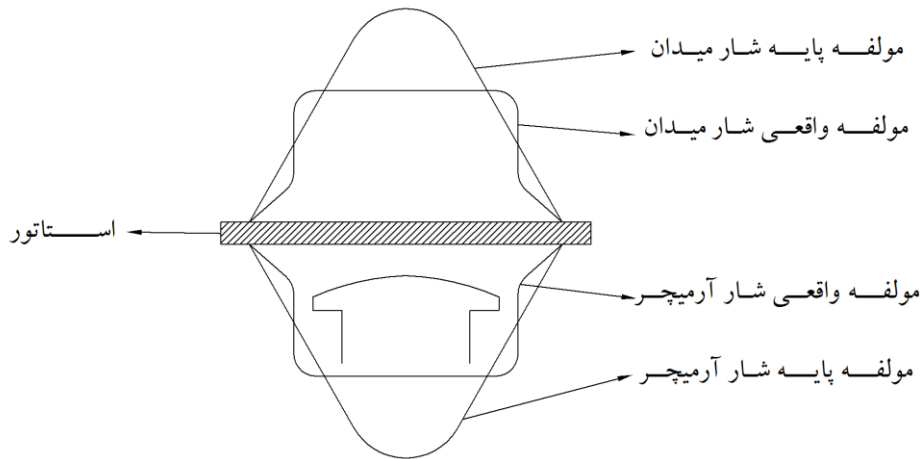
$$P = 3V_t \cdot I_a \cos(\varphi) = 3 \frac{V_t}{X_s} \cdot (X_s \cdot I_a \cos(\varphi))$$

$$Q = 3V_t \cdot I_a \sin(\varphi) = 3 \frac{V_t}{X_s} \cdot (X_s \cdot I_a \sin(\varphi))$$

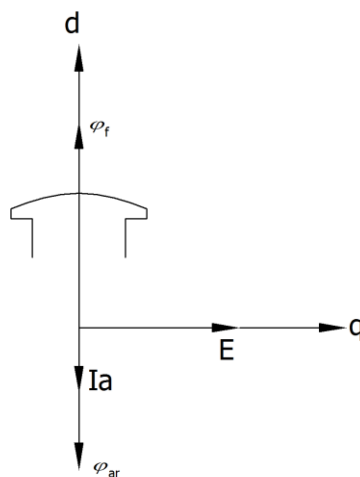


اثرات برجسته بودن قطب‌ها

همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود، هدایت مغناطیسی یا پرمانس در راستای محور قطب‌ها (محور مستقیم d) خیلی بزرگتر از پرمانس در راستای عمود بر محور قطب‌ها (محور متعامد q) می‌باشد.

