ماشین های سنـــــکرون

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 معمولا 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 دوّار درون ماشین ایجاد می‌شود . این میدان مغناطیسی دوار در سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور یک ولتاژ سه فاز القا می‌کند .به طور کلی اصطلاح سیم‌پیچ های میدان به سیم‌پیچ هائی اطلاق می‌شود که میدان مغناطیسی اصلی ماشین را تولید می‌کند و اصطلاح سیم‌پیچ های آرمیچر به سیم‌پیچ‌هائی 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 و سیم‌پیچی آرمیچر بر روی قسمت ساکن قرار داده شود .

مزایای داشتن آرمیچر ساکن و سیستم تحریک گردان عبارتست از :

۱- جریان خروجی می‌تواند مستقیما از ترمینال‌های ثابت موجود در استاتور و بدون عبور از کنتاکت‌های جاروبک به مدار بار هدایت شود.

۲- در این حالت عایق نمودن سیم‌پیچ آرمیچر ساکن در ولتاژهای AC زیاد که ممکن است دارای ولتاژ 30 KV یا بیشتر باشد ، ساده‌تر است.

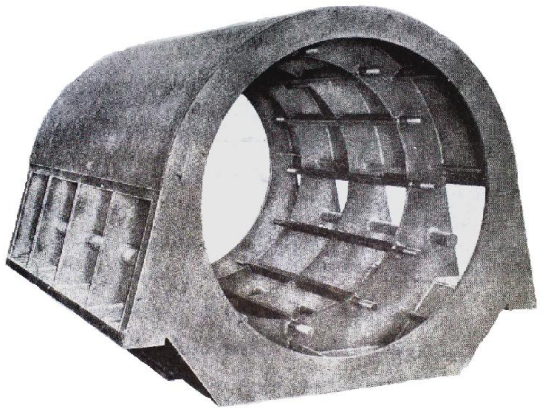
۳- کنتاکت‌های لغزان یا حلقه‌های لغزان به مدار ولتاژ کم و میدان DC با توان کم منتقل می‌شوند که بنابراین به سهولت عایق می‌گردند.

۴- سیم‌پیچ‌های آرمیچر را می‌توان به سادگی و محکم بست تا در مقابل هر گونه تغییر شکلی که توسط فشارهای مکانیکی ناشی از اتصال کوتاه ، ایجاد می‌شود ، حفظ کند.

استاتور (Stator)

۱- قاب استاتور[۱] :

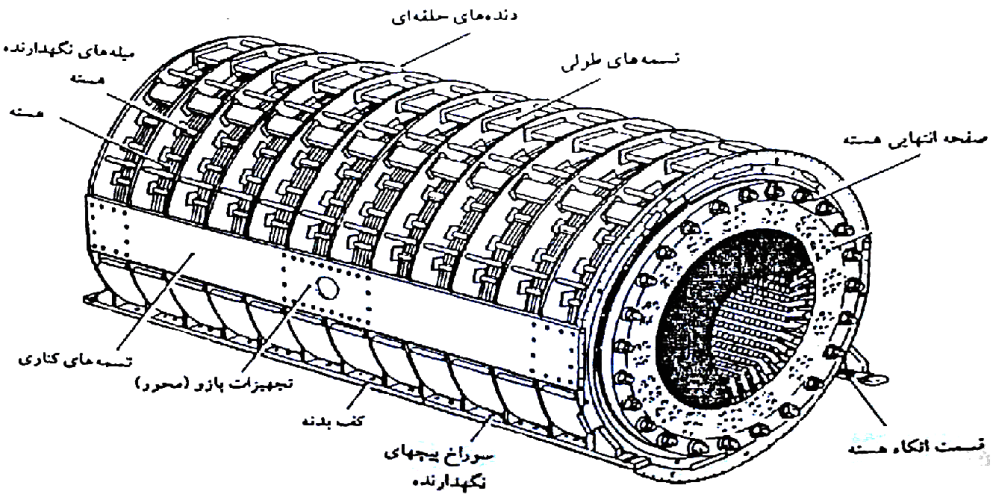
در ماشین‌های DC بدنه بیرونی (یوغ) برای عبور شار مغناطیسی به کار گرفته می‌شود ولی در آلترناتورها از آن برای نگهداشتن سیم‌پیچ‌ها و محافظ‌های آرمیچر به کار می‌رود. آلترناتورهای بزرگ و سرعت کم دارای بدنه‌هایی هستند که به علت آسانی در ساخت به صورت قسمت‌های ریخته‌گری شده ساخته شده‌اند . امروزه به جای استفاده از ریخته‌گری ، عموماً از صفحه‌های فولادی نرمی ساخته شده‌اند ، که به طریقی به هم جوش خورده‌اند. به منظور محکم نمودن قسمت‌های مختلف بدنه ، از میله‌های بزرگی که در داخل قاب استاتور نصب می‌شوند ، استفاده می‌شود.



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

۱- Stator Core frame

میان آنها ، هیدروژن در کانال شعاعی در هسته استاتور جاری می‌شود و در میان آن ، خنک کننـده‌هـای گازی که در قاب جـــا داده شده‌اند ، گردش می‌کند .



۲- هسته استاتور [۱]

وظیفه هسته استاتور ایجاد مسیرهای بسته برای فوران ایجاد شده توسط میدان میدان می‌باشد. از ورقـه هایی از جنس آهن مغناطیسی خاص یا آلیاژ فولاد (فولاد سیلیکون) سـاخته شـده اسـت . هسـته هـا جهت حداقل کردن تلفات ناشی از جریان‌های گردابی ورقه ، ورقه سـاخته مـی‌شـوند.این ورقـه‌هـا بـه صورت حلقه‌های کامل برای ماشین‌های کوچک و یا قطعه‌هایی از حلقه برای ماشین‌های بزرگ سـاخته شده‌اند.ضخامت ورقه‌های هسته‌ای که اکنون در ساخت توربوژنراتورهای بزرگ مـورد استفـــاده قـرار می‌گیرد ، عموما بین ۰/۳۳ تا ۰/۳۵ میلیمتر است. در این ژنراتورها صفحات هسته را بسته‌های ورقـه‌ای فشرده شده ، ایجاد می‌کنند .این بسته‌ها با ضخامت ۳/۸۱ تا ٦/۳۵ سـانتیمتر توسـط مجراهـای شـعاعی تهویه به عرض ۵ تا ۱۰ سانتیمتر مجزا شده‌اند تا گذرگاهی برای هیدروژن بگذارند .در بعضی از طرح‌ها ، هسته استاتور به صورت محوری خنک می‌شود که در این صورت برای عبور هیدروژن سـوراخ‌هـائی در ورقه‌ها ایجاد می‌کنند. هستهٔ اسـتاتور مسـیری بـا رلوکتـانس مغناطیسـی پـایین جهـت عبـور شـار مغناطیسی فراهم می سازد. قبل از آنکه سیم‌بندی روی هسته سوار شود ، آزمایش‌های استاتیکی جهـت ارزیابی تقریبی هسته به عمل می‌آید . شدت شار در هسته ، توسط بوبین‌هائی اندازه‌گیری شده و اشـباع

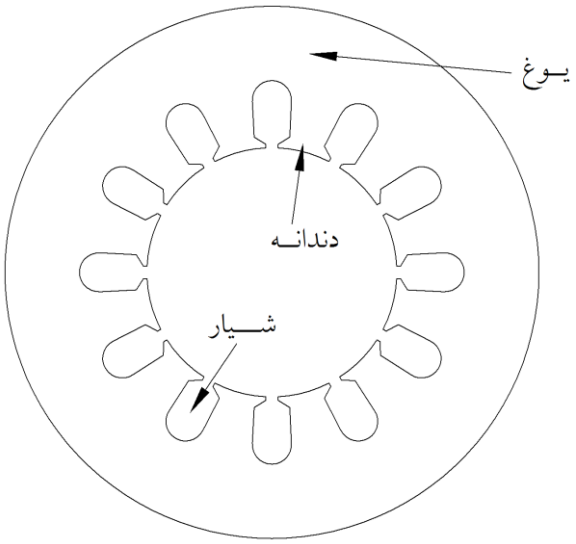
۱- Stator Core

هسته در آن سطح نیزبدست می‌آید. قطر داخلی استاتور بوسیلهٔ گشتاور در حجم (Torque Per Volume) و اثر لختی GD^2 تعیین می شود .

هستهٔ استاتور از دو قسمت تشکیل شده است :

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

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

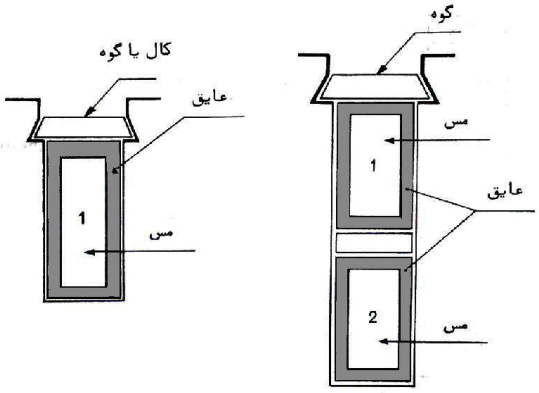


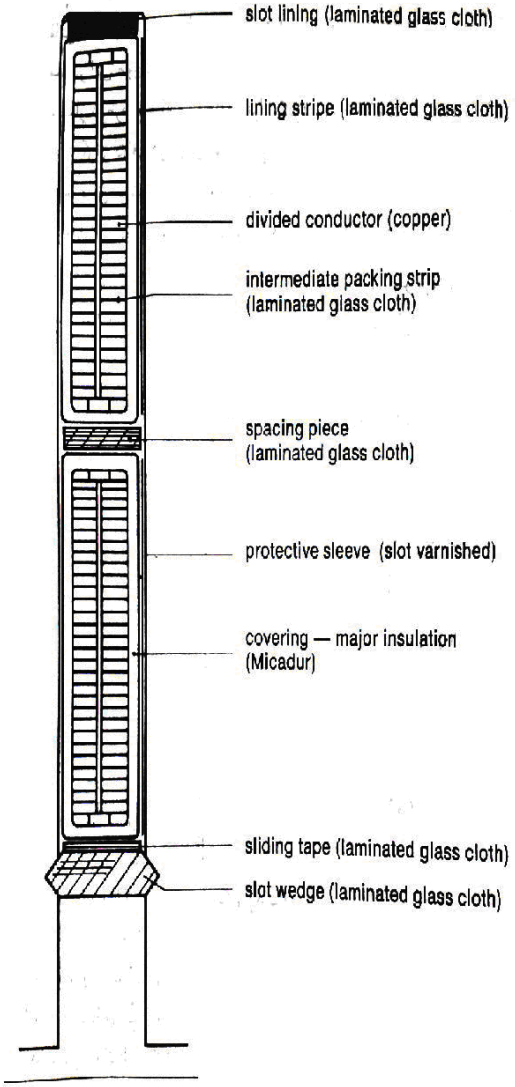
۳- سیم‌پیچ‌های استاتور [۱]

سیم‌پیچ‌های استاتور از نوارهای مسی تشکیل می‌گردند و برای عایق‌کاری آنها از نوارهای عایقی آغشته به لاک استفاده می شود.این نوارهای عایقی به دور شمش‌های مسی پیچیده شده و تحت شرایط خلا در اثر حرارت پرس می‌شوند. در نهایت ، نوارهای عایقی پرس شده با شمش‌های مسی ، یک کلاف عایق‌کاری شده کاملا محکمی را تشکیل می‌دهند.سپس این کلاف‌ها در شیارهای استاتور جاسازی می‌شوند و به وسیله گوه (چوب‌های مخصوص مخروطی شکل) در شیارها محکم می‌گردند. این کلاف‌ها در انتها به هم متصل می‌شوند وتشکیل حلقه‌های انتهائی در هر طرف هسته را می‌دهند. این حلقه‌های انتهائی بوسیله برنج ، کاملا محکم ، و با مواد عایقی ، عایقکاری می‌شوند تادر مقابل نیروهای ناشی از جریان‌های اتصال کوتاه و یا اتفاقات دیگر مقاوم باشند.در ژنراتورهای جدید ، سیم‌پیچ‌ها از لوله‌های مسی ساخته می‌شوند تا با عبور جریان آب در داخل آنها بتوان ژنراتور را خنک نمود .

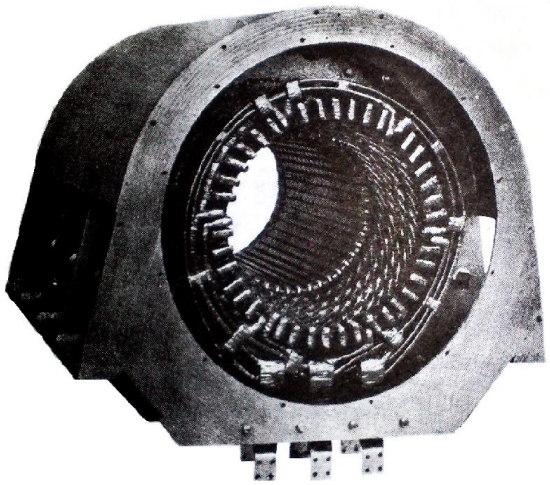
۱- Stator Winding

در شکل‌های زیر انواع مختلفی از سیم‌پیچ‌هـای اسـتاتور کـه در داخـل شـیار قـرار گرفتـه‌انـد را همـراه بـا توضیحات نشان می‌دهد.



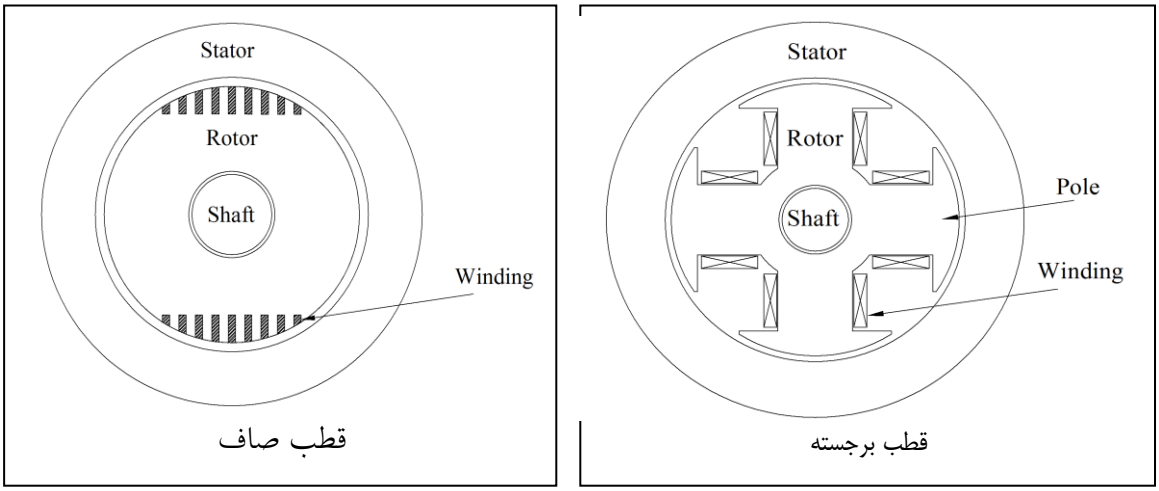


همچنین شکل زیر طرح کاملی از استاتور به همراه بدنه ، سیم‌پیچ و باس‌های خروجی را نشان می‌دهد .



روتـــور (Rotor)

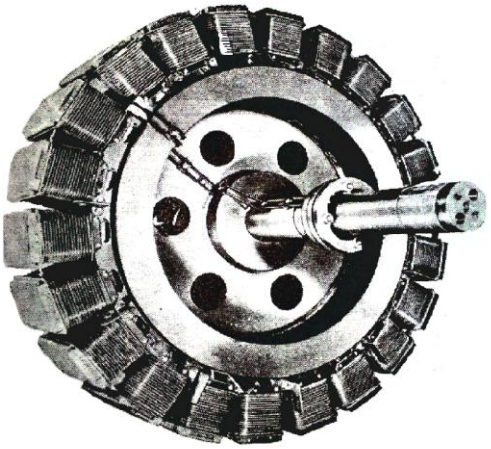
رتور ژنراتورها وظیفه دارند تا علاوه بر تحمل سیم‌پیچ‌هـای تحریـک ، یـک مسـیر مغناطیسـی بـا مقاومـت مغناطیسی کم را بـرای شـار مغناطیسـی مهیـا نمـوده و گشـتاور نـامی را از توربیـــن بـــه عکـس‌العمـل الکترومغناطیسی در فاصله هوائی منتقل نماید. فولاد تنها ماده‌ای است که توانائی برآورده ساختن این نیازهـا را 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

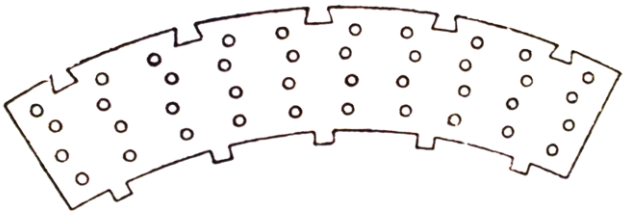
همانطور که بیان شد بر اساس شکل دو نوع روتور در آلترناتور داریم

۱-۱- قطب برجسته (Saleint Pole)

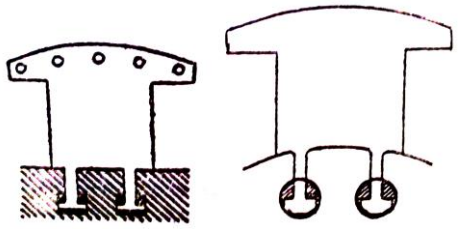


ماشین‌ها با روتور قطب برجسته از اجزای زیر تشکیل شده است .

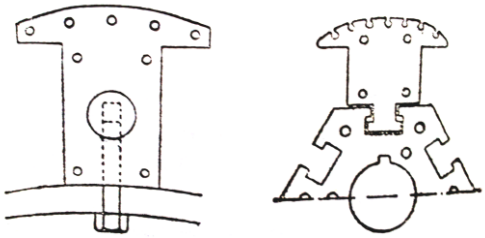
آ – یوغ : یوغ مغناطیسی معمولا در ماشین‌های کوچک و وقتی که قطر آن طوری باشد که بتوان آن را یک تیکه حمل و نقل کرد ، به صورت ریخته می‌باشد. یوغ از فولاد ریخته‌ای مغناطیسی ساخته می‌شود و سپس روی چرخ روتور سوار می‌گردد. اگر طول ماشین بزرگ باشد می‌توان از دو چرخ استفاده کرد . در مولدهای خیلی بزرگ یوغ مورق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



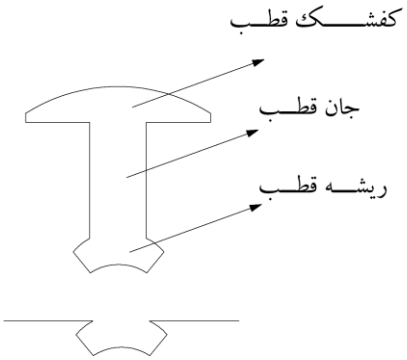
یوغ مغناطیسی مورق با قطعاتی به ضخامت ۲ تا ۳ میلیمتر و طول مماسی ۲/۵ متر ساخته می‌شود. در قطعات یوغ سوراخ‌هایی تعبیه می‌شود . پیچ‌هایی که به ورقها فشرده می‌شود آنها را در جای خود نگهداشته و نیروهای مماسی را می‌گیرد . پس از آنکه یوغ کاملا سوار شد به محور روتور ثابت می‌شود. در شکل زیر نحوه قرار گیری قطب 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 .



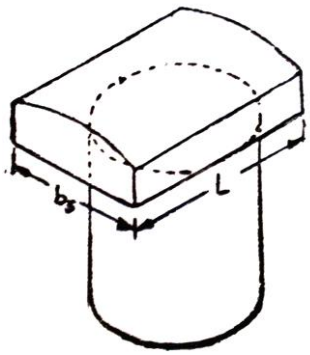
در حالتی که قطب‌ها خیلی عریض باشند از زائده‌های دم چلچله‌ای دو گانه استفاده می‌شود .



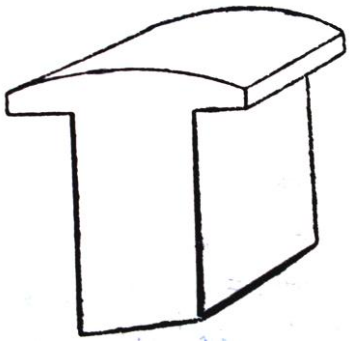
ب – قطبها : قطبها می‌توانند یکپارچه یا مورق باشند . قطب‌های مورق در تمام ماشین‌های کم سرعت و یا با سرعت متوسط بکار می‌روند. در زیر اجزای قطب رتور ماشین قطب برجسته را نشان می‌دهد.



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 نسبتا بیشتری دارند دارای تعداد قطب کمتر و قطر کوچکتر می‌باشد . بدنه روتور را در چنین حالتی می‌توان فولاد ریخته‌ای یکپارچه ساخت و یا ممکن از تعدادی صفحات فولادی ضخیم که مستقیما 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

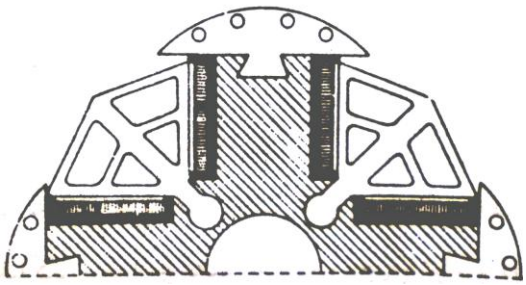

قطب مستطیلی

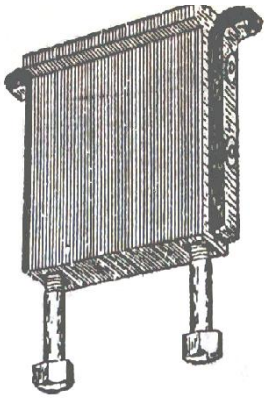
قطب‌های مدور بر مستطیلی دارای مزایای زیر می‌باشند :

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

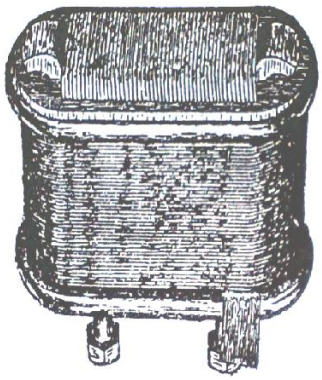
– سطح کل سیم‌پیچی مواجه با هوا یکنواخت است و بنابراین تهویه بهتر خواهد بود.

– 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

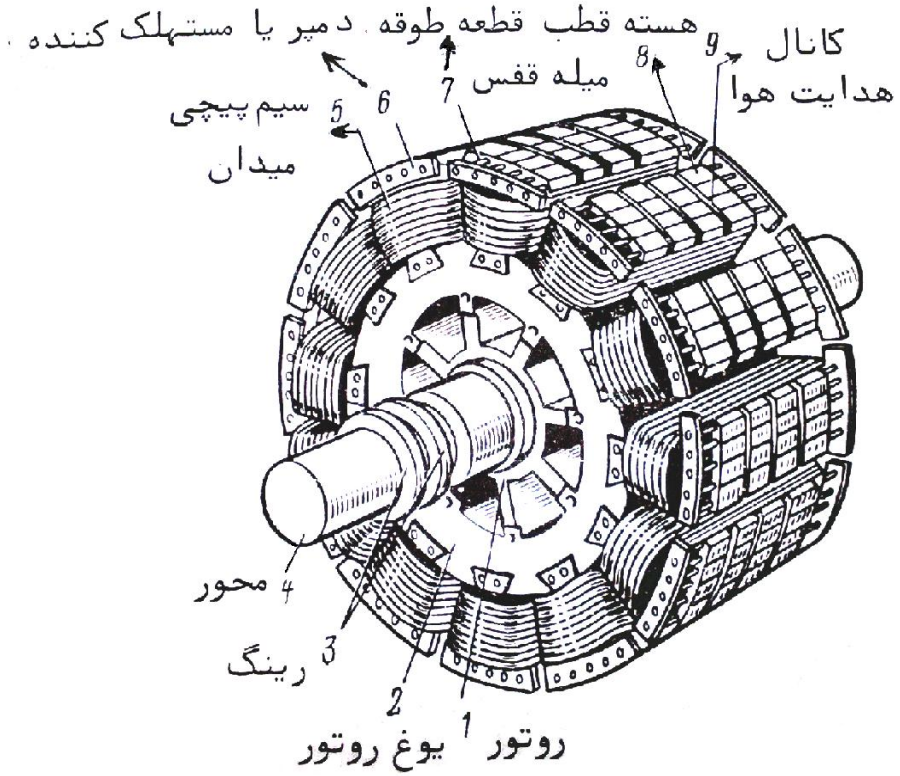


قطب برجسته بدون سیم‌پیچی



قطب برجسته همراه با سیم‌پیچی

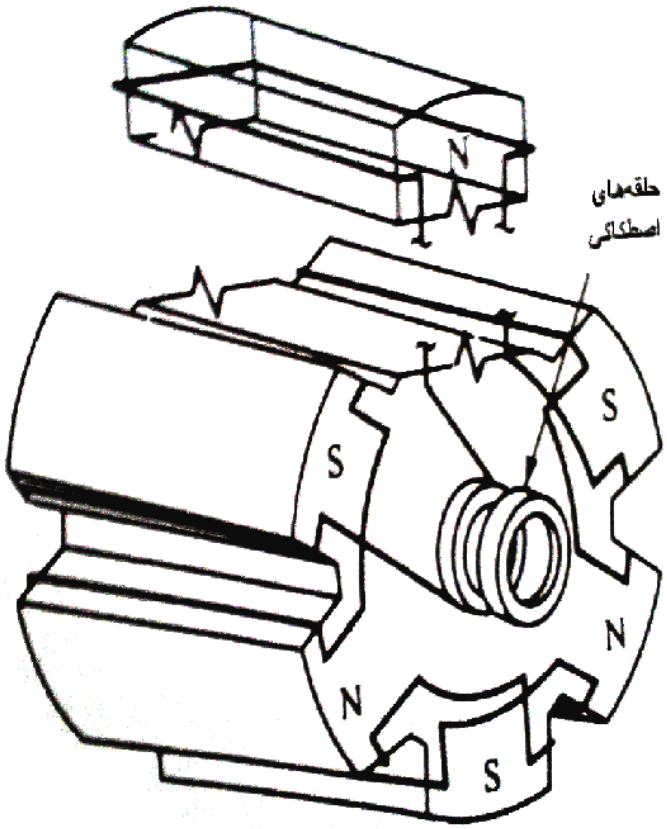
شکل زیر نشان‌دهنده یک روتور قطب برجسته به همراه تمام جزئیات می‌باشد .



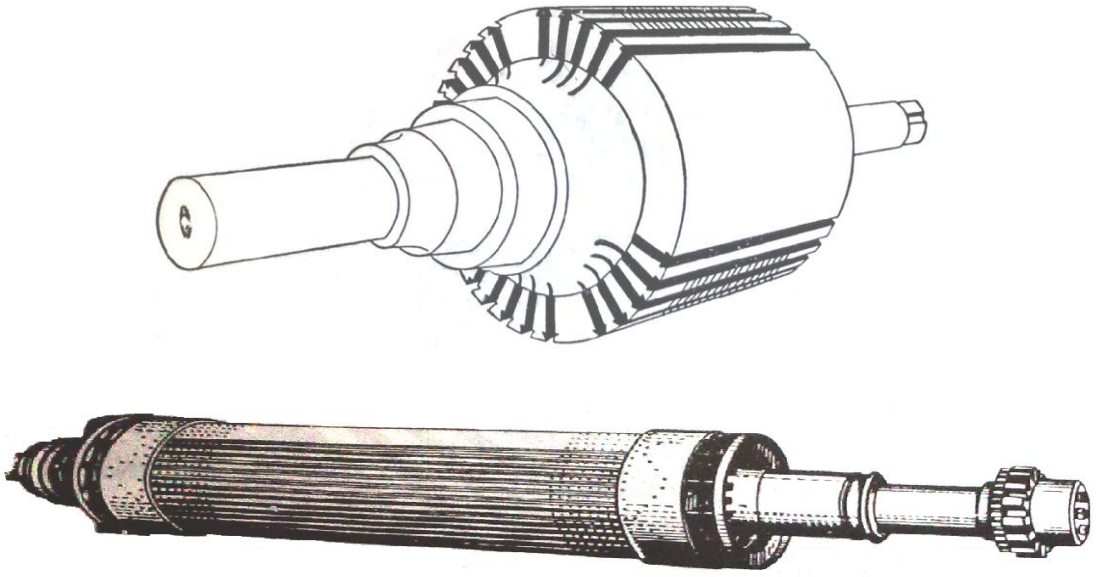
شکل زیر نحوه قرار دادن قطب‌های برجسته را در روی بدنه گردان روتور نشان می‌دهد .



همینطور شکل زیر یک روتور قطب برجسته ٦ قطبی همراه با حلقه‌های اصطکاکی را نشان می‌دهد .

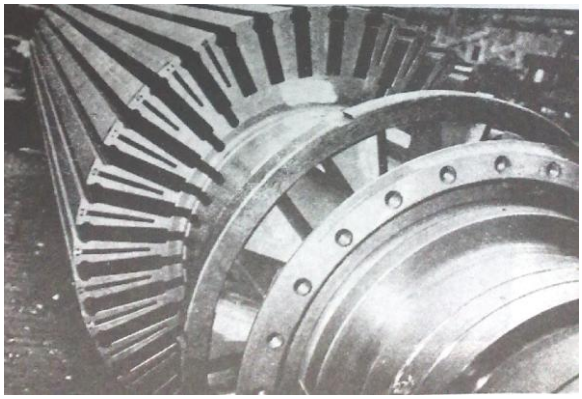


۲-۱- قطب صاف (cylindrical Pole)



ساختمان رتور ژنراتور پیچیده‌تر از استاتور می‌باشد.با توجه به اینکه رتور ژنراتورهای مدرن با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخند ، لذا نیروی گریز از مرکز بسیار زیادی بر روی روتور ایجاد می‌شود.

روتور در حقیقت یک ماده الکترومغناطیسی است و برای این‌که دارای قدرت مغناطیسی کافی باشد ، باید از سیم‌پیچ آن جریان زیادی عبوری کند.عبور جریان از سیم‌پیچ‌های رتور باعث ایجاد حرارت می‌شود که نباید از حد مجاز فراتر رود. در غیر این صورت ، اشکالاتی را در عایق‌کاری بوجود می‌آورد. برای کاهش درجه حرارت ، می‌توان سطح مقطع سیم‌ها را بزرگتر انتخاب نمود. ولی وقتی سطح مقطع سیم‌پیچ‌ها بزرگ شود ، باید شیارهای پهن‌تر و عمیق‌تری را در درون رتور ایجاد نمود که این عمل ، مقاومت مکانیکی روتور را کاهش می‌دهد. این مسئله را می‌توان با بکار بردن حداکثر مس در سیم‌پیچ‌های روتور و با طراحی خوب و دقت زیاد در ساختمان روتور حل نمود.



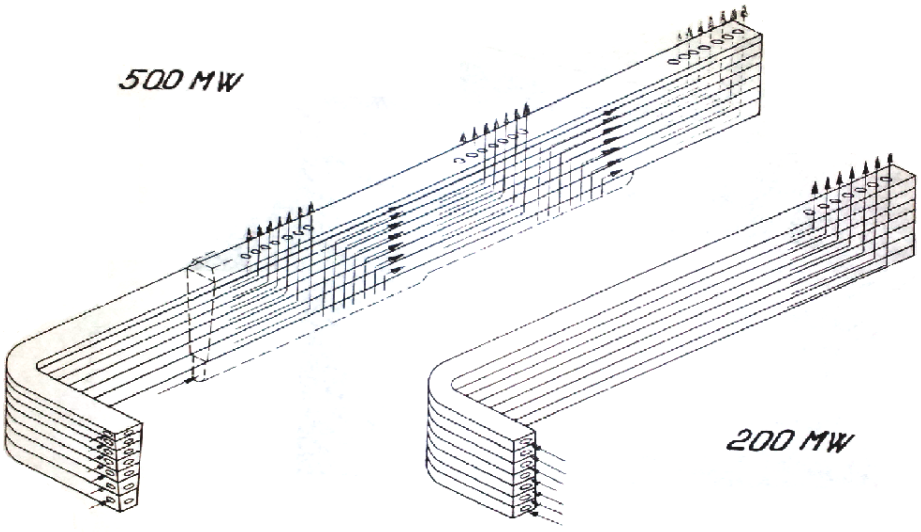
روتور در ابتدا به صورت یک شمش فولادی است که دارای مقداری نیکل ، کرم ، مولیبدن و وانادیوم می‌باشد . فولاد مذکور ، سخت و قابل تراش است و خواص مغناطیسی خوبی دارد که در کارگاه‌های مخصوص ، عملیات فلزکاری و ماشینکاری روی آن انجام می‌شود و سپس کارهای تراشکاری نهائی روی آن انجام می‌شود . در هنگام ساختن روتور ، معمولا سوراخی در امتداد محور روتور از یک انتها به انتهای دیگر بوجود می‌آورند که با این عمل ، سطح داخلی رتور را می‌توان مورد بازرسی قرار داد. این عمل به کمک دستگاهی بنام بروسکوپ [1] انجام می‌شود . سپس برای نصب سیم‌پیچی و عبور سیال خنک کننده ، شیارهائی در روی روتور ایجاد می‌شود. البته شیار زنی باعث تضعیف روتور می‌گردد. این کار یکی از علل نواسانات روتور با فرکانس دوبرابر می‌باشد که همیشه در ماشین‌های دوقطبی وجود دارد. طراحی شیارها از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است و باید با دقت خاصی طراحی و انجام شود. زیرا باید میان مساله لزوم جریان زیاد سیم‌پیچی و موضوع استواری و استحکام روتور ، توازن مناسب و مطلوبی برقرار شود. این شیارها بیش از ٦٨ تا ٧٤ درصد سطح روتور را اشغال می‌کنند . لیکن در بیشتر طرح‌ها ، شیارهای کمکی برای برابر سازی سختی روتور در تمامی سطوح ایجاد می‌شود. این شیارها در بهبود تبرید روتور موثر است .

---

[1]-Boroscope

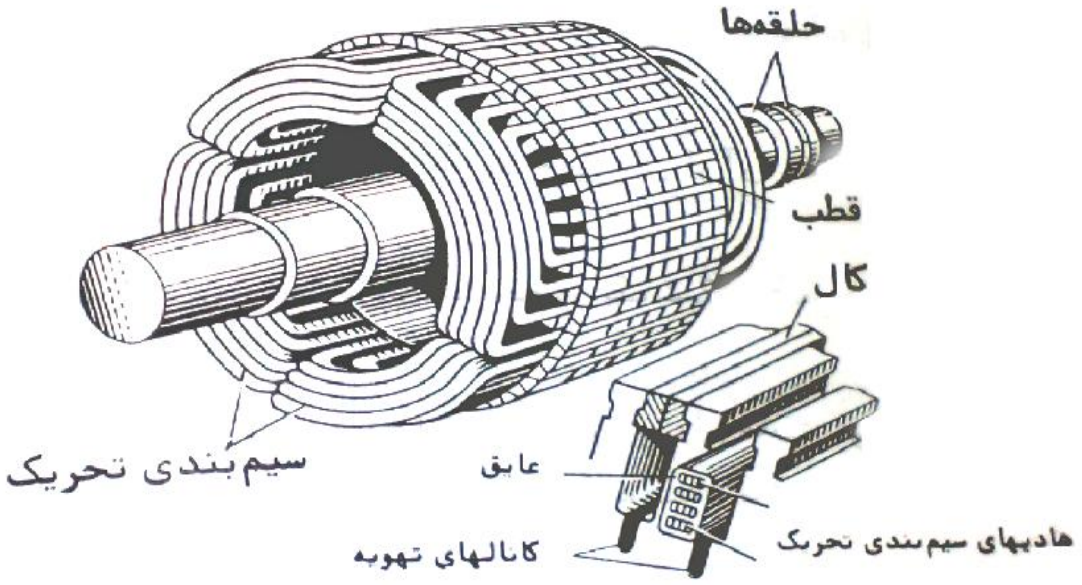
۲- سیم‌پیچی روتور [۱]

سیم‌پیچ‌های هر قطب از سیم‌های مسی که روی آن را 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 آزبست 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 (مثلا 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 اصطلاحا پخته شود.پس از خنک شدن روتور عایق بیشتری روی بالای هادی‌ها و روی دهانه دم چلچه‌ای 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 .



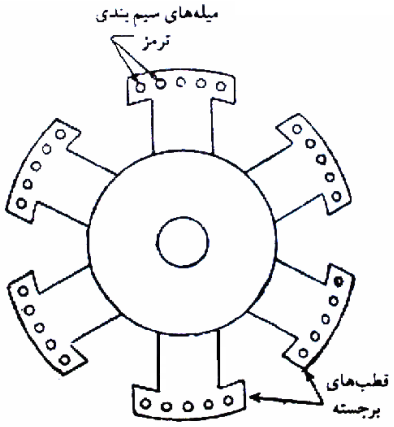
۳- حلقه‌های نگهدارنده انتهائی سیم‌پیچی

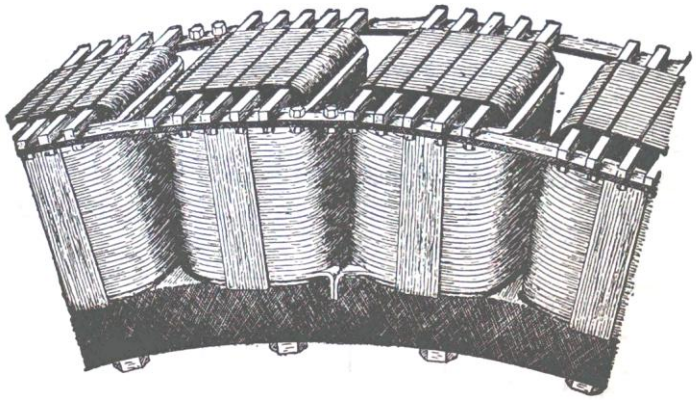
چنانچه سیم‌پیچ‌های انتهائی روتور به وسیله حلقه‌های وزین نگهداری کننده با استقامت کششی بالا نگهداری نشوند ، در سرعت کار عادی روتور ، سیم‌پیچ‌های آن از جای خود کنده شده و به بیرون پرتاب می‌شوند.بدین منظور از حلقه‌هائی استفاده می‌شود که در خارج شیارها و در قسمت انتهائی روتور به وسیله یک رینگ انتهایی از 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 شیارهائی 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- سیم‌پیچ های میرا کننده (Damper Winding)

در ژنراتورهای قطب برجسته ، کفشک قطب‌های اغلب الترناتورها برای نصب میله‌های مسی سوراخ یا شیار دار شده‌اند .این سیم‌پیچ‌ها که قفس سنجابی نامیده می‌شوند با استفاده از حلقه‌های مسی ضخیم در دو انتها اتصال کوتاه شده‌اند.این خفه کن‌ها برای جلوگیری از نوسانات آنی ژنراتور مفید می‌باشد و در موتور سنکرون برای فراهم آوردن گشتاور راه‌اندازی به کار می‌رود.