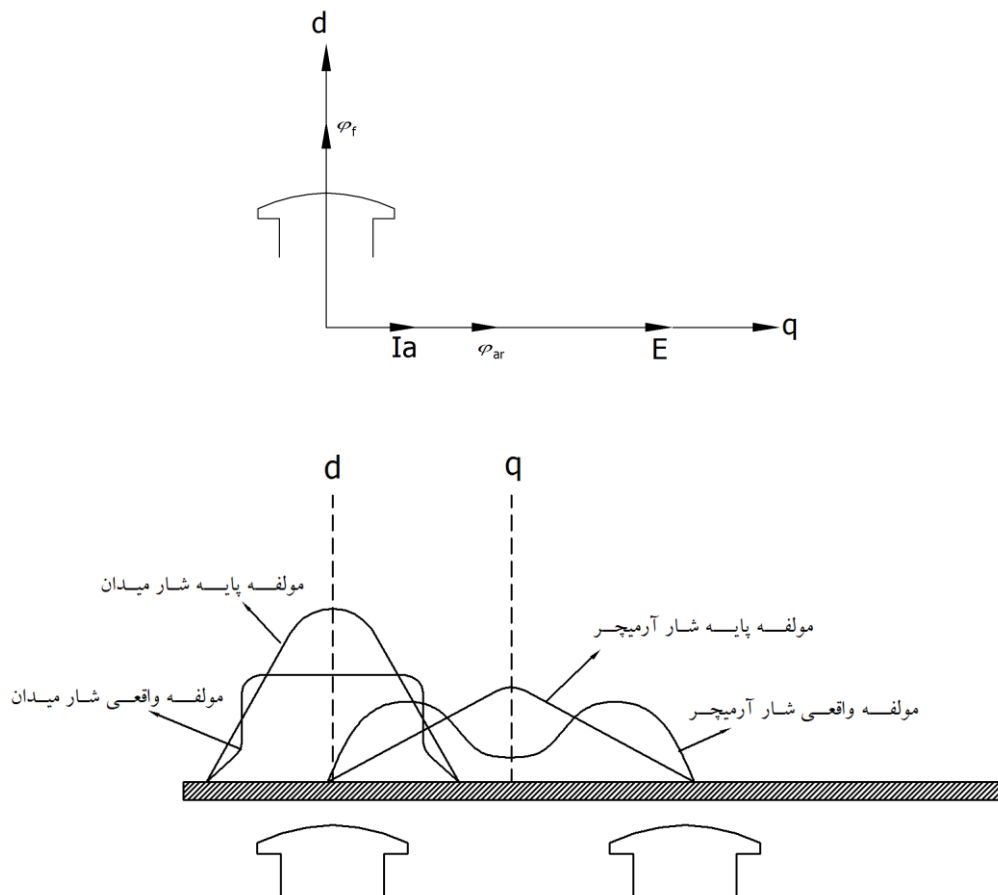


سیم‌پیچ‌های میدان شاری در امتداد قطب‌های میدان تولید کرده (در امتداد محور مستقیم) و ولتاژ تولید شده در آرمیچر طبق رابطه $E = -N \frac{d\phi}{dt}$ ، ۹۰ درجه نسبت به فوران پس‌فاز می‌باشد. طبق تعریف بدلیل اینکه محورهای مستقیم و متعامد نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند، پس بردار ولتاژ القاء شده بر روی محور q قرار می‌گیرد. که این نکته مهمی در تحلیل فیزوری ماشین‌های سنکرون قطب برجسته می‌باشد. حال فرض کنیم جریانی در آرمیچر پدید آمده است که ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ تولید شده پس‌فاز است (بار سلفی). با توجه به شکل و دیاگرام زیر، فوران جریان آرمیچر در جهت خلاف فوران تحریک می‌باشد.



حال جریانی را در نظر می‌گیریم که با ولتاژ تولید شده در آن هم‌فاز باشد (بار اهمی). فوران این جریان همانطور که در دیاگرام زیر دیده می‌شود نسبت به فوران میدان ۹۰ درجه پس‌فاز می‌باشد. ولی توزیع فوران

ناشی از غیر یکنواخت بودن فاصله هوایی یا غیر همناخت بودن رلوکتانس فاصله هوایی به صورت زیر می باشد. [فیتز]



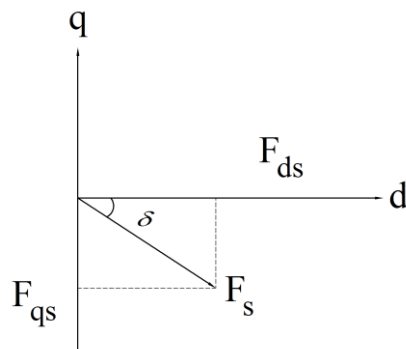
در مواقعی که واکنش آرمیچر در امتداد محور متعامد است، مولفه فضائی پایه شار واکنش آرمیچر به ازای جریان آرمیچر یکسان کمتر از مولفه فضائی پایه شار واکنش آرمیچر، در حالتی که در امتداد محور مستقیم قرار دارد، می باشد. اثر برجستگی را می توان در دیاگرام زیر بررسی نمود.

ماشین های قطب برجسته

در این گونه ماشین ها با توجه به فرمول $L = \frac{N^2}{R}$ در هر راستائی یک L جداگانه داریم. از آنجائی که مقاومت مغناطیسی (R_m) در راستای قطب ها (محور d) کمتر از مقاومت مغناطیسی در راستای عمود بر محور قطب ها (محور q) می باشد پس:

$$R_d < R_q \rightarrow L_d > L_q \rightarrow X_d > X_q$$

در ماشین‌های قطب برجسته ، نیرو محرکه مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر را که ریشه‌شان در سه جریان استاتور می‌باشد به دو مولفه بر روی محورهای مستقیم و متعامد تقسیم می‌گردند .



$$F_s \cdot \cos \delta = R_d \cdot \phi_d \rightarrow \phi_d = \frac{F_s \cdot \cos \delta}{R_d}$$

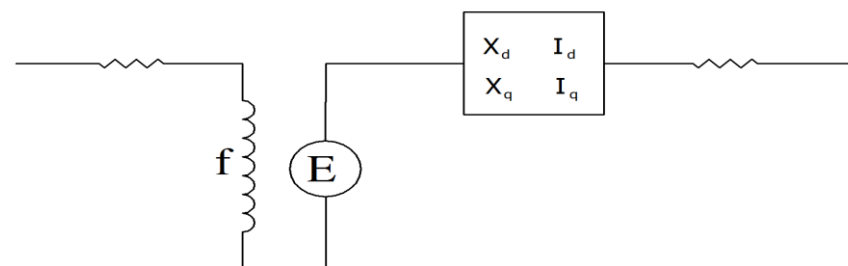
$$F_s \cdot \sin \delta = R_q \cdot \phi_q \rightarrow \phi_q = \frac{F_s \cdot \sin \delta}{R_q}$$

$$R_d < R_q$$

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d}$$

$$L_q = \frac{\lambda_q}{I_q}$$

در نتیجه در هر راستائی یک نوع راکتانس داریم .مدار معادل ماشین‌های قطب برجسته را می‌توان به صورت زیر نشان داد.



مقایسه‌ای بین ماشین‌های قطب برجسته و قطب صاف

ژنراتور قطب صاف (Cylindrical Pole):

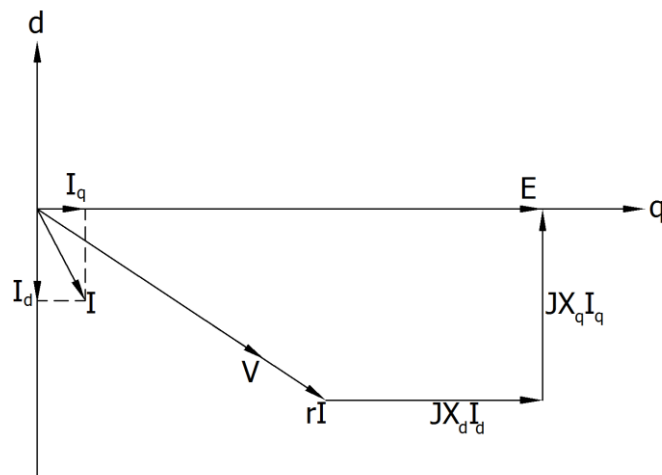
- ۱- در واحدهای نیروگاه‌های حرارتی (بخار - گاز) است کاربرد دارد.
- ۲- تعداد قطب‌های آن کم ($P=2$) و دور سنکرون $3000(\text{r.p.m})$ است.
- ۳- طول رتور زیاد و عمق آن کم است.
- ۴- بصورت افقی نصب شده.