معمولاً توربو ژنراتورها این سیم‌پیچ ها را ندارند (به جز در حالت خاصی که به عمل سنکرون کنندگی کمک می‌کند) زیرا قطب‌های میدان خود به صورت سیم‌پیچ‌های میراکننده عمل می‌کنند .تحت شرایط عادی کاری از این سیم‌پیچ‌ها هیچ جریانی عبور نکرده زیرا رتور با سرعت سنکرون کار می‌کند و از طرفی این سیم‌پیچ‌ها در حالت عدم تعادل بار ولتاژهای متعادل سه فاز را ثابت نگه می‌دارند. در برخی از ماشین‌های قطب برجسته علاوه بر سیم‌پیچ‌های میراکننده ، سیم‌پیچ دیگری بنام کلار (Collar) نیز داریم که در گلوی هر قطب یا زیر کفشک هر قطب اتصال کوتاه می‌شوند و بیشتر جهت گذرایی می‌باشد. شکل‌های زیر مکان نصب میله‌های دمپر و همچنین قطب‌هایی که میله‌های میراکننده بر روی آن نصب شده است ، را نشان می‌دهد.





۵- حلقه‌های لغزان [۱]

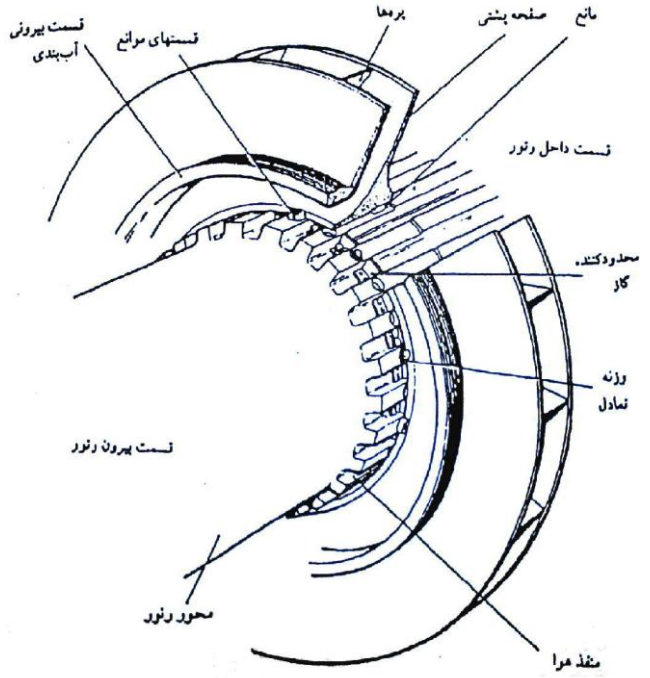
جریان روتور بوسیله حلقه‌های لغزان که از فولاد مرغوب ساخته می‌شود , جمع می‌گردد. این حلقه‌ها روی یک غلاف عایق شده سخت که به بوش فولادی متصل است ، منقبض می‌گردند و سپس قسمت‌های روی هم سوار شده ، بر روی محور روتور پرس می‌شوند. حلقه‌های لغزان همراه با نگهدارنده جاروبک ، بین یاتاقان‌های خارجی ژنراتور و تحریک 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 معمولا 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 .

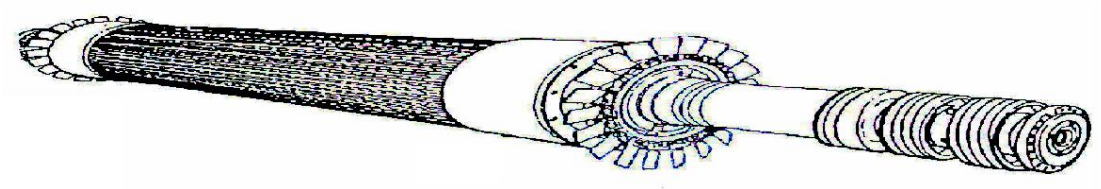
۶- فن‌های واقع بر روتور

به منظور به چرخش در آوردن هیدروژن خنک‌کنندگی از میان استاتور و تجهیزات ژنراتور ، از فن‌هائی 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

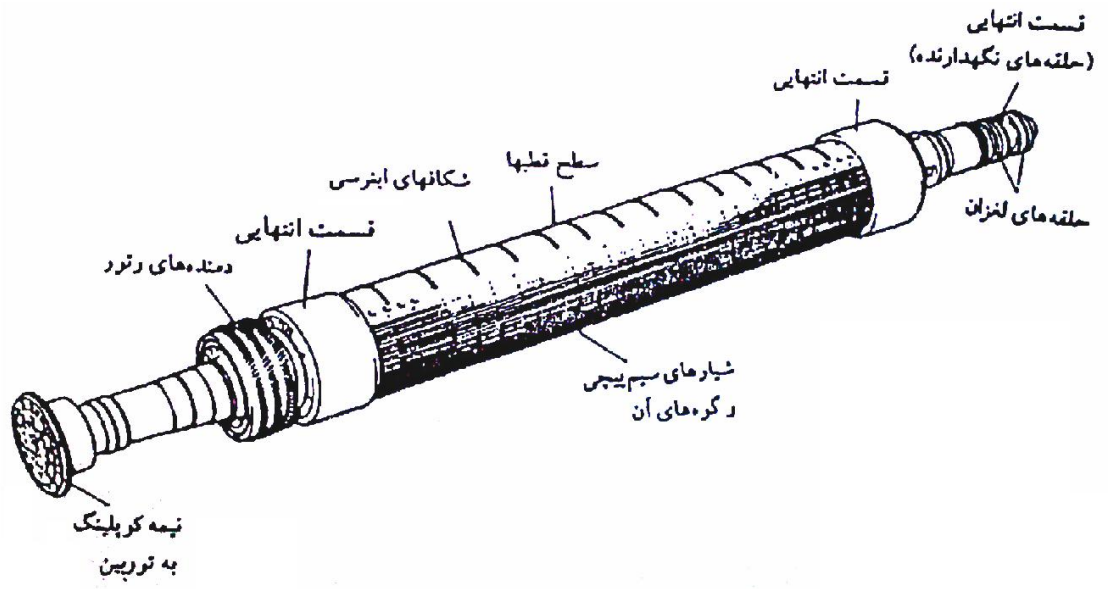


فن واقع بر روتور از نوع گریز از مرکز



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 ، زیرابدنه 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 وزنه‌های متعادل کننده نصب شود . این وزنه‌ها به گونه‌ای نصب می‌شوند که روتور ، درسرعتی به مقدار ۱۵٪ بیشتر از سرعت نامی بچرخد و هیچ‌گونه نوسانی در روتور بوجود نیاید .در شکل زیر یک نمونه روتور قطب صاف ، همراه با فن‌هایی از نوع جریان محور و حلقه‌های 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 می‌کند همیشه مقدار مشخصی عدم توازن مغناطیسی در ماشین وجود دارد که این موضوع ، منجر به القاء ولتاژ کمی در بدنه و محور روتور می‌شود . چنانچه این ولتاژ ، محدود نشود جریان شدیدی را از مدار آهنی با امپدانس کم (متشکل از بدنه روتور ، مجموعه یاتاقان‌ها و آب‌بندی ، قسمت کاسه نمد و شاسی ، و صفحه پایه ژنراتور) خواهد گذراند. چنین جریانی می‌تواند 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 بدنـه ژنراتـور وجود دارد ، انجام می‌شود. روشهای متعددی برای این منظـور وجـود دارد و آن کـه متـداولتر اسـت ، 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 باشـد کـه امکـان عبـور 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 .

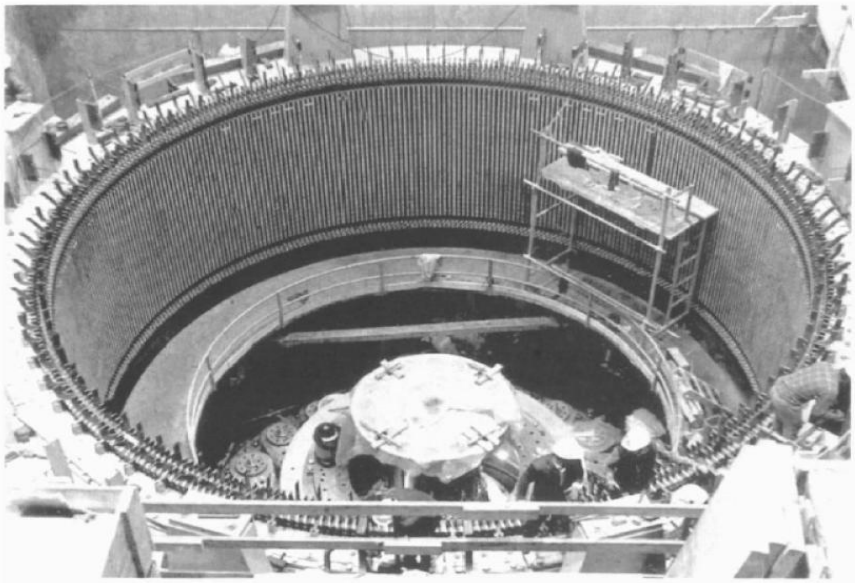


Figure 16.2a
Stator of a 3-phase, 500 MVA, 0.95 power factor, 15 kV, 60 Hz, 200 r/min generator. Internal diameter: 9250 mm; effective axial length of iron stacking: 2350 mm; 378 slots.
(*Courtesy of Marine Industrie*)

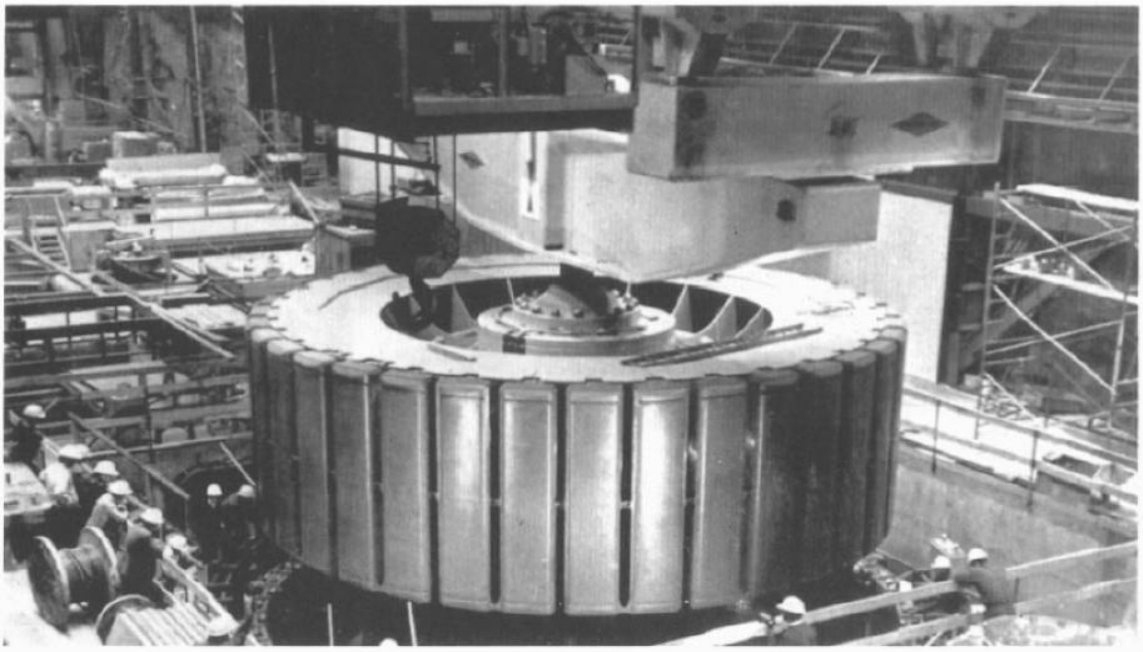


Figure 16.4
This 36-pole rotor is being lowered into the stator shown in Fig. 16.2. The 2400 A dc exciting current is supplied by a 330 V, electronic rectifier. Other details are: mass: 600 t; moment of inertia: 4140 t·m^2; air gap: 33 mm.
(*Courtesy of Marine Industrie*)

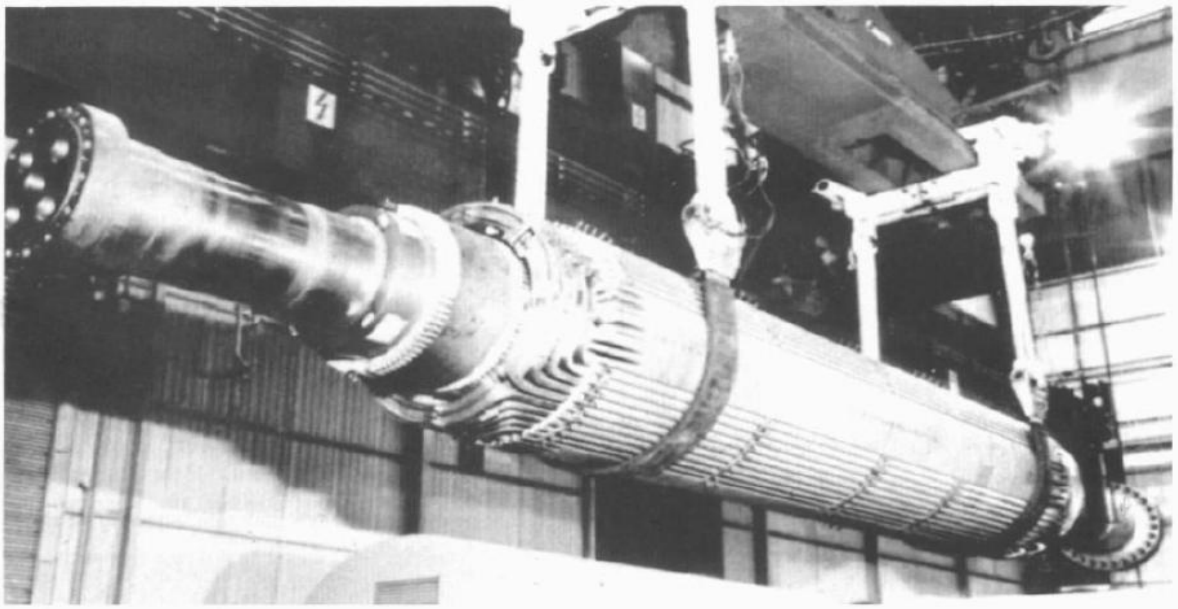


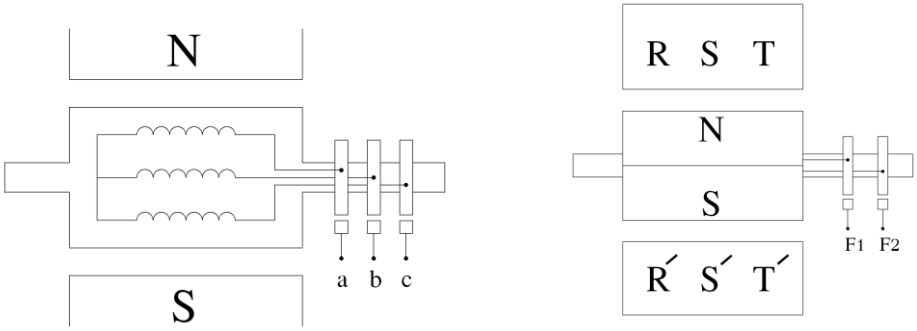
Figure 16.7b
Rotor with its 4-pole dc winding. Total mass: 204 t; moment of inertia: 85 t·m^2; air gap: 120 mm. The dc exciting current of 11.2 kA is supplied by a 600 V dc brushless exciter bolted to the end of the main shaft.
(Courtesy of Allis-Chalmers Power Systems Inc., West Allis, Wisconsin)

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

۱- با استفاده از حلقه‌های لغزان و جاروبک

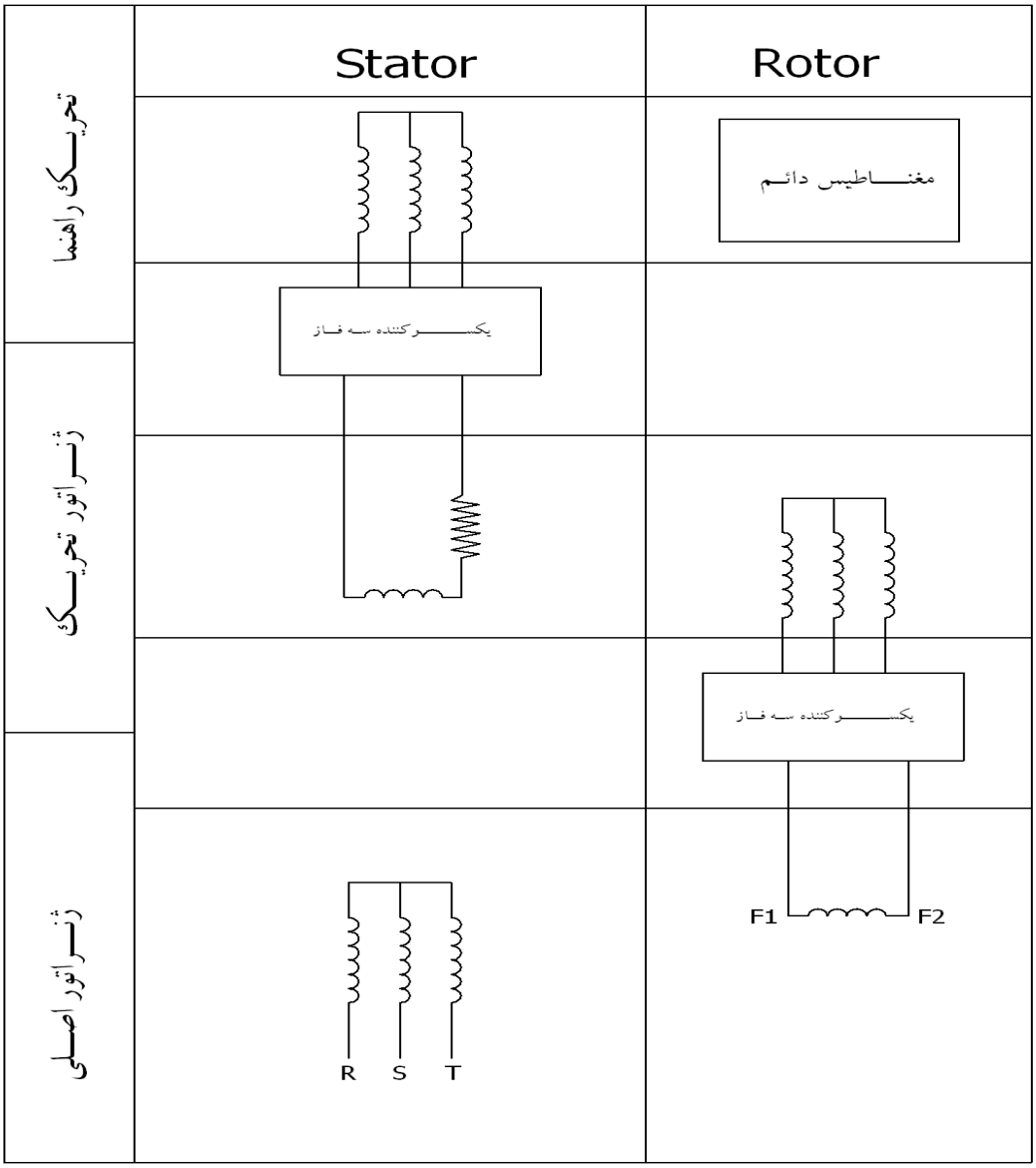
۲- از یک منبع تغذیه DC خاص که مستقیما بر روی محور ژنراتور نصب شده است .