ژنراتور قطب برجسته (Salient Pole):

- ۱- در واحدهای نیروگاهی دیزلی و آبی کاربرد دارد.
- ۲- تعداد قطب‌های آن زیاد ($P \geq 4$) و دارای دور کم می‌باشد. ($n_s \leq 1500$).
- ۳- طول ظاهری آن کم ولی قطر آن بزرگ بوده.
- ۴- بصورت افقی نصب شده.

دیاگرام برداری و معادلات ژنراتور قطب برجسته

دیاگرام برداری این ژنراتور را می‌توان با توجه به معادله $\hat{E}_f = V + r\hat{I} + JX_d\hat{I}_d + JX_q\hat{I}_q$ رسم نمود. همانطور که در قبل بیان شد راستای ولتاژ داخلی ژنراتور (E) در راستای محور (q) و راستای عمود بر آن در جهت محور d است. در نتیجه باید بتوان تمام پارامترها را بر روی این دو مولفه تجزیه نمود. حال فرض کنید ولتاژ داخلی E_f را مبنا قرار دهیم:



$$\hat{I} = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

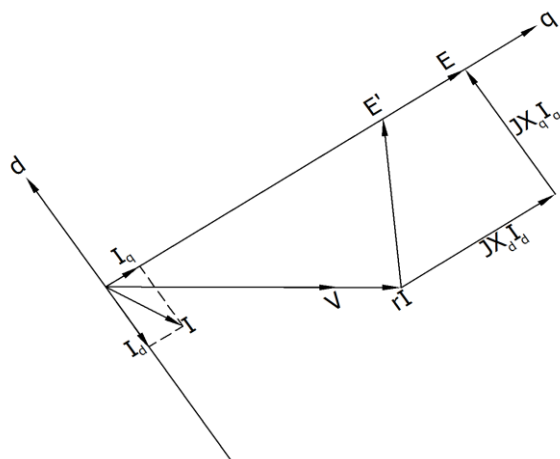
$$\hat{I}_d = |I_d| \times (-J)$$

$$|I_d| = |I| \cdot \sin(\phi + \delta)$$

$$\hat{I}_q = |I_q| \angle 0$$

$$|I_q| = |I| \cdot \cos(\phi + \delta)$$

و چنانچه ولتاژ ترمینال را مرجع قرار دهیم ، دیاگرام آن به صورت زیر در خواهد آمد.



$$|I_d| = |I| \cdot \sin(\phi + \delta)$$

$$|I_q| = |I| \cdot \cos(\phi + \delta)$$

$$V_d = V \cdot \sin(\delta)$$

$$V_q = V \cdot \cos(\delta)$$

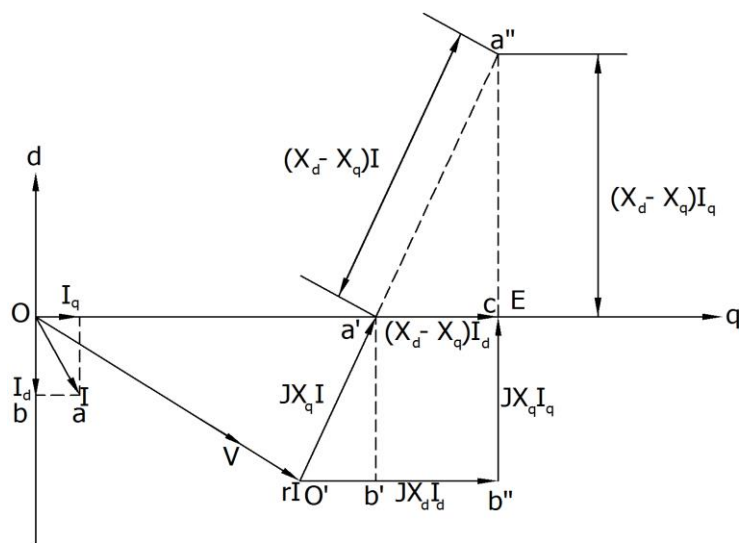
در دیاگرام‌های بالا ، و همچنین در حل مسائل جریان آرمیچر را باید به دو مولفه طولی و عرضی تجزیه نمود و این تجزیه نمودن با معلوم بودن زاویه $\delta + \phi$ میسر می‌باشد، این در حالی است که زاویه ϕ معلوم بوده ولی زاویه δ را نداریم. بنابراین جهت بدست آوردن زاویه قدرت ابتدا معادله $E' = V + r\hat{I} + JX_q \cdot \hat{I}$ را حل نموده تا زاویه E' را بدست آوریم ، این زاویه همان زاویه قدرت (δ) می‌باشد. دلیل آن را بصورت زیر اثبات می‌نمائیم.

$$E - E' = (V + r\hat{I} + JX_d \cdot \hat{I}_d + JX_q \cdot \hat{I}_q) - (V + r\hat{I} + JX_q \cdot (\hat{I}_q + \hat{I}_d))$$

$$E - E' = J(X_d - X_q) \cdot I_d$$

در رابطه اخیر I_d در جهت عمود بر I_q است پس $J \cdot I_d$ در جهت I_q می‌باشد. در نتیجه E' در جهت q می‌باشد.

نکته : در دیاگرام زیر یک مثلث اصلی داریم (مثلث oab) که مثلث جریان نام دارد و ۳ مثلث فرعی داریم که با استفاده از اصل تشابه مثلث‌ها با مثلث اصلی جریان مرتبط می‌باشد.



$$\Delta o'a''b'' = \Delta(main) \times (JX_d)$$

$$\Delta a'a''c = \Delta(main) \times (J(X_d - X_q))$$

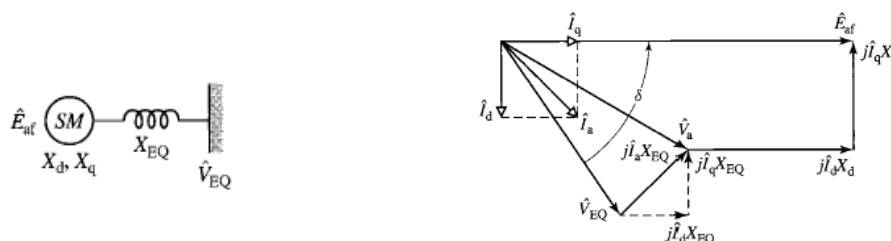
$$\Delta o'a'b' = \Delta(main) \times (JX_q)$$

نکته: E' همان E در حال قطب صاف است ولی در حالت قطب برجسته بدلیل وجود X_d و X_q این دو مقدار با هم اختلاف پیدا نموده‌اند. اگر قطب‌ها برجسته نبودند، $X_q = 0$ و $X_d = X_s$ بود. راکتانس محور متعامد یا X_q کمتر از راکتانس سنکرون محور مستقیم یا X_d است، زیرا رلوکتانس شکاف هوایی در امتداد محور متعامد بزرگتر است. X_q نوعاً بین $0.6X_d$ تا $0.7X_d$ است. در توربو آلترناتورها یک اثر قطب برجسته اندک وجود دارد. گرچه این ماشین‌ها با روتور استوانه‌ای هستند، ولی این اثر شیارهای روتور بر رلوکتانس محور متعامد ناشی می‌شود.

راکتانس‌های محورهای مستقیم و متعامد مانند راکتانس سنکرون X_s ماشین روتور استوانه‌ای، نسبت به چگالی شار ثابت نیستند و با افزایش چگالی شار اشباع می‌شوند. معمولاً برای هریک از پارامترها هم مقدار اشباع شده و هم مقدار اشباع نشده بدست می‌آید. مقادیر اشباع شده برای شرایط کار نوعی ماشین، یعنی ولتاژ پایانه‌ای نزدیک مقدار نامی بکار می‌رود.

مشخصات توان در ماشین های قطب برجسته

شکل زیر یک ماشین سنکرون قطب برجسته (SM) را نشان می دهد که از طریق یک امپدانس سری با مقدار X_{EQ} (راکتانس خط و ترانس) به شبکه بینهایت وصل شده است. از مقدار مقاومت بدلیل کوچک بودن آن چشم پوشی شده است. همچنین دیاگرام برداری آن در زیر دیده می شود.



با توجه به دیاگرام داریم :

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + jX_{EQ} \cdot \hat{I}_a + jX_d \cdot \hat{I}_d + jX_q \cdot \hat{I}_q$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + jX_{EQ} \cdot (\hat{I}_d + \hat{I}_q) + jX_d \cdot \hat{I}_d + jX_q \cdot \hat{I}_q$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + j(X_{EQ} + X_d) \hat{I}_d + j(X_{EQ} + X_q) \hat{I}_q$$

$$X_{EQ} + X_d = X_{dt}$$

$$X_{EQ} + X_q = X_{qt}$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + j(X_{dt}) \hat{I}_d + j(X_{qt}) \hat{I}_q$$

$$\hat{E}_{af} = E_{af} \angle 0$$

$$\hat{V}_{EQ} = V_{EQ} \angle -\delta$$

$$E_{af} = V_{EQ} \cdot \cos(\delta) - jV_{EQ} \cdot \sin(\delta) + j(X_{dt}) \hat{I}_d + j(X_{qt}) \hat{I}_q$$

$$\hat{I}_d = -jI_d$$

$$\hat{I}_q = I_q \angle 0$$

$$E_{af} = V_{EQ} \cdot \cos(\delta) - jV_{EQ} \cdot \sin(\delta) + (X_{dt}) I_d + j(X_{qt}) I_q$$

با توجه به معادله اخیر بدست آمده ، قسمت های حقیقی طرفین را باهم و قسمت های موهومی طرفین را با هم مساوی قرار می دهیم .