حلقه‌های لغزان ، حلقه‌هایی هستند که محور ماشین را کاملا احاطه کرده‌اند ، اما نسبت به آن عایق شده‌اند . هر کدام از سرهای سیم‌پیچی رتور به یکی از ۲ حلقه لغزان روی محور ماشین متصل می‌شوند .هنگامی که برای تأمین توان از این حلقه‌ها استفاده می‌شود چند مشکل وجود دارد . مراقبت و نگهداری ماشین باید بیش از پیش صورت گیرد ، زیرا جاروبک‌ها را باید از نظر فرسودگی به طور منظم کنترل کرد.به علاوه در ماشین‌هایی که جریان میدان بزرگی دارند ، افت ولتاژ جاروبک‌ها می‌تواند یک عامل مهم افت توان باشد . با وجود این مسئله از این حلقه‌ها در ماشین‌های کوچک استفاده می‌شود .گاهی محور ماشین دارای ۳ الی ٤ رینگ می‌باشد که در این حالت سیم‌پیچ سه فاز بر روی روتور و سیم‌پیچ میدان بر روی استاتور قرار گرفته .



در ماشین‌های بزرگ برای تامین توان DC از تحریک بدون جاروبک استفاده می‌شود . 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 می‌شود .با کنترل جریان کوچک DC میدان ژنراتور تحریک (که در استاتور قرار دارد) می‌توان جریان میدان ماشین اصلی را بدون استفاده از حلقه‌های لغزان وجاروبک تنظیم کرد. برای اینکه تحریک ژنراتور کاملاً مستقل از تغذیه خارجی باشد ، معمولاً یک تحریک راهنما به سیستم اضافه می‌کنند . تحریک راهنما یک ژنراتور AC کوچک یا مغناطیس دائم می‌باشد.مغناطیس دائم‌ها روی محور رتور و سیم‌پیچی سه فاز روی استاتور قرار دارد.این ژنراتور توان میدان تحریک را فراهم و تحریک به نوبه خود مدار میدان ماشین اصلی را کنترل می‌کند .در بسیاری از ژنراتورهای سنکرون دارای تحریک بدون جاروبک ، حلقه‌های لغزان و جاروبک نیز تعبیه شده‌اند ، تا در مواقع اضطراری بتوان توسط یک منبع جریان

DC ، میدان ماشین اصلی را تامین نمود.در شکل زیر مراحل گفته شـده در یـک ژنراتـور سـنکرون بـدون جاروبک نشان داده شده است.



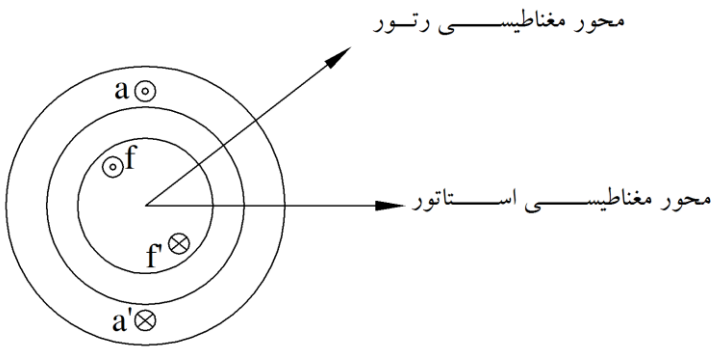
اساس کار ژنراتورهای سنکرون بر قانون القاء فاراده استوار است . مطابق این قانون اگر سـیمی را در میـدان مغناطیسی حرکت دهیم درآن سیم ولتاژی تولید می گردد که طبق رابطهٔ زیر برابر است با :

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

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 آرمیچـر بـر روی روتـور سـوار بـوده و در داخل میدان مغناطیسی چرخانیده می شوند .

القـاکنائی و مدار معـادل مـاشین‌های سنـکرون

طرحی از یک ماشین سنکرون سه فاز رتور استوانه‌ای در زیر دیده می‌شود.سیم‌پیچ میدان ff' واقـع بـر روی رتور یک سیم‌پیچ توزیع شده است که یک mmf سینوسی و موج چگالی شار با محـور منطبـق بـر محـور مغناطیسی‌اش ایجاد می‌کند و همواره با رتور می‌چرخد. همانگونه که از ساختمان و عملکـرد ماشیـــــن بـر می‌آید ۲ نوع شار و فلو در ماشین وجود دارد .



۱- **شار مشترک یا پیوندی (Linkage Flux)**:شاری است که توسط سیم‌پیچ‌های رتور ، اسـتاتور از شکاف هوائی و هر دو سیم‌پیچ عبـور مـی‌نمایـد.این شـار بـا شـار متقابـل یـا مغنـاطیس کننـده ترانسفورماتور متناظر است و در ایجاد گشتاور دخالت مستقیم دارد.مسیر این شـار آهـن اسـتاتور ، فاصله هوائی و رتور است . پس از طبیعت مغناطیسی خودش یعنـی آهـن پیـروی نمـوده و دارای منحنی مغناطیسی (B-H) " غیر خطی " می‌باشد.

۲- **شار نشتی (Leakage Flux)**: بخشی از شار ناشی از سـیم‌پـیچ‌هـای رتـور و اسـتاتور کـه از شکاف هوائی نمی‌گذرند ، می‌باشد.این شار از مولفه‌های نشت شیار و دندانه ، نشت دور آخـری و هارمونیک‌های فضائی میدان شکاف هوائی تشکیل شده است.این شـارها بـدلیل ولتاژهـائی کـه 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 مغناطیسـی (B-H) " خطـی " 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 سیم‌پیچ میدان f را می‌توان بصورت زیر بر حسب القاکنائی‌ها و مقادیر جریان‌ها 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 می‌باشد .ضرائب خودالقائی با استفاده از فرمول زیر بدست می‌آیند.

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

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 می‌پردازیم.

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 می‌دهیم.مقدار مقاومت نشت ناشناخته و محاسبه آن پیچیده می‌باشد ولی مقدار مقاومت شار پیوندی با استفاده از معادله زیر بدست می‌آید.

$$R_m=R_{Stator.Core}+2R_{airgap}+R_{Rotor.Core}$$

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

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

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

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

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

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

که در این معادله :

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

L_{al} : ناشی از شار نشتی سیم‌پیچ میدان می‌باشد.

برای فازهای دیگر هم به همین صورت می‌باشد. $\ell_{aa} = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{aa_0} + L_{al}$

ب . ضریب خودالقائی رتور

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

$$F_R = N_f.I_f = R_m.\varphi_{mf}$$

$$\varphi_{mf} = \frac{N_f.I_f}{R_m}$$

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

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

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

ج . ضریب القاکنائی متقابل استاتور

در این حالت باید بررسی گردد که چه مقدار از شار تولیدی سیم‌پیچ a از سیم‌پیچ b عبور می‌کند.برای این منظور فرض کنید سیم‌پیچ فاز b روی فاز a پیچیده شده است در نتیجه تمام شار از داخل آن عبور می‌نماید و اگر قائم بر آن پیچیده شده باشد آنگاه شار عبوری از فاز b صفر خواهد بود.پس می‌توان 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 می‌شود.

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

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

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

د . ضریب القاکنائی 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 :

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

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

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

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

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

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

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 باتوجه به معادله ابتدای این مبحث می‌پردازیم.

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

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

$$i_b + i_c = -i_a$$

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

$$\lambda_a = (L_S) . i_a + \ell_{af} . i_f$$

همانگونه که در معادله اخیر دیده می‌شود L_S همان ضریب خودالقائی سنکرون یا القاکنائی 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 .

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

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

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

ولتاژ پایانه‌ای استاتور برابر است با :

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

$$\hat{V}_a = R_a.\hat{i}_a + JX_s\hat{i}_a + \hat{e}_{af}$$

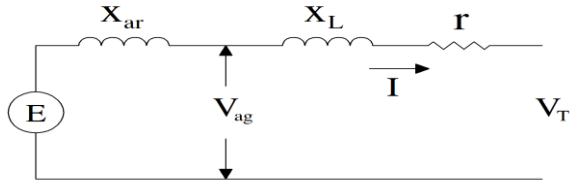
$$X_s = L_s.\omega = \omega.(\frac{3}{2}L_{aa_0} + L_{al}) = \frac{3}{2}\omega L_{aa_0} + \omega L_{al}$$

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

$\hat{e}_{af} = \hat{V}_a + R_a.\hat{i}_a + JX_s\hat{i}_a$ این معادلات بر اساس حالت موتوری بوده و برای حالت ژنراتوری به صورت 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.

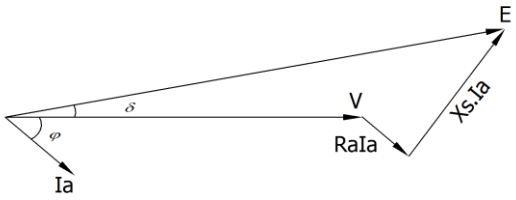
دیاگرام‌های برداری ژنراتور سنکرون در حالات مختلف

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

آ. بار سلفی (پس فاز – lag) :

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

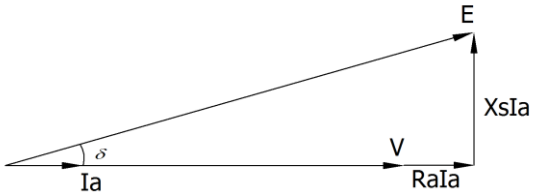
$$\hat{i}_a = i_a\angle -\varphi$$



آ. بار اهمی:

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

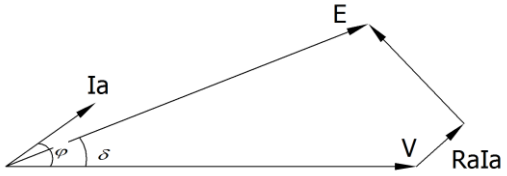
$\hat{i}_a = i_a\angle 0$



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 بـه ولتـاژ داخلـی بزرگتری نیاز دارند.بعبارتی دیگر برای ایجاد یک ولتاژ ترمینال ثابت ، بار سلفی نسبت به بار خازنی نیازمند تحریک بیشتری می‌باشد. $E_{f.lag} > E_{f.normal} > E_{f.lead}$

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 می‌باشیم ولـی زاویـه قـدرت بزرگتـر شـده و بـه محدوده ناپایدار نزدیکتر شده.

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

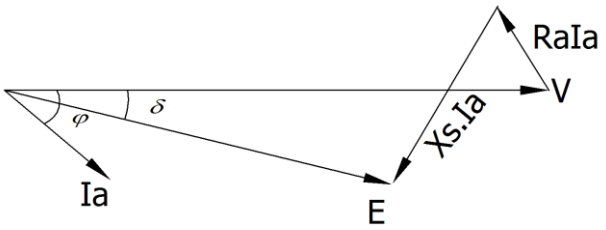
دیاگرام‌های برداری موتور سنکرون در حالات مختلف

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) :

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

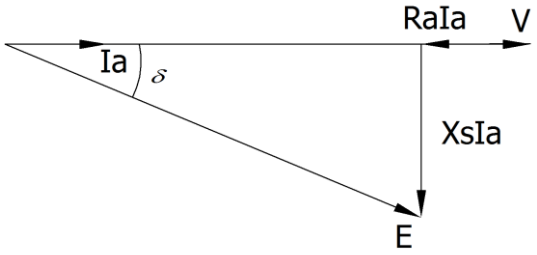
$\hat{i}_a = i_a\angle -\varphi$



آ. بار اهمی:

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

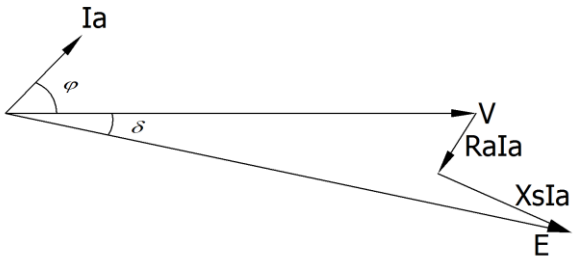
$\hat{i}_a = i_a\angle 0$



ج. بار خازنی (پیش فاز) :

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

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

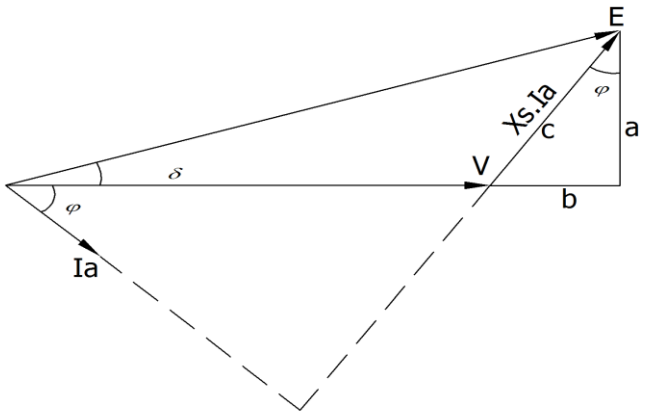


نتایج :

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 می‌دهد.



$$P = 3V_t.I_a.Cos\varphi$$

با توجه به مثلث abc این معادله برابر است با :

$$a = E_f.Sin\delta$$

$$c = X_S.I_a$$

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

$$P = 3V_t.I_a.\frac{E_f.\sin\delta}{X_S.I_a}$$

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

و معادله توان واکنشی برابر است با :

$$Q = 3V_t.I_a.Sin\varphi$$

با توجه به مثلث abc این معادله برابر است با :

$$a = E_f.Cos\delta - V_t$$

$$c = X_S.I_a$$

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

$$Q = 3V_t.I_a.\frac{(E_f.Cos\delta - V_t)}{X_S.I_a}$$

$$Q = 3V_t.\frac{(E_f.Cos\delta - V_t)}{X_S}$$

نکات :

-۱

if $\delta = 0 \rightarrow P = 0$

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.

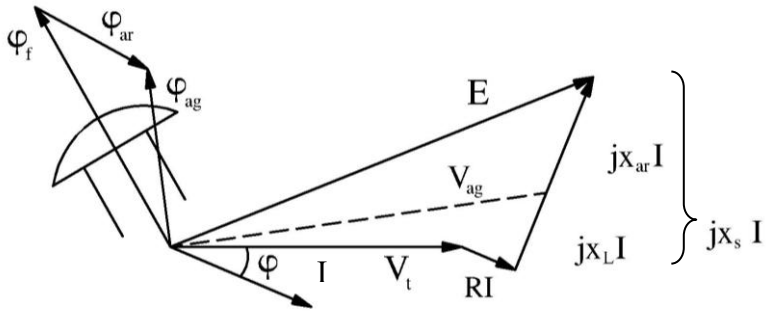
۸- در حالت موتوری $\delta < 0$ است در نتیجه مصرف کننده توان اکتیو است.

-۹

این نتایج را می‌توان در جدول زیر تنظیم نمود.

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

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 Ia موازی است .

φ_{ag} : فوران برآیند در فاصلهٔ هوایی ژنراتور است و بر V_{ag} عمود است .

در حالت بی‌باری ، جریان آرمیچر صفر بوده و ولتاژ ترمینال همان ولتاژ بی‌باری(E_a) می‌باشد.فوران در حالت بی‌باری (φ_f) در جهت قطب‌ها بوده و با توجه به رابطه $E = -N\frac{d(\varphi)}{dt}$ ، ۹۰ درجه نسبت به E_a اختلاف فاز داشته و عمود برآن می‌باشد.زمانی که ژنراتور باردار می‌شود ، فورانی در جهت جریان آرمیچر ایجاد شده که به آن فوران عکس‌العمل آرمیچر گویند(φ_{ar}).برآیند این ۲ فوران را فوران برآیند یا فاصله هوائی گویند.این فوران عمود بر V_{ag} یا ولتاژ فاصله هوائی می‌باشد.

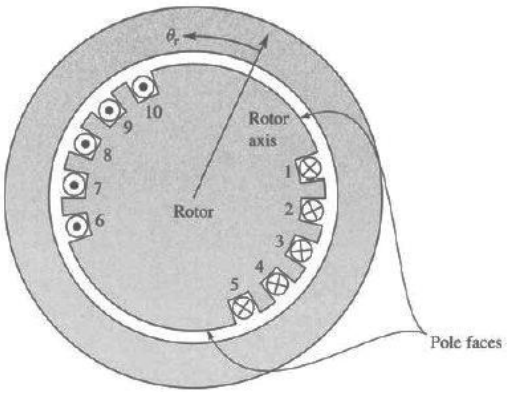
$$\varphi_{ag} = \varphi_f + \varphi_{ar}$$

همانطور که در دیاگرام دیده می‌شود φ_{ar} دارای یک مؤلفه منفی در خلاف جهت φ_f می‌باشد ، که باعث کاهش آن می‌شود و این موضوع در حالت بار اهمی- سلفی به چشم می‌خورد.همواره از مثلث‌های موجود در دیاگرام بالا می‌توان روابط زیر را بدست آورد.