$$E_{af} = V_{EQ} \cdot \cos(\delta) + (X_{dt}) I_d$$

$$0 = -V_{EQ} \cdot \sin(\delta) + (X_{qt}) I_q$$

با توجه به این معادلات داریم :

$$I_q = \frac{V_{EQ} \cdot \sin \delta}{X_{qt}}$$

$$I_d = \frac{E_{af} - V_{EQ} \cdot \cos \delta}{X_{dt}}$$

ولتاژ شین بینهایت $\hat{V}_{EQ}$ به مولفه محور مستقیم $V_d = V_{EQ} \cdot \sin \delta$ و مولفه محور متعامد $V_q = V_{EQ} \cdot \cos \delta$ تجزیه می‌شوند که به ترتیب با $\hat{I}_d$ و $\hat{I}_q$ همفازند. توان را بدین صورت می‌توان محاسبه نمود.

$$S = V_{EQ} \cdot I^*$$

$$\hat{V}_{EQ} = V_q - JV_d$$

$$\hat{I} = I_q - JI_d$$

$$S = (V_q - JV_d) \cdot (I_q + JI_d)$$

$$S = (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) + J(V_q I_d - V_d I_q)$$

$$P = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q$$

$$Q = V_q I_d - V_d I_q$$

در روابط توان حقیقی و موهومی اخیر با توجه به مقدار جریان‌ها و ولتاژهای محورهای متعامد و مستقیم که قبلاً بدست آوردیم، داریم :

$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_{dt}} \sin(\delta) + \frac{V_{EQ}^2}{2} \left(\frac{1}{X_{qt}} - \frac{1}{X_{dt}} \right) \sin(2\delta)$$

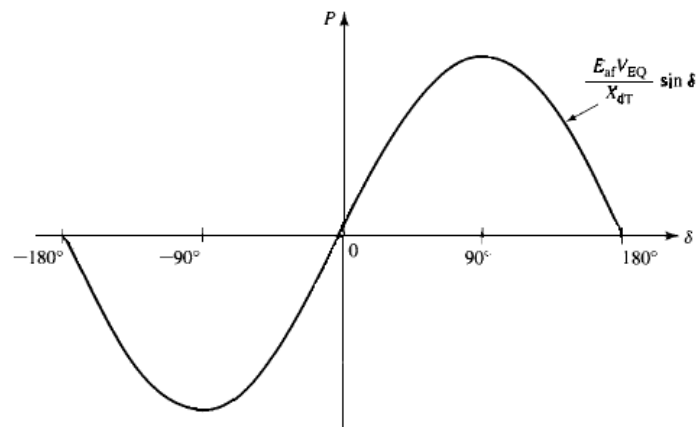
$$Q = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_{dt}} \cos(\delta) - V_{EQ}^2 \left(\frac{\cos^2(\delta)}{X_{dt}} - \frac{\sin^2(\delta)}{X_{qt}} \right)$$

اگر قطب‌ها برجسته نبودند، معادله توان حقیقی آن با توجه به مباحث قبلی برابر با مقدار زیر بود.

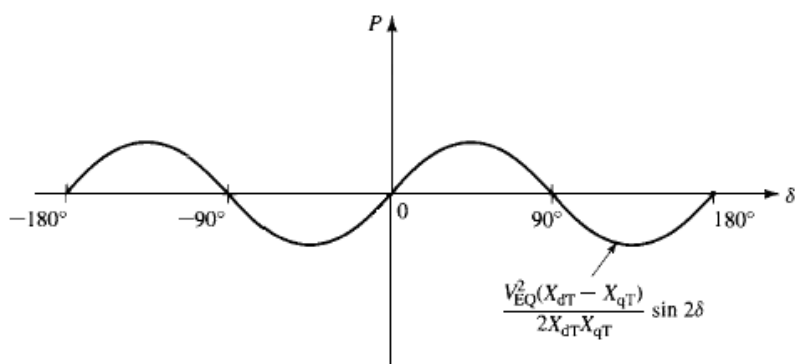
$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X} \sin(\delta)$$

$$X = X_s + X_{EQ}$$

چنانچه منحنی این معادله توان را بر حسب زاویه δ رسم نماییم، به صورت زیر خواهد بود. این مقدار توان برابر با مقدار مولفه اول توان در حالت قطب برجسته است.

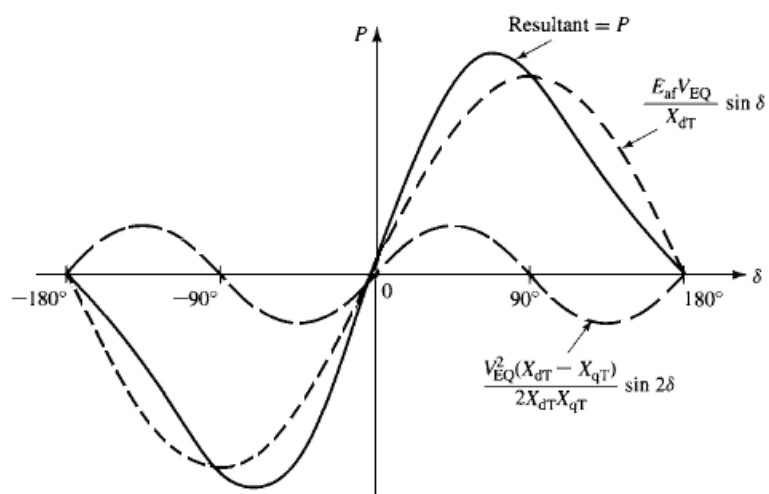


منحنی مولفه دوم توان ($\frac{V_{EQ}^2}{2} (\frac{1}{X_{qt}} - \frac{1}{X_{dt}}) \sin(2\delta)$) در حالت قطب برجسته نسبت به زاویه δ به صورت زیر خواهد بود. این منحنی بیانگر تغییرات توان در حالت قطع تحریک می‌باشد.



چنانچه دو حالت قبل را با هم جمع نماییم، منحنی توان در حالت قطب برجسته بدست خواهد آمد.

$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_{dt}} \sin(\delta) + \frac{V_{EQ}^2}{2} \left(\frac{1}{X_{qt}} - \frac{1}{X_{dt}} \right) \sin(2\delta)$$



نکاتی که در منحنی بالا دیده می‌شود، عبارتند از:

- ۱- اگر تحریک ژنراتور قطع شود ($E=0$)، با توجه به رابطه توان، باز هم مقداری توان در ژنراتور با توجه به مولفه دوم آن وجود دارد. از این حالت می‌توان در ژنراتورهای قطب صاف و با تغییر در مواد روتور و ایجاد حالت برجستگی با استفاده از مواد با رلوکتانس متغییر استفاده نمود تا با قطع تحریک، توان تولیدی یکباره صفر نگردد.
- ۲- جمله دوم توان بیانگر این حقیقت می‌باشد که موج شار شکاف هوایی، گشتاوری بوجود می‌آورد که می‌کوشد قطب‌های میدان را در موقعیتی قرار دهد که رلوکتانس آن مینیمم است. این جمله توان متناظر با گشتاور رلوکتانسی^۱ است.

$$P_R = \frac{V_{EQ}^2}{2} \left(\frac{1}{X_{qt}} - \frac{1}{X_{dt}} \right) \sin(2\delta)$$

$$T = \frac{P_R}{\omega_s}$$

در این رابطه، اگر شکاف هوایی یکنواخت باشد و یا به عبارت دیگر ژنراتور قطب صاف باشد، داریم $X_d = X_q$ و گشتاور صفر است.

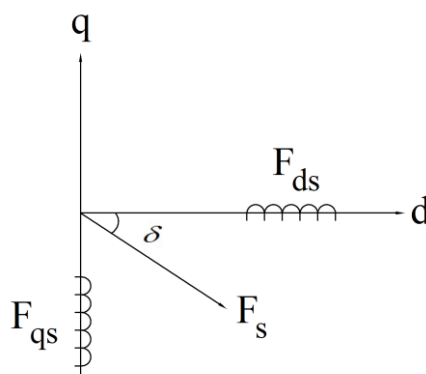
- ۳- ماشین‌های قطب برجسته به خاطر گشتاور رلوکتانسی، صلب‌تر از ماشین‌های روتور استوانه‌ای‌اند یعنی به ازای ولتاژ و X_{dt} برابر، ماشین‌های قطب برجسته، گشتاور مورد نظر را به ازای δ کوچکتری ایجاد می‌کنند و ماکزیمم گشتاوری که می‌تواند ایجاد کند، بزرگتر است.

- ۴- δ منفی، ناحیه کار موتور می‌باشند، مشخصه آنها تنها در علامت P تفاوت دارد. یعنی نواحی کار ژنراتوری و موتوری در صورت ناچیز بودن اثرات مقاوتی یکسان است. در گستره‌ای که شیب مشخصه زاویه توان مثبت است، عملکرد حالت ماندگار پایدار وجود دارد. در واقع ماشین‌های سنکرون قطب برجسته به پایداری شبکه کمک می‌کند.

تبدیل به متغیرهای محور مستقیم و محور متعامد

در مباحث قبلی، بیان نمودیم که پارامترهای آرمیچر ماشین سنکرون به دو مولفه چرخان، یکی همراه با محور سیم پیچ میدان (مولفه محور مستقیم d) و دیگری عمود بر محور سیم پیچ میدان (مولفه محور متعامد q) تقسیم نمودیم تا تحلیل ماشین قطب برجسته به دلیل داشتن رلوکتانس متغیر در فاصله هوایی ساده تر گردد. بدلیل اینکه کمیت های تبدیل یافته به همراه روتور می چرخند، بنابراین مسیرهای مغناطیسی ثابتی را می بینند.

نیرو محرکه مغناطیسی عکس العمل آرمیچر را می توان بر روی محورهای مستقیم و متعامد تجزیه نمود. همچنین می توان آنها را به صورت دو سیم پیچ بر روی محورهای d و q فرض نمود.



$$I_{ds} \cdot N = F_{ds}$$

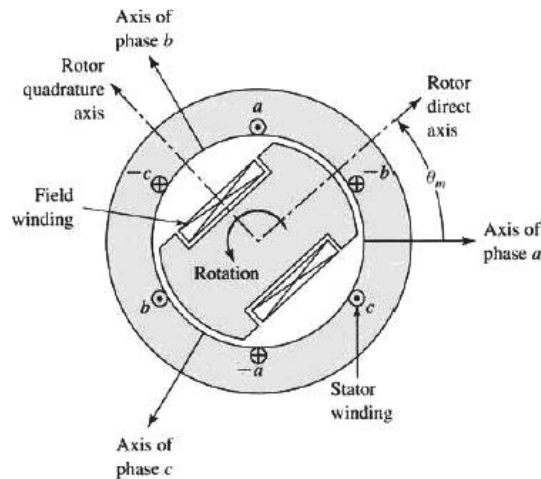
$$I_{qs} \cdot N = F_{qs}$$

روتور بوسیله یک ولتاژ dc تغذیه می گردد و با سرعت سنکرون می چرخد. پس جریان های بالا dc هستند. پس تا این مرحله تبدیلی اتفاق افتاده است و جریان های dc روتور به جریان های ac تبدیل شده اند و یا بالعکس. با توجه به اینکه در حالت ac سه جریان داریم ولی در اینجا دو جریان بوجود آمده، پس برای بالانس و تعادل بین جریان ها یک جریان I_0 که در شرایط تعادل برابر با صفر است تعریف می نماییم.