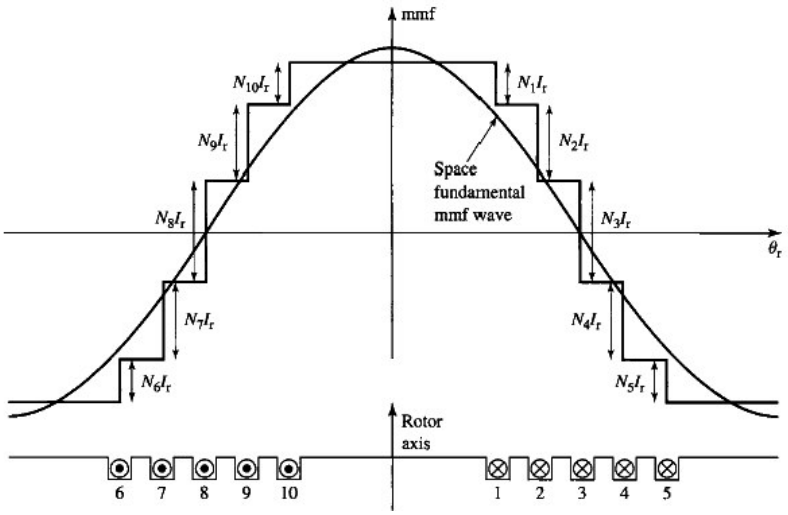
$$\frac{\varphi_f}{E_a} = \frac{\varphi_{ag}}{V_{ag}} = \frac{\varphi_{ar}}{X_{ar} I_a}$$

معادل جریان روتور در سمت استاتور

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



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



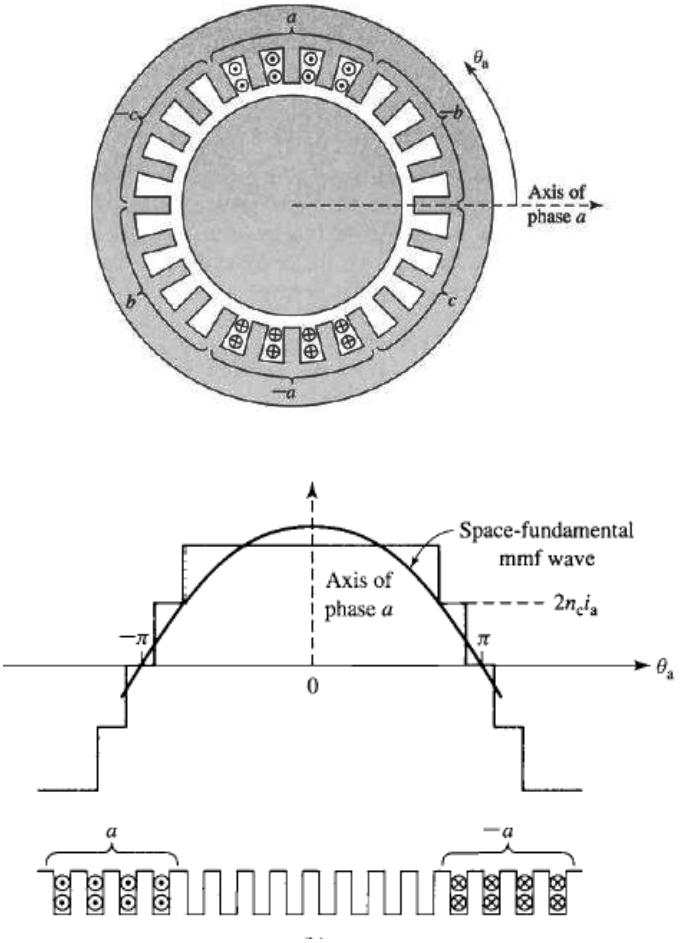
نکته‌ای را که می‌توان از شکل بالا دریافت نمود این است که ما همواره به دنبال توزیع هر چه بیشتر سینوسی نیرومحرکه و چگالی شار در فاصله هوایی می‌باشیم . لذا برای تحقق چنین هدفی در ژنراتورهای قطب برجسته که دارای NI ثابت است ، با تغییر در متغییر g یا همان فاصله هوایی توزیع سینوسی نیرومحرکه و چگالی فوران را ایجاد می‌نماییم و در ژنراتورهای قطب صاف که دارای فاصله هوایی

یکنواخت می‌باشد ، با تغییر در متغییر دور این کار را انجام می‌دهیم . همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود شیارهای ۸ و ۳ دارای بیشترین دور و شیارهای ۱،٦ و ۱۰،۱ دارای کمترین دور می‌باشند ، تاشکل موج نیرو محرکه سینوسی‌تر گردد .

تابع توزیع نیرومحرکه بر حسب زاویه به صورت زیر می‌باشد .

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

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



توزیع نیرومحرکه فاز a :

$$F_a = \frac{4}{\pi}(\frac{N_W.K_W}{P})i_a \cos(\frac{P}{2}\theta_a)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

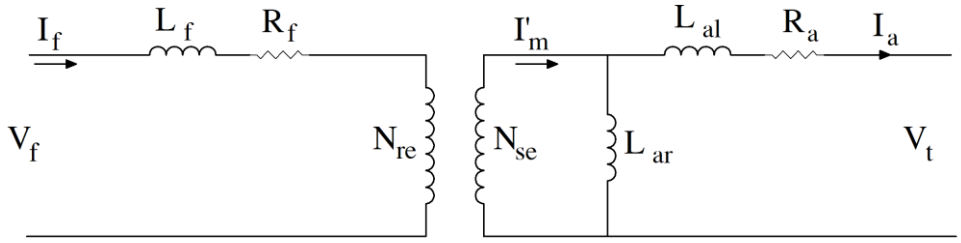
$$N_{re} = N_r.K_r$$

$$N_{se} = N_w.K_w$$

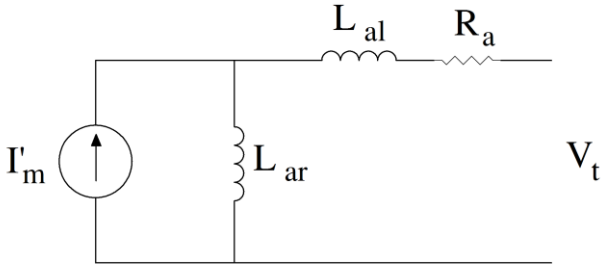
$$I'_m = \frac{2}{3}.(\frac{N_{re}}{N_{se}}).I_f$$

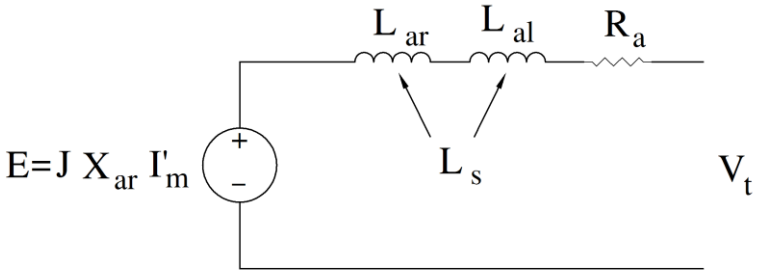
$$I'_{rms} = \frac{I'_m}{\sqrt{2}} \angle\alpha = \frac{\sqrt{2}}{3}.(\frac{N_{re}}{N_{se}}).I_f \angle\theta$$

مدار معادل ژنراتور به صورت زیر در خواهد آمد :

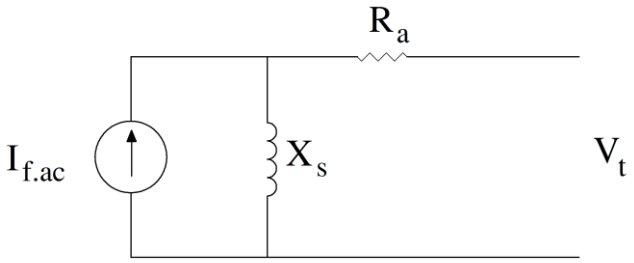


مدار معادل تونن سمت استاتور برابر است با :





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



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

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

درصد تنظیم ولتاژ Voltage Regulation

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

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

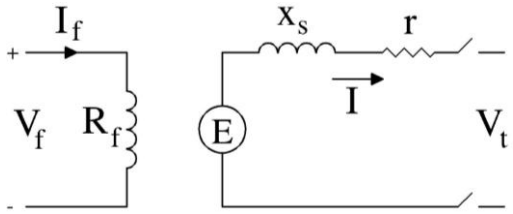
در این رابطه V_{NL} ولتاژ هر فاز ژنراتور در بی باری است که با نیروی محرکهٔ E برابر است . V_{FL} ولتاژ ژنراتور در بار کامل یا بار نامی می باشد . هرچه رگولاسیون کمتر باشد ، افت ولتاژ کمتر است .

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 دیاگرام های برداری در هر فاز :

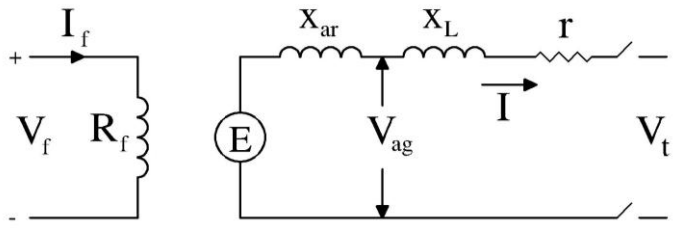


$$\hat{E}=\hat{V}_t+R\,\hat{I}+j\,x_s\hat{I}$$

در این رابطه E نیرو محرکهٔ القاء شده در هر فاز و V_t ولتاژ فازی در ترمینال خروجی مولد می باشد . Rمقاومت 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 می باشد . x_s نیز از سه قسمت تشکیل یافته است : ۱. پراکندگی ، ۲. اثر خودالقایی در سیم پیچ های هر فاز و ۳. اثر القای متقابل هر فاز با دو فاز دیگر .

$$X_s=\omega(\frac{3}{2}L_{aa_\circ}+L_{al})$$

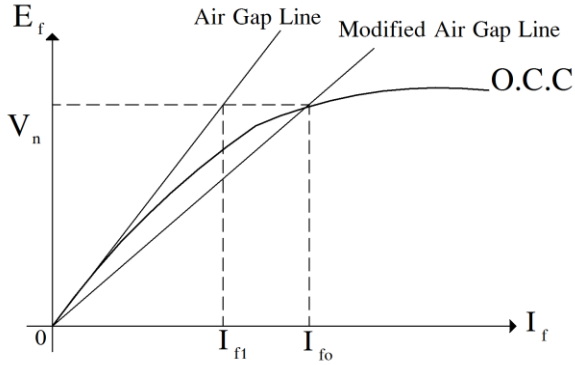
مدار معادل یک فاز ماشین سنکرون با جزئیات بیشتر نشان داده شده است .



V_{ag} ولتاژ فاصلهٔ هوایی نامیده می شود که با صرفنظر از راکتانس پراکندگی و مقاومت اهمی در خروجی ماشین می توان آن را بدست آورد . رابطهٔ 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 متغییر به سیم‌پیچ‌های میدان جریان تحریک را افزایش داده تا ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور نیز افزایش یابند. افزایش تحریک را تا افزایش مقدار نامی ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور ادامه داده. در نهایت منحنی تغییرات ولتاژ ژنراتور بر حسب جریان تحریک را رسم می‌نمائیم. مشخصه مدار باز یک ژنرتور سنکرون ، همانند منحنی بی‌باری یک ماشین DC ،بیانگر تغییرات ولتاژ خروجی ژنراتور در حالت مدار باز بر حسب تغییر جریان تحریک می‌باشد.به بیان دیگر مشخصه مدار باز رابطه بین مؤلفه اول یا هارمونی اول شار شکاف هوائی و mmf وارد بر مدار مغناطیسی را در حالتی که سیم‌پیچ میدان تنها منبع تولید نیرومحرکه مغناطیسی می‌باشد را نشان می‌دهد.

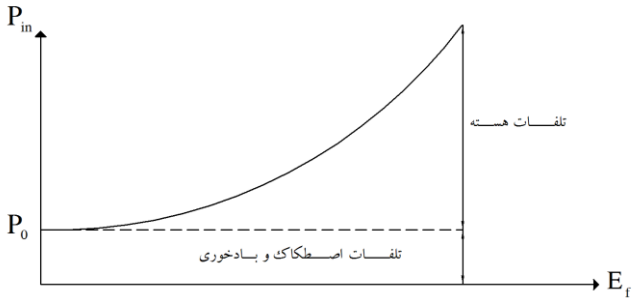


در منحنی بالا اثرات اشباع به وضوح دیده می‌شود. منحنی با افزایش جریان میدان و افزایش رلوکتانس مسیر شار داخل آهن در اثر اشباع ماده مغناطیسی رو به پایین خم شده و تاثیر میدان در ایجاد شار کاهش می‌یابد. بخش خطی منحنی را ، خط شکاف هوائی می‌نامند و نشان‌دهنده ولتاژ مدار باز در صورت نبودن اشباع مغناطیسی است. برای بدست آوردن این منحنی باید ژنراتور را با دورنامی چرخانده تا به یک پایداری حرارتی برسد. همانگونه که در منحنی بالا دیده می‌شود چنانچه از اثرات اشباع صرفنظر نمائیم منحنی

مشخصه بی‌باری آن به صورت خط راستی در خواهد آمد که به آن خط شکاف هوائی(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 هوائی اصلاح شده (Modified Airgap Line) گویند.

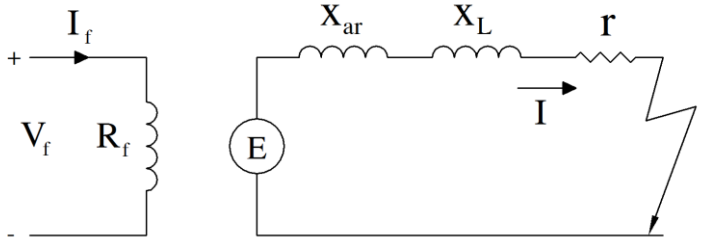
با توجه به رابطه $E_f = \omega.L_{af}.I_f$ و $L_{af} = \frac{E_f}{I_f.\omega}$ و با توجه به ثابت بودن مقدار E_f و ω ، در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع (خط فاصله هوائی) جریان تحریک بیشتری نیاز داریم ($I_{f1} < I_{f0}$)، و لذا L_f حالت اشباع کمتر از L_f حالت غیر اشباع بوده و در نتیجه تزویج مغناطیسی 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 هیسترزیس) را تامین نماید. تغییرات توان ورودی بر حسب ولتاژ ایجاد شده در سیم‌پیچ‌های ژنراتور به صورت زیر خواهد بود.:

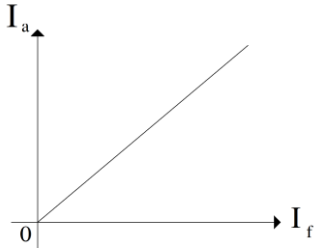


ب . آزمون اتصال کوتاه :

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 $V_t=0$ می‌باشد ، پس $E = rI + JX_sI$ می‌باشد. در این حالت ، با توجه به معادله ،می‌توان E را مبنا قرار داد. برای انجام این آزمایش ابتدا پایانه‌های 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 می‌نمائیم. این آزمایش را تا مقدار جریان نامی ژنراتور ادامه می‌دهیم .



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

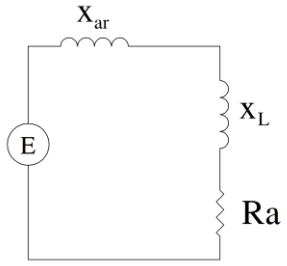
$$E = V + rI + JX_sI$$

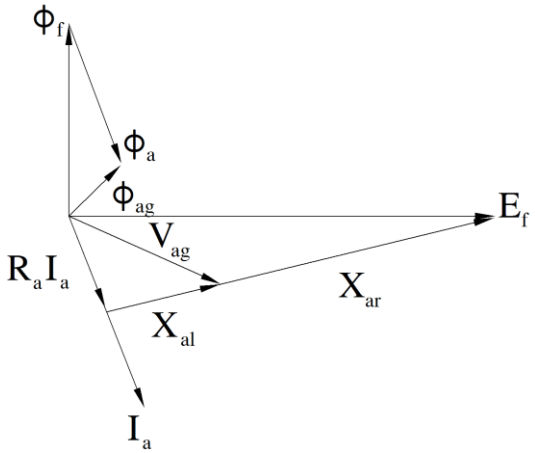
$$X_s = \omega(\frac{3}{2}L_{aa_\circ} + L_{al})$$

در شرایط اتصال کوتاه :

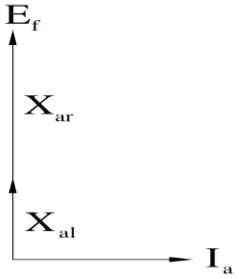
$$V = 0 \rightarrow E = Z.I$$

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

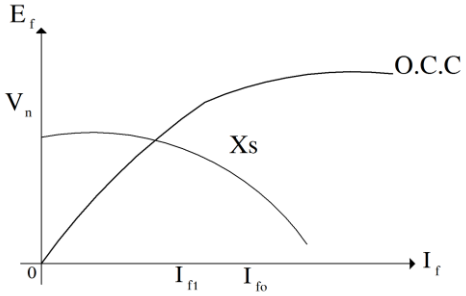




در شرایط اتصال کوتاه همانند بار سلفی فوران عکس‌العمل حالت مغناطیس زدائی دارد. و اگر از مقـدار R_a صرفنظر نمائیم دیاگرام به شکل زیر در خواهد آمد.



همانطور که گفته شد ولتاژ داخلی ژنراتور (E_f) از آزمایش بی‌باری بدست می‌آیـد و در ایـن آزمـایش بـه ازای جریان‌های بزرگ میدان ، ماشین تا حدی در اشباع قرار دارد ، در حـالی کـه جریـان آرمیچـر (I_a) از آزمایش اتصال کوتاه بدست آمده که در آن مسئله اشباع مطرح نمی‌باشد . پس در جریان‌های بـزرگ میـدان ولتاژ گرفته شده از منحنی بی‌باری به ازای یک جریان معین همان ولتاژ شرایط اتصال کوتاه نمـی‌باشـد . بـا 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 راکتـانس سـنکرون را بـه صـورت تابعی از جریان میدان نشان می‌دهد.

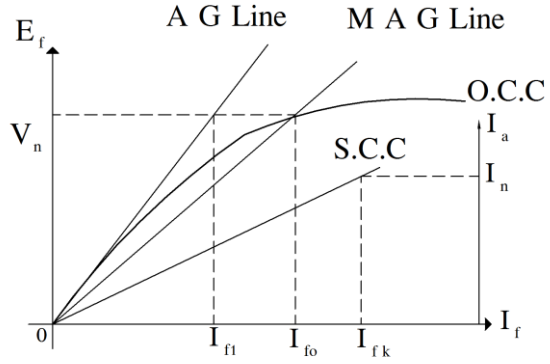


نسبت اتصال کوتاه

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 برقـــــرار می‌باشد.

(در حالت پریونیت)

$$SCR = \frac{1}{X_s}$$



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

مقدار SCR در ژنراتورهای قطب صاف بین 0.7 – 0.4 بوده ولـــی 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.

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

g : فاصله هوائی ماشین .

L : اندوکتانس سنکرون .

X : راکتانس سنکرون .

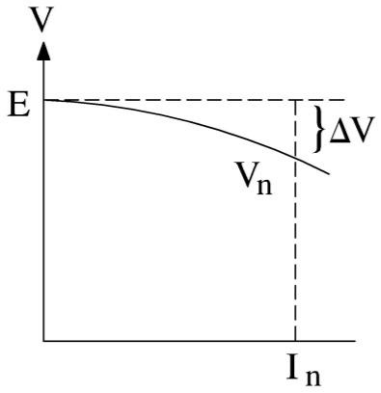
w : فرکانس زاویه ای چرخش .

روش محاسبه تعیین درصد افت ولتاژ (رگولاسیون)

درصد افت ولتاژ یک ژنراتور سنکرون از رابطهٔ $\%V\cdot R=\frac{E-V}{V}\times 100$ بدست می آید و باید برای تعیین آن E را داشته باشیم . چهار روش برای تعیین E و درنتیجه محاسبهٔ رگولاسیون ولتاژ وجود دارد .

الف – روش استفاده از منحنی بارداری .

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

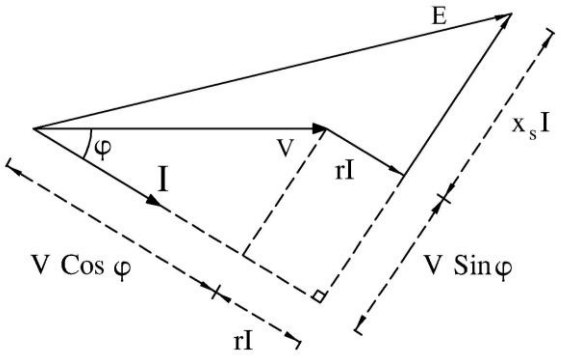


$$\%V\cdot R=\frac{\Delta V}{V_n}\times 100=\frac{E-V}{V_n}\times 100$$

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

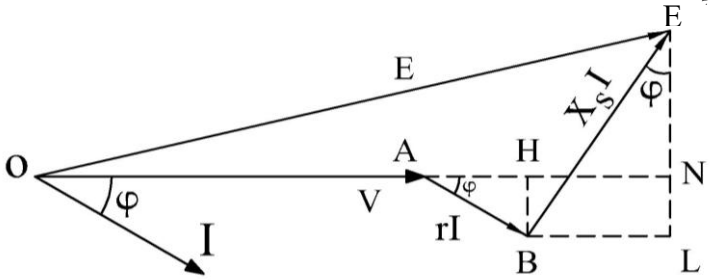
ب – روش امپداس سنکرون .

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 محاسبهٔ E نشان داه شده است .



$$E_{Ph} = \sqrt{(V \cdot \mathrm{Cos}\,\varphi + R\,I)^2 + (V \cdot \mathrm{Sin}\,\varphi \pm x_s\,I)^2}$$

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 آ



$$E = OC \approx ON$$

$$= OA + AH + HN$$
$$= V + R \cdot I \cdot \mathrm{Cos}\,\varphi + x_s \cdot I \cdot \mathrm{Sin}\,\varphi$$

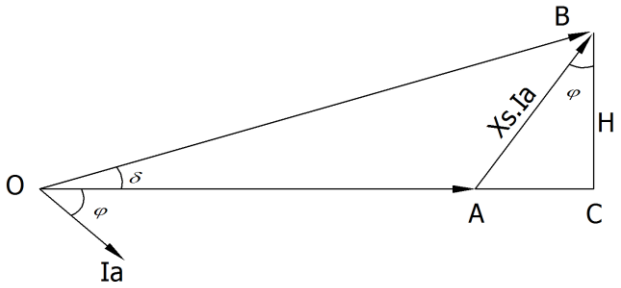
$$\Delta V = E - V = R \cdot I \cdot \mathrm{Cos}\,\varphi + x_s \cdot I \cdot \mathrm{Sin}\,\varphi$$

$$\%V \cdot R = \frac{R \cdot I \cdot \mathrm{Cos}\,\varphi \pm x_s \cdot I \cdot \mathrm{Sin}\,\varphi}{V} \times 100$$

در این رابطه و نیز رابطهٔ 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.می‌خواهیم بررسی نماییم مساحت مثلث ایجاد شده در این دیاگرام با توان ژنراتور چه ارتباطی دارد.



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

$$BC = H = OB.\sin(\delta) = E.\sin(\delta) = AB\cos(\varphi) = XI.\cos(\varphi)$$

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

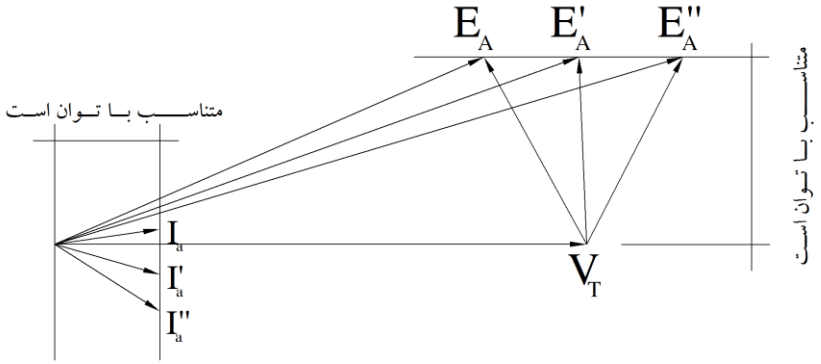
$$P = \frac{E.V}{X_S}\sin(\delta)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2}P.X_S$$

همانگونه که در معادله اخیر دیده می‌شود 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 می‌نماید. در واقع به همان نسبت که Ea افزایش پیدا می‌کند ، $\sin(\delta)$ هم کاهش می‌یابد. 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 $P = \frac{E.V}{X_S}.\sin(\delta)$ و $P = V.I.\cos(\varphi)$ و ثابت بودن توان ، باید عبارت‌های $I.\cos(\varphi)$ و $E.\sin(\delta)$ ثابت بماند.پس با افزایش تحریک تغییر دیاگرم به صورت زیر می‌باشد .



اثر تغییرات بار بر روی ژنراتور

رفتار ژنراتور سنکرون زیر بار بشدت تابع ضریب تـوان بـار و کـارکرد آن بـه تنهـائی یـا مـوازی بـا دیگـر ژنراتورهای سنکرون است .

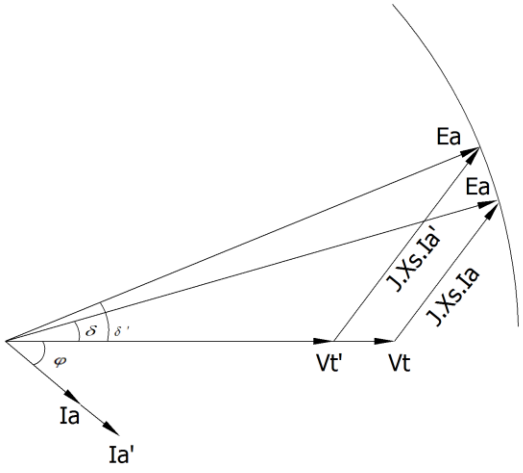
ژنراتوری را در نظر بگیرید که باری را تغذیه می‌کند . اگر با ژنراتور را زیاد کنیم چه روی می‌دهد.



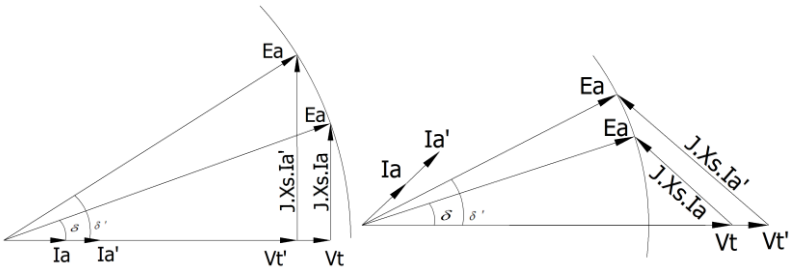
افزایش بار به معنای افزایش توان حقیقی و یا واکنشی است که از ژنراتور کشیده می‌شـود.این افـزایش بـار باعث زیاد شدن جریان بارکشیده شده از ژنراتور می‌شود.چون مقاومت میدان تغییری نکرده اسـت ، جریـان میدان ثابت و بنابراین شار میدان (φ) نیز ثابت است .بدلیل اینکه سرعت ژنراتور را ثابت نگه داشـته‌ایـم ، اندازه ولتاژ داخلی E_a ثابت می‌ماند. پس با تغییر بار چه چیزی تغییر می‌کند؟ 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 نسـبت بـه V_t همـان زاویه قبلی ϕ را خواهند داشت . بنابراین ولتاژ عکس العمل jX_sI_a بزرگتر از قبل می‌شود اما زاویه‌اش تغییر نمی‌کند.jX_sI_a باید انتهای V_t را که در زاویه صفر درجه قرار دارد به انتهـای E_a کـه بـه رغـم تـغییر بـار اندازه‌اش ثابت است وصل کند.اگر این محدویت‌ها را در رسم دیاگرام فازوری در ظر گیـریم ،تنهـا یـک نقطه وجود دارد که در آن ولتاژ عکس‌العمل با موقعیت قبلی‌اش موازی و اندازه‌اش 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 .



ضریب توان پیش فاز ضریب توان واحد

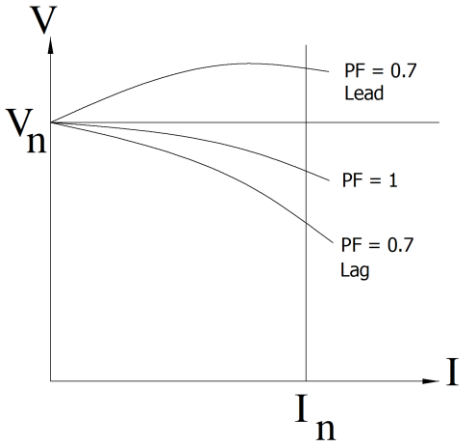
نتیجه‌گیری :

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:

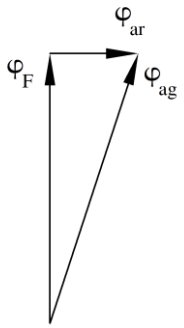
۱- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان پس فاز کار می‌کند تنظیم ولتاژ" مثبت و نسبتاً بزرگی" دارد .

۲- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان واحد کار می‌کند تنظیم ولتاژ "مثبت و کوچک" دارد.

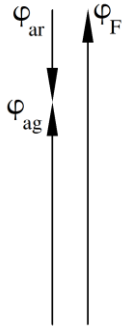
۳- ژنراتور سنکرونی که با ضریب توان پیش‌فاز کار می‌کند ، تنظیم ولتاژ" منفی" دارد.

مقایسه فوران‌ها در بارهای مختلف

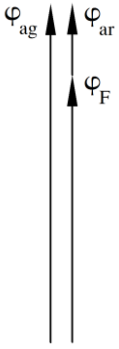
حالت اهمی :



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

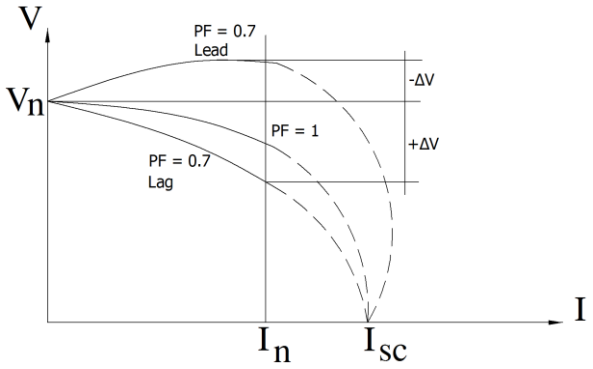


مشخصات عملکرد ژنراتور سنکرون در حالت ماندگار

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

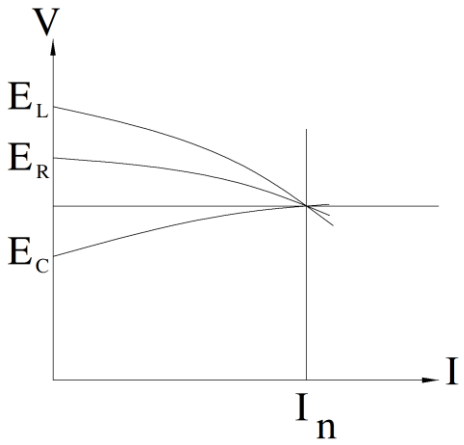
آ – منحنی بارداری ژنراتور در تحریک یکسان

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.



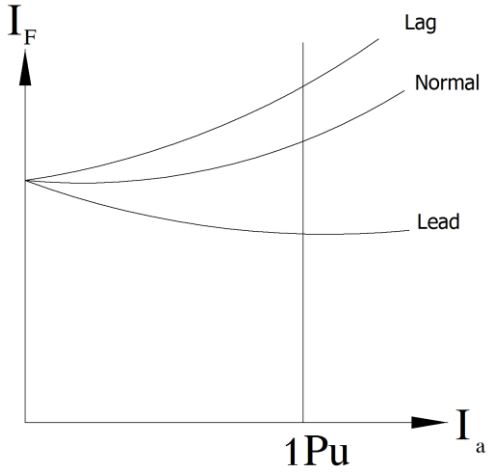
ب – منحنی بارداری ژنراتور سنکرون در نقطه نامی مشترک.

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.



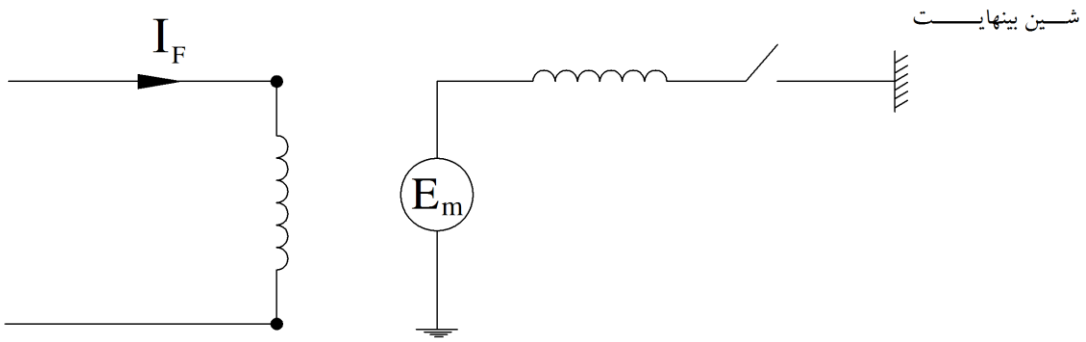
ج – منحنی کمپوندینگ

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 . مثلا 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.



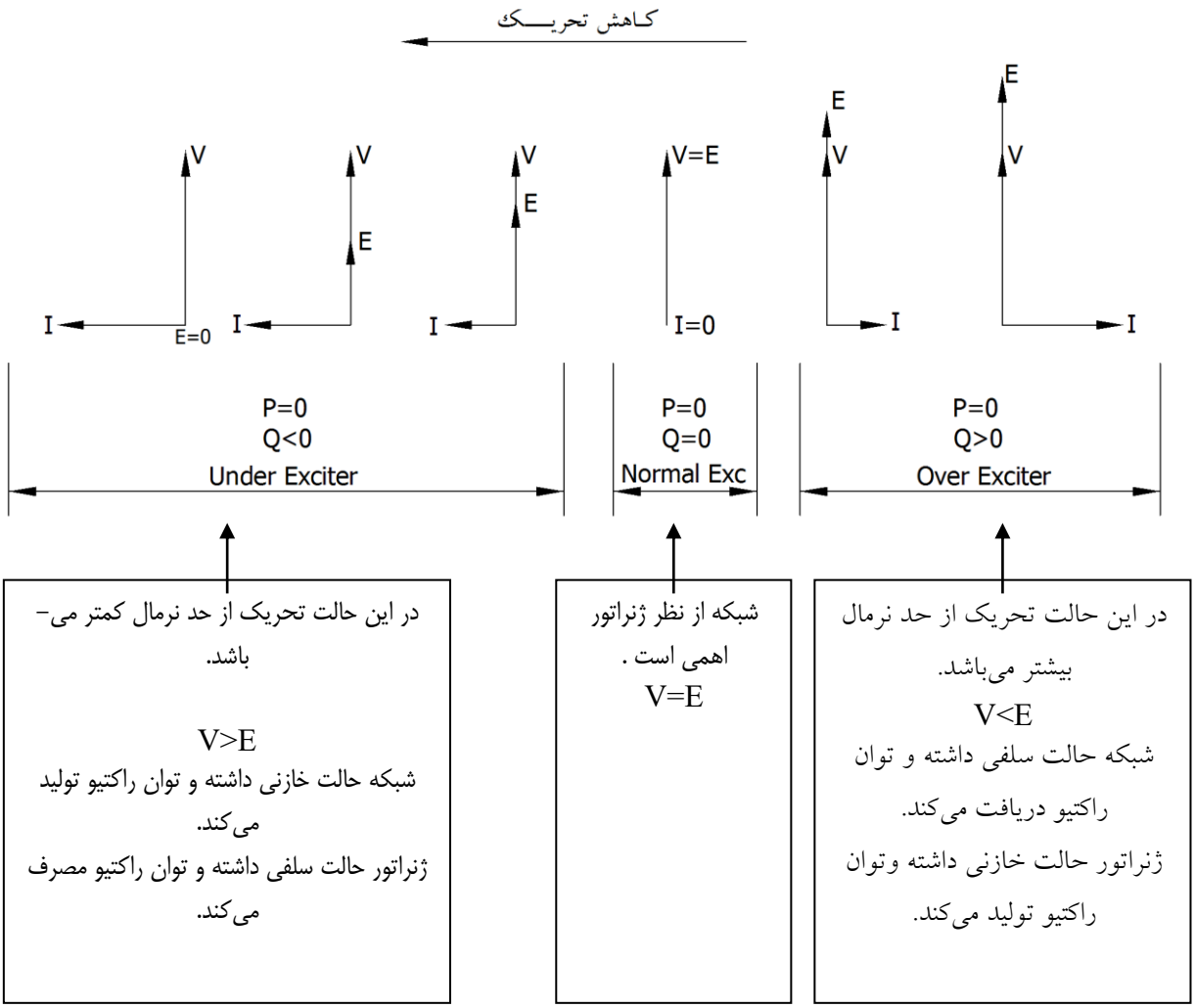
د – منحنی های V .

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.

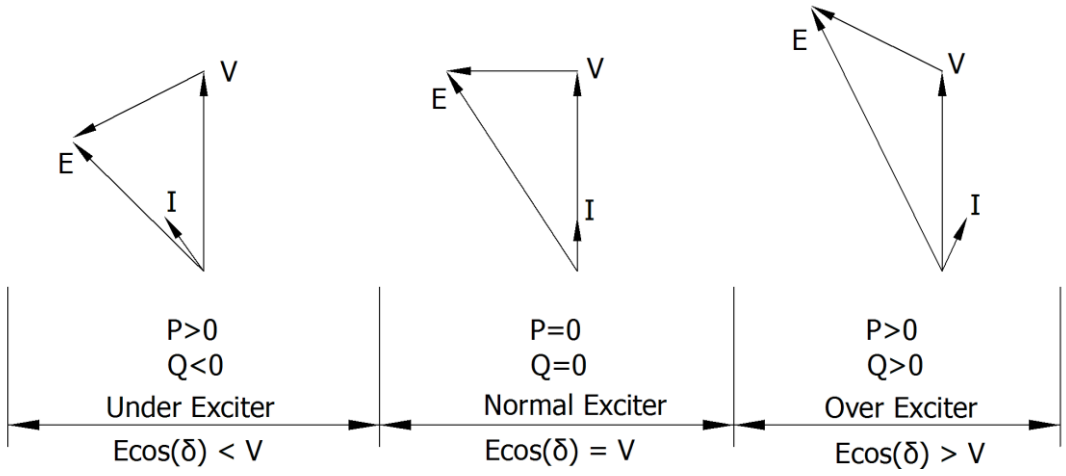


دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

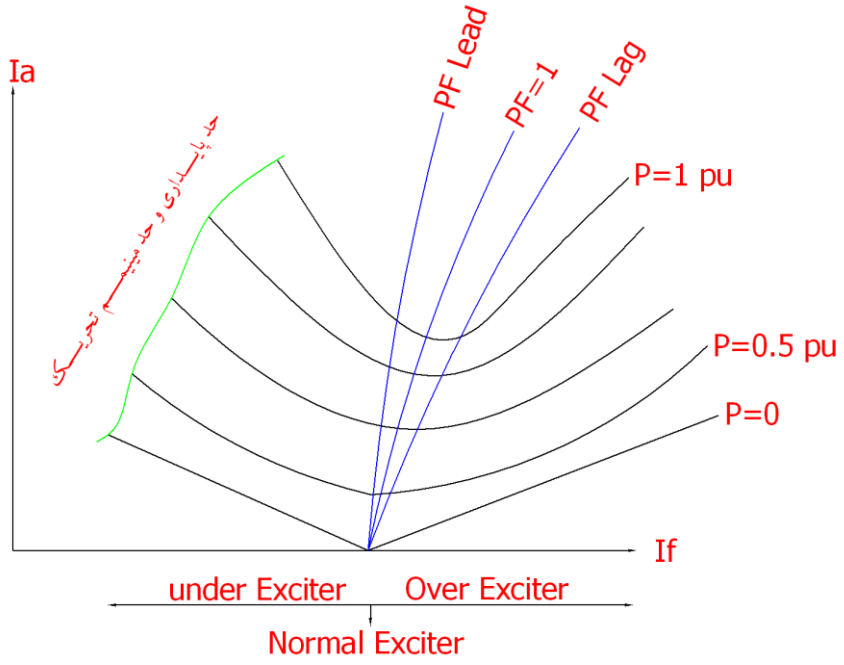
۱- توان ثابت و صفر باشد. ($P = 0$) : زمانی توان صفر است که E و V بر هم منطبق باشند و یا $\delta = 0$ باشد. در این حالت فقط جریان راکتیو داریم .اکنون تحریک را از $E > V$ شروع به کاهش داده تا به تحریک صفر برسیم.جریان که در این حالت در شبکه جاری می‌باشد ، جریان راکتیو است.رفتار مقدار جریان در شبکه به صورت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



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



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



در شکل بالا خط چین‌ها را می‌توان مکان هندسی ضریب توان ثابت و یا همان منحنی کمپوندینگ است .