$$\begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix}^{AC} \rightarrow [Transformation] \rightarrow \begin{Bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \end{Bmatrix}^{DC}$$

ایده بنیادین تبدیل قدیمی است و در کارهای آندره بلوندل در فرانسه و روشهایی که گاهی اوقات روش دوواکنشی بلوندل نامیده می شود، ریشه دارد. ولی آنچه که در اینجا معرفی می گردد از کارهای دوهرتی،

نیکل ، پارک و همکارانش در آمریکا گرفته شده است . خود تبدیل که تبدیل dq0 نامیده می شود را می توان بر حسب زاویه الکتریکی θ_{me} بین محور مستقیم روتور و محور فاز a استاتور معرفی کرد . این زاویه در شکل زیر نشان داده شده است .



با تعریف S به عنوان یک کمیت از استاتور ، می توان تبدیل را به صورت ماتریسی زیر نوشت :

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120) & \cos(\theta_{me} + 120) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120) & -\sin(\theta_{me} + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

عکس تبدیل به صورت زیر است .

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} - 120) & -\sin(\theta_{me} - 120) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + 120) & -\sin(\theta_{me} + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix}$$

S کمیتی است که باید تبدیل شود و زیرنویس های d و q به ترتیب محور مستقیم و محور متعامد را نشان می دهند . یک مولفه سوم نیز که مولفه ترتیب صفر نامیده و زیرنویس 0 مشخص می شود نیز وجود دارد . این مولفه به این خاطر است که تبدیل یکتایی از سه کمیت سه فاز استاتور بدست آید . این مولفه با

مولفه‌هایی از جریان آرمیچر که شار خالصی در شکاف هوایی بوجود نمی‌آورند، و بنابراین گذر شار خالصشان در مدار روتور صفر است، متناظر است. در شرایط متعادل سه فاز این مولفه دارای مقدار صفر می‌باشد. همواره تبدیل $dq0$ به مقادیر لحظه‌ای اعمال می‌شود نه به مقادیر موثر. در این تبدیلات توان در طرفین برابر است لذا به آنها ماتریس‌های ارتوگنال گویند (توان ثابت)

روابط ماشین سنکرون بر اساس تبدیل $dq0$

همانطور که قبلاً بیان نمودیم، روابط شار و جریان در یک ماشین سنکرون، به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell_{aa} & \ell_{ab} & \ell_{ac} & \ell_{af} \\ \ell_{ba} & \ell_{bb} & \ell_{bc} & \ell_{bf} \\ \ell_{ca} & \ell_{cb} & \ell_{cc} & \ell_{cf} \\ \ell_{fa} & \ell_{fb} & \ell_{fc} & \ell_{ff} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{pmatrix}$$

مقادیر ضریب خودالقائی و القای متقابل برای ماشین **قطب صاف** را به صورت زیر بدست آوردیم:

خودالقایی سیم‌پیچ استاتور

$$\ell_{aa} = L_{aa} = L_{aa_0} + L_{al}$$

$$\ell_{bb} = L_{bb} = L_{aa_0} + L_{al}$$

$$\ell_{cc} = L_{cc} = L_{aa_0} + L_{al}$$

خودالقایی سیم‌پیچ تحریک

$$\ell_{ff} = L_{ff} = L_{ff_0} + L_{fl}$$

الفاکنایی متقابل استاتور – استاتور

$$\ell_{ab} = \ell_{ba} = -\frac{1}{2} L_{aa_0}$$

$$\ell_{bc} = \ell_{cb} = -\frac{1}{2} L_{aa_0}$$

$$\ell_{ac} = \ell_{ca} = -\frac{1}{2} L_{aa_0}$$

الفاکنایی متقابل استاتور – روتور

$$\ell_{af} = \ell_{fa} = L_{mf} \cdot \cos \theta_{me}$$

$$\ell_{bf} = \ell_{fb} = L_{mf} \cdot \cos(\theta_{me} - 120)$$

$$\ell_{cf} = \ell_{fc} = L_{mf} \cdot \cos(\theta_{me} + 120)$$

در ماشین‌های قطب برجسته اثرات برجستگی قطب باعث می‌شود که ضرایب خودالقایی و القای استاتور با تغییر موقعیت روتور تغییر کند. به عبارت دیگر پرمه‌انس شکاف هوایی یک مولفه ثابت و یک مولفه بسیار کوچکتر که با کسینوس زاویه روتور نسبت به محور مستقیم تغییر می‌کند. در نتیجه در ماشین‌های قطب برجسته ضرایب را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\ell_{aa} = L_{aa_0} + L_{al} + L_g \cos(2\theta_{me})$$

$$\ell_{bb} = L_{aa_0} + L_{al} + L_g \cos(2\theta_{me} + 120)$$

$$\ell_{cc} = L_{aa_0} + L_{al} + L_g \cos(2\theta_{me} - 120)$$

القائی متقابل استاتور – استاتور

$$\ell_{ab} = \ell_{ba} = -\frac{1}{2}L_{aa_0} + L_g \cos(2\theta_{me} - 120)$$

$$\ell_{bc} = \ell_{cb} = -\frac{1}{2}L_{aa_0} + L_g \cos(2\theta_{me})$$

$$\ell_{ac} = \ell_{ca} = -\frac{1}{2}L_{aa_0} + L_g \cos(2\theta_{me} + 120)$$

خودالقایی سیم‌پیچ تحریک.