و- منحنی قابلیت (Power Chart or Capability Curve)

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

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

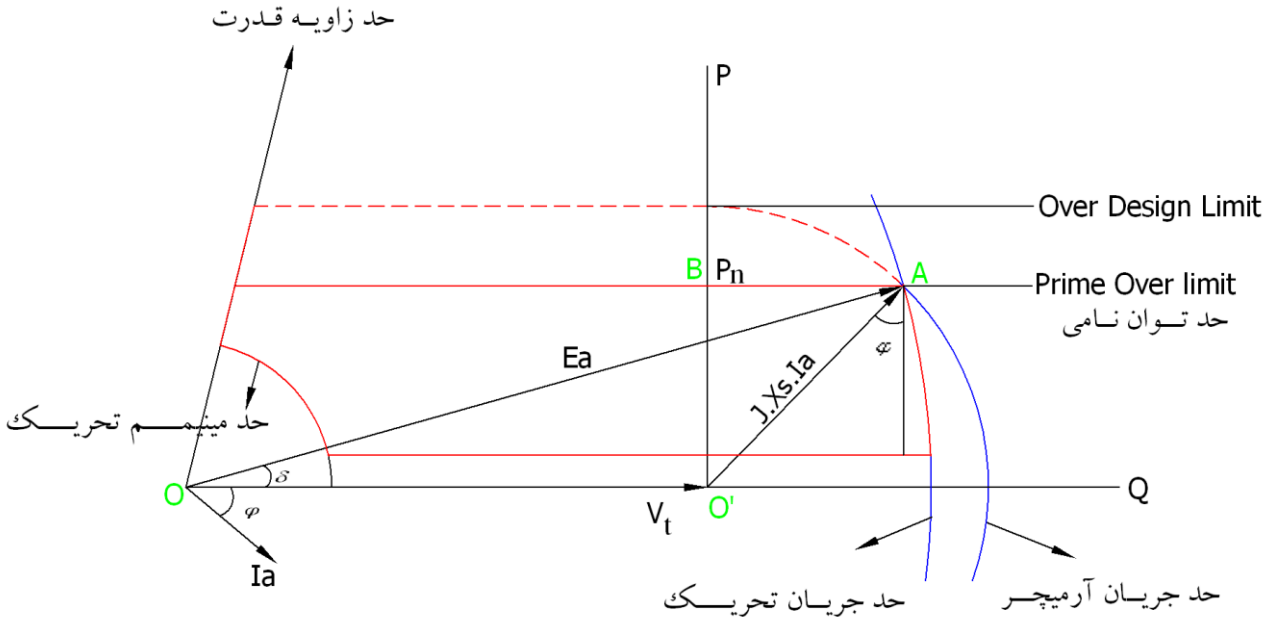
۳- جریان تحریک نباید از یک مقدار بیشتر شود.زیرا بدنبال آن مسائل حرارتی و عایقی سیم‌پیچ رتور را خواهیم داشت ، که به آن حد ماکزیمم جریان تحریک گویند.

۴- جریان استاتور هم نباید بدلیل مسائل حرارتی و عایقی از یک حدی بیشتر شود.

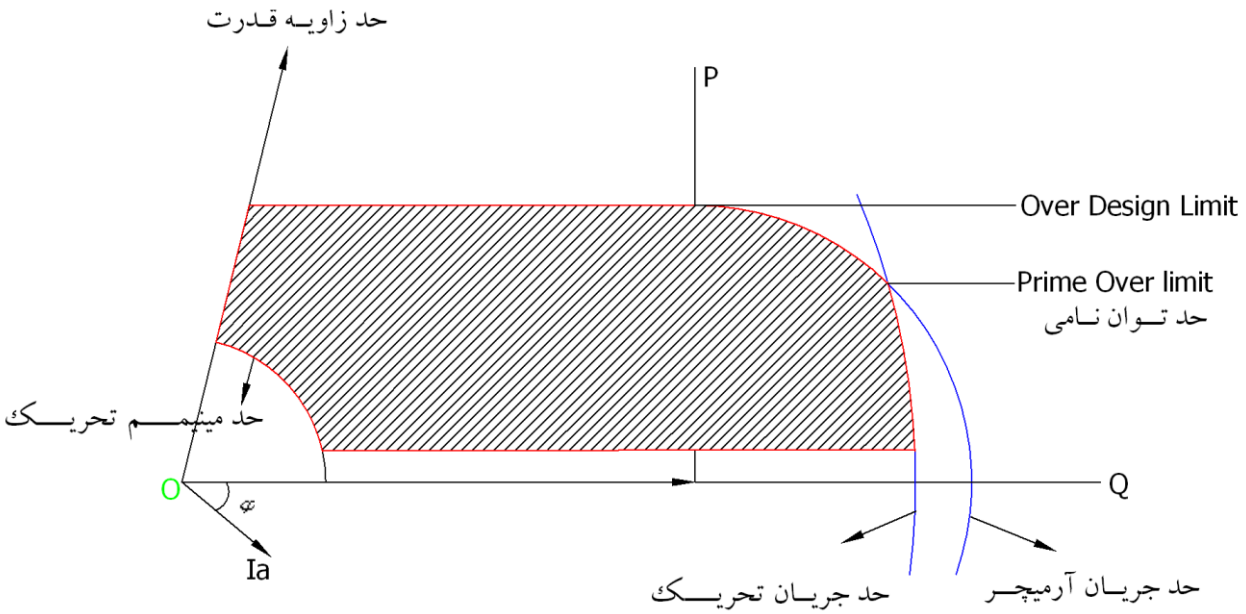
۵- درجه حرارت توربین نباید از یک حدی پایین‌تر آید ، به همین دلیل توان ژنراتور نمی‌تواند خیلی کم باشد.

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 .زیراکه $X.I \propto I_a$ می‌باشد.

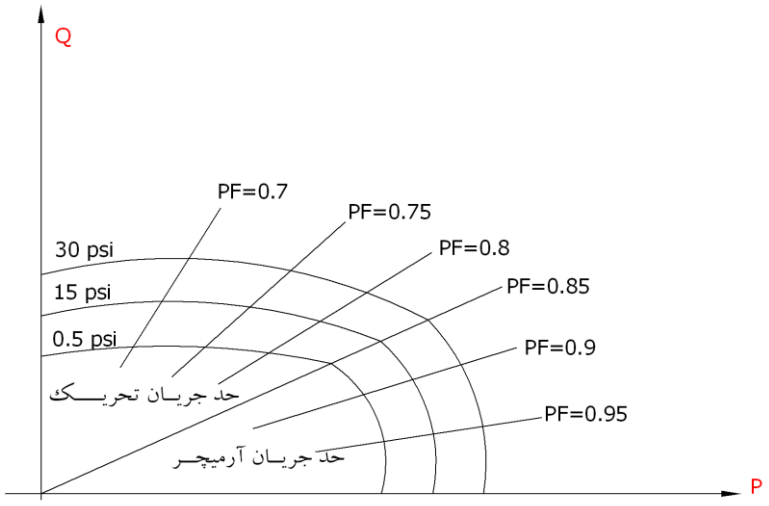
۳- هر نقطه روی محور عمودی برابر است با تصویر جریان روی آن یا $O'B = I.\cos(\varphi)$ و چون ولتاژ ثابت می‌باشد ، پس محور قائم می‌تواند محور توان اکتیو و محور افقی ،محور توان راکتیو باشد.

۴- اگر ژنراتور با ضریب قدرت نامی کار کند پس $O'B$ یا توان نامی هم متناسب با آن می‌باشد ، ولی اگر ژنراتور بتواند $\cos(\varphi)=1$ 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.

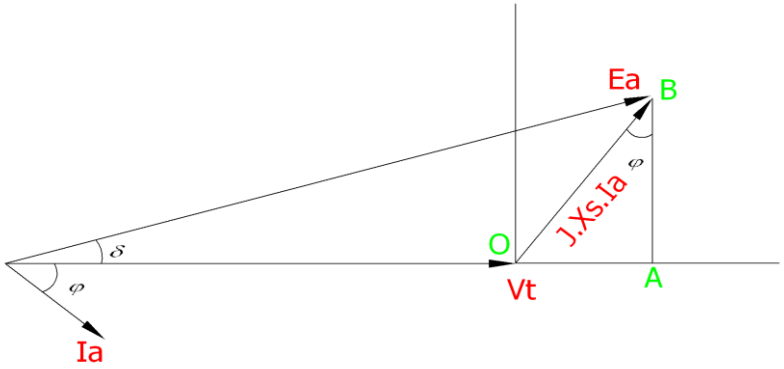
چنانچه مسائل خنک‌کنندگی را بخواهیم مد نظر قرار دهیم ، در واقع حد جریان آرمیچر و تحریک را افزایش داده‌ایم.در زیر یک مجموعه منحنی قابلیت برای یک ژنراتور بزرگ توربینی که با هیدروژن خنک می‌شود را نشان می‌دهد . این منحنی‌ها ماکزیمم بار واکنشی متناظر با مقادیر مختلف توان حقیقی ، هنگام کار در ولتاژ پایانه‌ای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



سه منحنی نشان‌داده شده در شکل بالا با مقادیر مختلف فشارگاز هیدروژن خنک کن ، متناظراند.همانطور که دیده می‌شود ، افزایش فشار گاز خنک شازی را بهتر می‌کند و امکان کار در بار بزرگتر را به ماشین می‌دهد .این منحنی راهنمای ارزشمندی برای طراحان و تکنسین‌ها می‌باشد. در نگاهی دیگر می‌توان گفت که این منحنی بر اساس کار در شرایط ولتاژ پایانه‌ای و جریان آرمیچر ثابت در ماکزیمم مقداری که سیستم خنک کنندگی امکان می‌دهد ، با ثابت بودن توان ظاهری که از حاصلظرب ولتاژ در جریان بدست می‌آید ، متناسب است.

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

پس با ثابت بودن توان ظاهری ، نمودار توان واکنشی بر حسب توان حقیقی ، دایره‌ای به مرکز مبدأ بوده.و همچنین اگر توان ظاهری ثابت باشد ، پس با توجه به اینکه ولتاژ پایانه‌ای را ثابت فرض نموده‌ایم ، جریان آرمیچر ثابت است که این با ایجاد گرمای ثابت در سیم‌پیچ 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 ، می‌توان آن را از نمودار فیزوری ژنراتور بدست آورد.ولی باید این منحنی را با دیاگرام فیزوری ژنراتور با مقیاس بندی مناسب منطبق نمود.



$$AB = X_S.I_a.\cos(\varphi)$$

$$OA = X_S.I_a.\sin(\varphi)$$

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

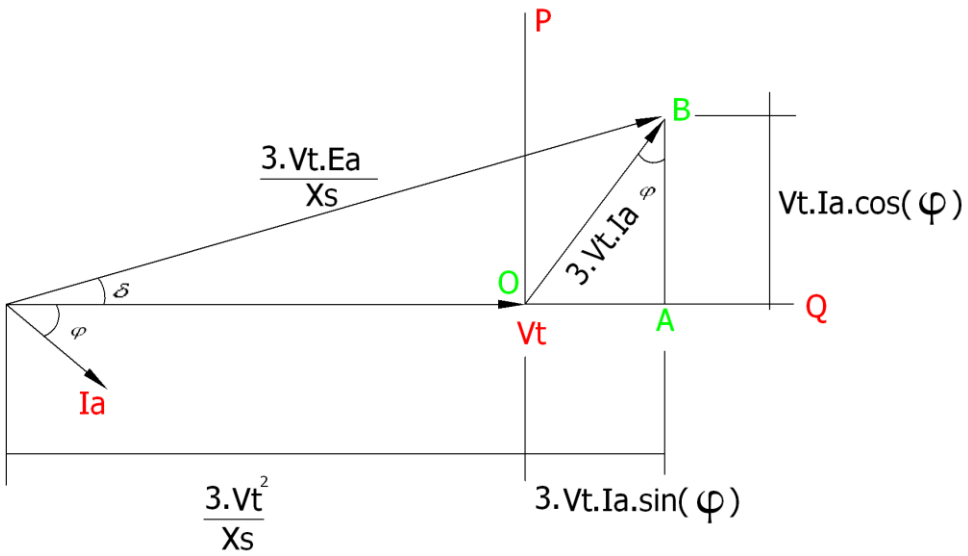
$$Q = 3V_t.I_a\sin(\varphi)$$

$$S = 3V_t.I_a^*$$

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 $\frac{3.V_t}{X_S}$.

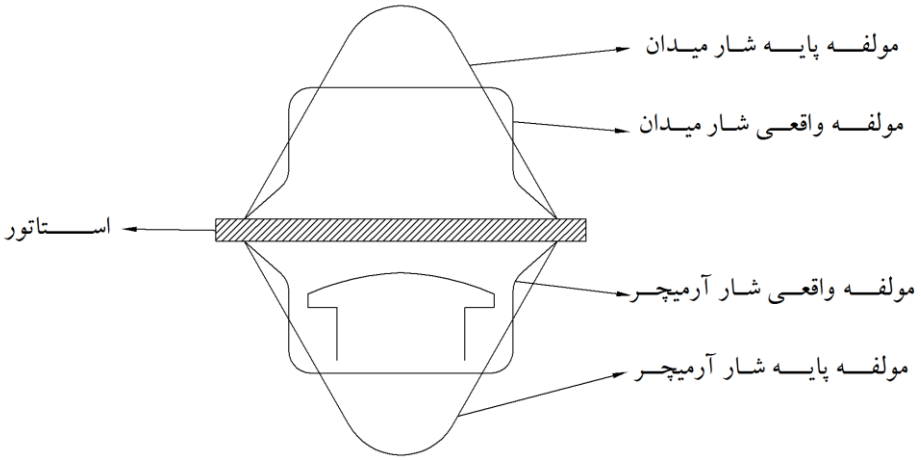
$$P = 3V_t.I_a\cos(\varphi) = 3\frac{V_t}{X_S}.(X_S.I_a\cos(\varphi))$$

$$P = 3V_t.I_a\sin(\varphi) = 3\frac{V_t}{X_S}.(X_S.I_a\sin(\varphi))$$

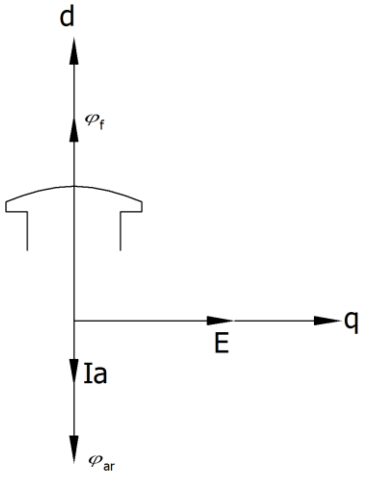


اثرات برجسته بودن قطب‌ها

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

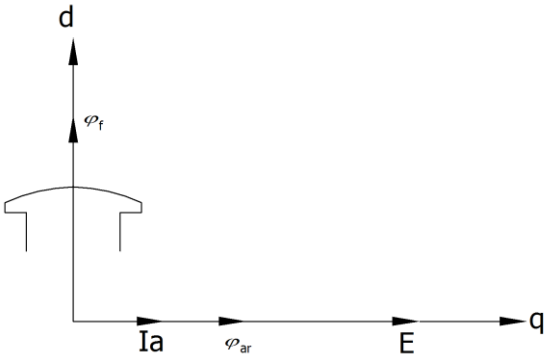


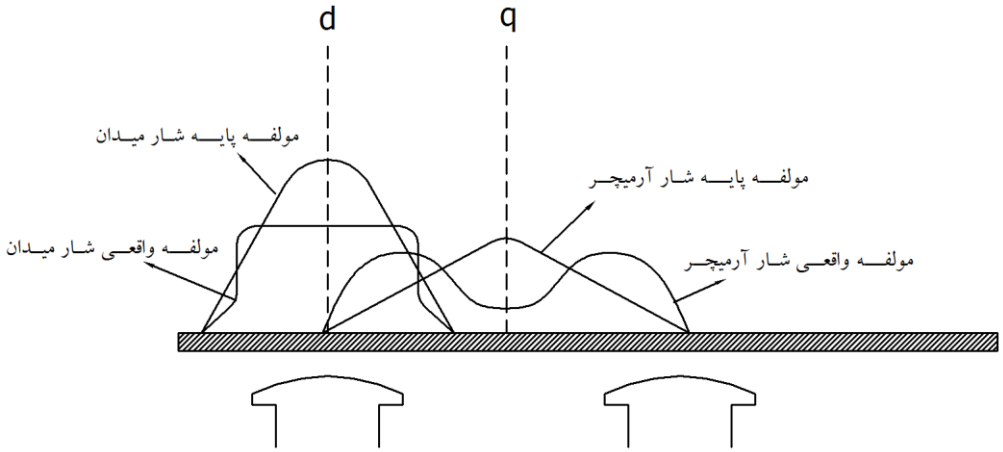
سیم‌پیچ‌های میدان شاری در امتداد قطب‌های میدان تولید کرده (در امتداد محـور مسـتقیم) و ولتـاژ تولیـد شده در آرمیچر طبق رابطه $E=-N\frac{d\phi}{dt}$ ، ۹۰ درجه نسبت به فوران پسفاز می‌باشد.طبق تعریف بدلیل اینکه محورهای مستقیم ومتعامد نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند، پس بـردار ولتـاژ القـاء شـده بـر روی 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 پس فاز اسـت (بـار 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) .فـوران ایـن جریـان همانطور که در دیاگرام زیر دیده می‌شود نسبت به فوران میدان ۹۰ درجه پس فاز می‌باشد.ولی توزیع فوران

ناشی از غیر یکنواخت بودن فاصله هوائی یا غیر همنواخت بودن رلوکتانس فاصله هوائی بـه صـورت زیـر می‌باشد. [فیتز]





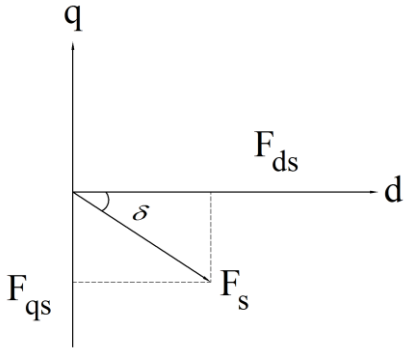
در مواقعی که واکنش آرمیچر در امتداد محور متعامد است، مولفه فضائی پایه شار واکنش آرمیچـر بـه ازای جریان آرمیچر یکسان کمتر از مولفه فضائی پایه شار واکنش آرمیچر ، در حالتی که در امتداد محور مسـتقیم قرار دارد ، می‌باشد. اثر برجستگی را می‌توان در دیاگرام زیر بررسی نمود.