$$\ell_{ff} = L_{ff} = L_{ff_0} + L_{fl}$$

القائی متقابل استاتور – روتور

$$\ell_{af} = \ell_{fa} = L_{mf} \cdot \cos \theta_{me}$$

$$\ell_{bf} = \ell_{fb} = L_{mf} \cdot \cos(\theta_{me} - 120)$$

$$\ell_{cf} = \ell_{fc} = L_{mf} \cdot \cos(\theta_{me} + 120)$$

با مقایسه دو حالت، دیده می‌شود که ضرایب خودالقایی و القای متقابل استاتور در حالت قطب برجسته با زاویه $2\theta_{me}$ تغییر می‌کند. علت اینکه با دو برابر زاویه الکتریکی تغییر می‌نماید این است که با یک چرخش 360° درجه روتور مدار مغناطیسی ۲ سیکل کامل را طی می‌نماید.

خودالقایی هر فاز استاتور با توجه به شکل ابتدای مبحث، زمانی ماکزیمم می‌گردد که محور مستقیم روتور با محور همان فاز همراستا گردد و القای متقابل فاز – فاز استاتور زمانی ماکزیمم می‌گردد که محور مستقیم روتور در وسط آن دو فاز قرار گیرد. با اعمال تبدیل dq0 به شارها و جریان‌های ماتریس گذر شار ماشین سنکرون، نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\lambda_d = L_d \cdot i_d + L_{mf} \cdot i_f$$

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q$$

$$\lambda_0 = L_0.i_0$$

$$\lambda_f = \frac{3}{2}L_{mf}.i_d + L_{ff}.i_f$$

در این معادلات ضرایب خودالقایی L_d و L_q و همچنین ضریب خودالقایی L_0 از روابط زیر بدست می آیند.

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{aa_0} + L_g)$$

$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{aa_0} - L_g)$$

$$L_0 = L_{al}$$

راکتانس های سنکرون محورهای مستقیم و متعامد عبارتند از :

$$X_d = \omega_e.L_d = X_l + X_{ds}$$

$$X_q = \omega_e.L_q = X_l + X_{qs}$$

X_l مولفه نشتی راکتانس های محورهای متعامد و مستقیم می باشند که برای هر دو محور بدلیل داشتن تعداد دور سیم پیچ یکسان برابر است .

نکته قابل توجه این است که ، شارها و جریان های تبدیل شده دیگر تابعی از موقعیت روتور نیستند ، و این یکی از ویژگی های مهم تبدیل dq0 است . همچنین معادلات ولتاژ زیر :

$$V_a = R_a.i_a + \frac{d\lambda_a}{dt}$$

$$V_b = R_a.i_b + \frac{d\lambda_b}{dt}$$

$$V_c = R_a.i_c + \frac{d\lambda_c}{dt}$$

$$V_f = R_f.i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

تبدیل به معادلات زیر می شوند .

$$V_d = R_a.i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{me}.\lambda_q$$

$$V_q = R_a.i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{me}.\lambda_d$$

$$V_f = R_f.i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

$$V_0 = R_f.i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}$$

در این معادلات $\omega_{me} = \frac{d\theta_{me}}{dt}$ سرعت زاویه‌ای روتور می‌باشد. در استفاده از این معادلات باید به علامت و یکاهای بکار رفته بسیار توجه کرد. در اینجا ما قرار داد مرجع موتوری را برای جریان‌های آرمیچر بکار می‌بریم، که در آن جریان آرمیچر مثبت و به سمت داخل پایانه‌های ماشین است. توان لحظه‌ای داده شده به سه فاز استاتور عبارتست از:

$$P_s = V_a.i_a + V_b.i_b + V_c.i_c$$

که با استفاده از تبدیل dq0 این معادله به صورت زیر بیان می‌گردند.

$$P_s = \frac{3}{2}(V_d.i_d + V_q.i_q + 2V_0.i_0)$$

گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان با تقسیم توان خروجی متناظر با ولتاژهای سرعتی بر سرعت محور (بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه) بدست آورد، که برابر است با:

$$T_{mech} = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_d.i_q - \lambda_q.i_d)$$

زمانی که مرجع موتوری بودن را بر می‌گزینیم، در آن جهت مثبت جریان رو به داخل ماشین است و گشتاور بالا برای شتاب دادن به روتور عمل می‌نماید. ولی اگر مرجع ژنراتوری را برگزینیم، گشتاور بالا برای کند کردن روتور بکار می‌رود. تمامی جریان‌ها، ولتاژها و شارهای بالا مقادیر لحظه‌ای هستند.