ماشین‌های قطب برجسته

در این گونه ماشین‌ها با توجه به فرمول $L = \frac{N^2}{R}$ در هر راسـتائی یـک L جداگانـه داریـم. از آنجـائی کـه مقاومت مغناطیسی (R_m) در راستای قطب‌ها (محور d) کمتر از مقاومت مغناطیسی در راسـتـای عمود بر محور قطب‌ها (محور q) می‌باشد پس :

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

در ماشین‌های قطب برجسته ، نیرومحرکه مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر را کـه ریشـه‌شـان در سـه جریـان استاتور می‌باشد به دو مولفه بر روی محورهای مستقیم و متعامد تقسیم می‌گردند .



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

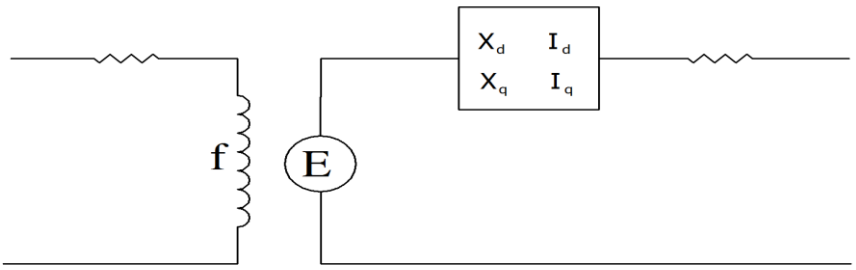
$$F_s.\sin\delta = R_q.\phi_q \rightarrow \phi_q = \frac{F_s.\sin\delta}{R_q}$$

$$R_d < R_q$$

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

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

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 (Cylinderical Pole):

۱- در واحدهای نیروگاه‌های حرارتی (بخار – گاز) است کاربرد دارد.

۲- تعداد قطب‌های آن کم .(P=2) و دور سنکرون 3000(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.

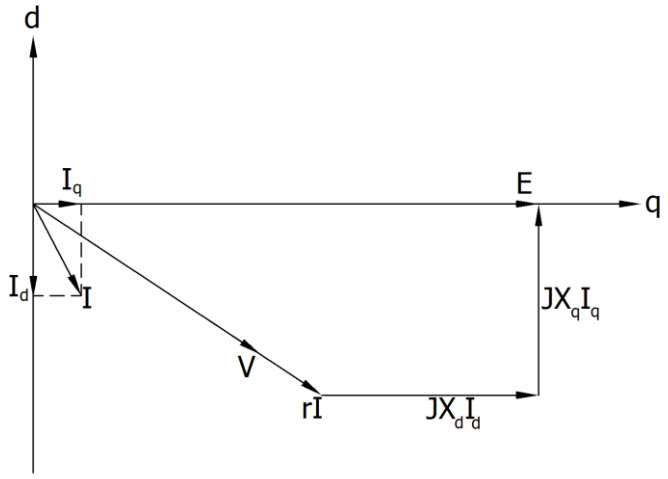
۲- تعداد قطب‌های آن زیاد .($P \geq 4$).و دارای دور کم می‌باشد.($n_S \leq 1500$).

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:

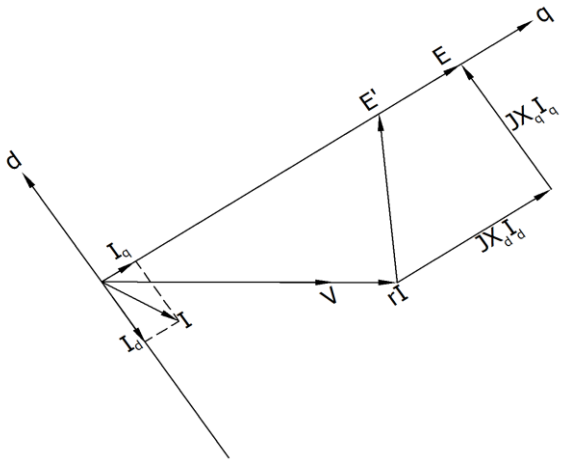


$$\hat{I} = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

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

$$|I_d| = |I|.\sin(\phi + \delta)$$
$$\hat{I}_q = |I_q| \angle 0$$
$$|I_q| = |I|.\cos(\phi + \delta)$$

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



$$|I_d| = |I|.\sin(\phi + \delta)$$
$$|I_q| = |I|.\cos(\phi + \delta)$$
$$V_d = V.\sin(\delta)$$
$$V_q = V.\cos(\delta)$$

دردیاگرام‌های 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 δرا نداریم.بنابراین جهت بدست آوردن زاویه قدرت ابتدا معادله $E' = V + r\hat{I} + JX_q.\hat{I}$را حل نموده تا زاویه E' را بدست آوریم ، این زاویه همان زاویه قدرت (δ) می‌باشد.دلیل آن را بصورت زیر اثبات می‌نمائیم.

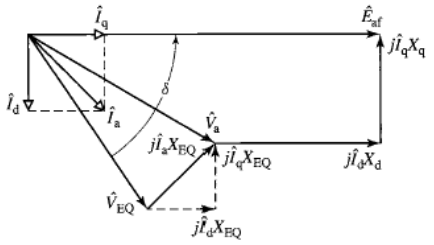
$$E - E' = (V + r\hat{I} + JX_d.\hat{I}_d + JX_q.\hat{I}_q) - (V + r\hat{I} + JX_q.(\hat{I}_q + \hat{I}_d))$$
$$E - E' = J(X_d - X_q).I_d$$

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

مشخصات توان در ماشین‌های قطب برجسته

شکل زیر یک ماشین سنکرون قطب برجسته (SM) را نشان می‌دهد که از طریق یک امپـدانس سـری بـا مقدار X_{EQ} (راکتانس خط و ترانس) به شبکه بینهایت وصل شده است . از مقدار مقاومت بدلیل کوچـک بودن آن چشم پوشی شده است . همچنین دیاگرام برداری آن در زیر دیده می‌شود .





با توجه به دیاگرام داریم :

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + JX_{EQ}.\hat{I}_a + JX_d.\hat{I}_d + JX_q.\hat{I}_q$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + JX_{EQ}.(\hat{I}_d + \hat{I}_q) + JX_d.\hat{I}_d + JX_q.\hat{I}_q$$

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

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

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

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

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

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

$$E_{af} = V_{EQ}.\cos(\delta) - JV_{EQ}.\sin(\delta) + J(X_{dt})\hat{I}_d + J(X_{qt})\hat{I}_q$$

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

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

$$E_{af} = V_{EQ}.\cos(\delta) - JV_{EQ}.\sin(\delta) + (X_{dt})I_d + J(X_{qt})I_q$$

با توجه به معادله اخیر بدست آمده ، قسمت‌های حقیقی طرفین را باهم و قسمت‌های موهومی طرفین را بـا هم مساوی قرار می‌دهیم .

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

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

با توجه به این معادلات داریم :

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

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

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

$$S = V_{EQ}.I^*$$

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

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

$$S = (V_q - JV_d).(I_q + JI_d)$$

$$S = (V_d.I_d + V_q.I_q) + J(V_qI_d - V_dI_q)$$

$$P = V_d.I_d + V_q.I_q$$

$$Q = V_qI_d - V_dI_q$$

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

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

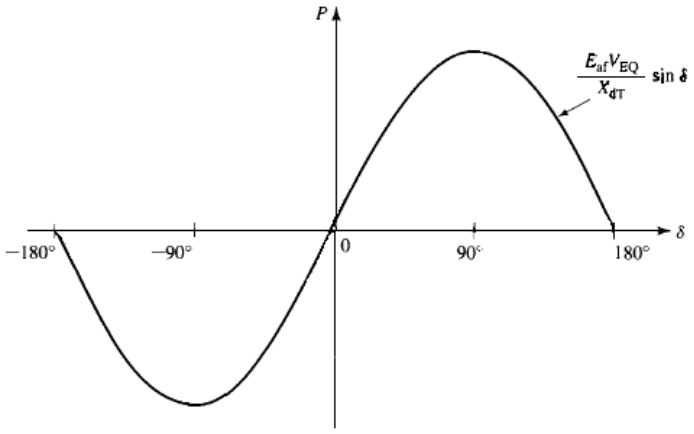
$$Q = \frac{E_{af}.V_{EQ}}{X_{dt}}\cos(\delta) - V_{EQ}^2(\frac{\cos^2(\delta)}{X_{dt}} - \frac{\sin^2(\delta)}{X_{qt}})$$

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

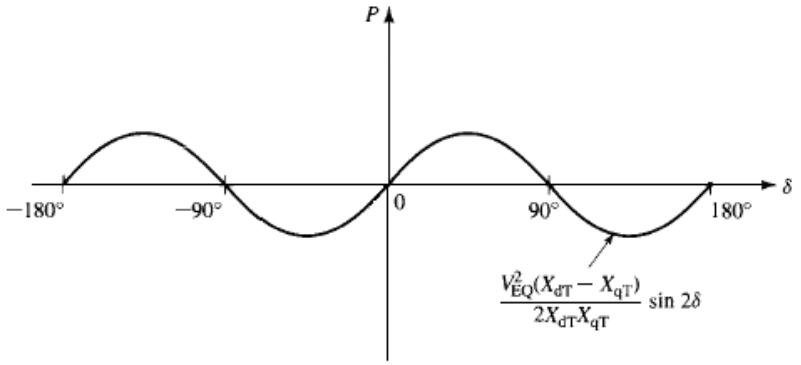
$$P = \frac{E_{af}.V_{EQ}}{X}\sin(\delta)$$

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

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

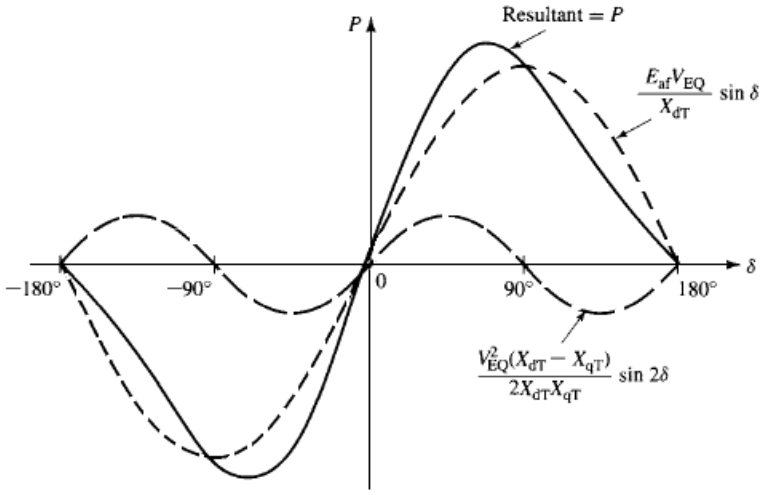


منحنی مولفه دوم توان ($\frac{V_{EQ}^2}{2}(\frac{1}{X_{qt}}-\frac{1}{X_{dt}})\sin(2\delta)$) در حالت قطب برجسته نسبت به زاویه δ به صورت زیر خواهد بود .این منحنی بیانگر تغییرات توان در حالت قطع تحریک می‌باشد .



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

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



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 هوائی ، 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 .

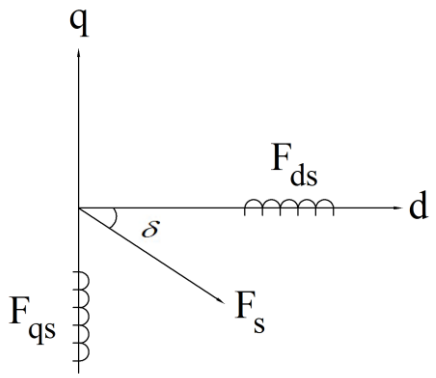
۴- δ منفی ، ناحیه کار موتوری می‌باشند ، مشخصه آنها تنها در علامت P تفاوت دارد . یعنی نواحی کار ژنراتوری و موتوری در صورت ناچیز بودن اثرات مقاومتی یکسان است .در گستره‌ای که شیب مشخصه زاویه توان مثبت است ، عملکرد حالت ماندگار پایدار وجود دارد . در واقع ماشین‌های سنکرون قطب برجسته به پایداری شبکه کمک می‌کند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

۱- Reluctance Torque

تبدیل به متغییرهای محور مستقیم و محور متعامد

در مباحث قبلی ، بیان نمودیم که پارامترهای آرمیچر ماشین سنکرون به دو مولفه چرخان ، یکی همراستا با محور سیم‌پیچ میدان (مولفه محور مستقیم d) و دیگری عمود بر محور سیم‌پیچ میدان (مولفه محور متعامد q) تقسیم نمودیم تا تحلیل ماشین قطب برجسته به دلیل داشتن رلوکتانس متغییر در فاصله هوایی ساده‌تر گردد . بدلیل اینکه کمیت‌های تبدیل یافته به همراه روتور می‌چرخند ، بنابراین مسیرهای مغناطیسی ثابتی را می‌بینند .

نیرومحرکه مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر را می‌توان بر روی محورهای مستقیم و متعامد تجزیه نمود . همچنین می‌توان آنها را به صورت دو سیم‌پیچ بر روی محورهای d و q فرض نمود .



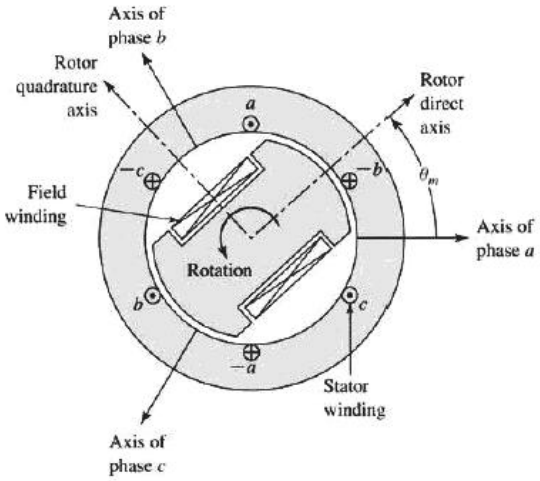
$$I_{ds}.N = F_{ds}$$
$$I_{qs}.N = F_{qs}$$

روتور بوسیله یک ولتاژ dc تغذیه می‌گردد و با سرعت سنکرون می‌چرخد . پس جریان‌های بالا dc هستند. پس تا این مرحله تبدیلی اتفاق افتاده است و جریان‌های dc روتور به جریان‌های ac تبدیل شده‌اند و یا بلعکس . با توجه به اینکه در حالت ac سه جریان داریم ولی در اینجا دو جریان بوجود آمده ، پس برای بالانسی و تعادل بین جریان‌ها یک جریان I_0 که در شرایط تعادل برابر با صفر است تعریف می‌نماییم .

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

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

نیکل ، پارک و همکارانش در آمریکا گرفته شده است . خود تبدیل که تبدیل dq0 نامیده می‌شود را می‌توان بر حسب زاویه الکتریکی θ_{me} بین محور مستقیم روتور و محور فاز a استاتور معرفی کـرد . ایـن زاویـه در شکل زیر نشان داده شده است .



با تعریف s به عنوان یک کمیت از استاتور ، می‌توان 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 زیرنویس‌های d و q به ترتیب محور مستقیم و محور متعامد را نشـان می‌دهند . یک مولفه سوم نیز که مولفه ترتیب صفر نامیده و زیرنویس o مشخص می‌شود نیـز وجـود دارد . این مولفه به این خاطر است که تبدیل یکتایی از سه کمیت سه فاز استاتور بدسـت آیـد . ایـــن مولفـه بـا

مولفه‌هایی از جریان آرمیچر که شار خالصی در شکاف هوایی بوجـود نمـی‌آورنـد ، و بنـابراین گـذر شـار خالصشان در مدار روتور صفر است ، متناظر است .در شرایط متعادل سه فاز این مولفه دارای مقـدار صـفر می‌باشد . **همواره تبدیل dq0 به مقادیر لحظه‌ای اعمال می‌شود نه به مقادیر موثر** . در این تبدیلات تـوان در طرفین برابر است لذا به آنها ماتریس‌های ارتوگنال گویند (توان ثابت)

روابط ماشین سنکرون بر اساس تبدیل dq0

همانطور که قبلا 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

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

القاکنایی متقابل استاتور – استاتور

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

القاکنایی متقابل استاتور – روتور

$$\ell_{af}=\ell_{fa}=L_{mf}.\cos\theta_{me}$$
$$\ell_{bf}=\ell_{fb}=L_{mf}.\cos(\theta_{me}-120)$$
$$\ell_{cf}=\ell_{fc}=L_{mf}.\cos(\theta_{me}+120)$$

در ماشین‌های قطب برجسته اثرات برجستگی قطب باعث می‌شود که ضرایب خودالقایی و القاکنایی استاتور با تغییر موقعیت روتور تغییر کند . به عبارت دیگر پرمه‌آنس 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 :

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

القاکنایی 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 .

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

القاکنایی متقابل استاتور – روتور

$$\ell_{af} = \ell_{fa} = L_{mf}.\cos\theta_{me}$$
$$\ell_{bf} = \ell_{fb} = L_{mf}.\cos(\theta_{me} - 120)$$
$$\ell_{cf} = \ell_{fc} = L_{mf}.\cos(\theta_{me} + 120)$$

با مقایسه دو حالت ، دیده می‌شود که ضرایب خودالقایی و القاکنایی 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 ۳۶۰ 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 القاکنایی 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.

$$\lambda_d = L_d.i_d + L_{mf}.i_f$$
$$\lambda_q = L_q.i_q$$

$$\lambda_0 = L_0 . i_0$$
$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{mf} . i_d + L_{ff} . i_f$$

در این معادلات ضرایب خودالقایی L_d و L_q و همچنین ضریب خودالقایی L_0 از روابـــط زیـر بدسـت می‌آیند.

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{aa_0} + L_g)$$
$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{aa_0} - L_g)$$
$$L_0 = L_{al}$$

راکتانس‌های 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 راکتانس‌های محورهای متعامد و مستقیم می‌باشند که برای هر دو محور بدلیل داشتن تعداد دور سیم‌پیچ یکسان برابر است .

نکته قابل توجه این است که ، شارها و جریان‌های تبدیل شده دیگر تابعی از موقعیت روتور نیستند ، و این یکی از ویژگی‌های 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 می‌شوند .

$$V_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{me} . \lambda_q$$
$$V_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{me} . \lambda_d$$
$$V_f = R_f . i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$
$$V_0 = R_f . i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}$$

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 :

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

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 .