دانشگاه فنی و حرفه ای

دانشگاه فنی و حرفه ای خراسان شمالی

آموزشکده فنی و حرفه ای پسران شیروان

برنامه درسی جلسه سوم: ماشین های الکتریکی ۳ (کارشناسی برق)

موضوع: اصول اساسی ماشین های الکتریکی - گشتاور

گردآورنده: مسعود ناظری پور

برنامه درسی جلسه چهارم

موضوع مبحث گشتاور مقاومتی - نیروهای محرکه القایی تولید ماشین های الکتریکی

گردآورنده: مسعود ناظری پور

اسفند ۱۳۹۸

فصل سوم

اصول اساسی ماشینهای الکتریکی گردان

اصول اساسی که در فصل دوّم در توضیح عملکرد مبّدل‌های انرژی الکترومکانیکی ذکر شدند در مورد ماشین‌های الکتریکی گردان نیز بخوبی صادق اند. در این فصل هدف ارائه توضیحاتی کلّی در مورد عبارت گشتاور الکترومغناطیسی و emf تولید شده در ماشین‌های الکتریکی گردان و استفاده از اصول اساسی فصل دوّم می‌باشد. عبارات اصلی گشتاور و emf را می توان هم برای ماشین‌های dc و هم برای ماشین‌های ac مورد استفاده قرار داد زیرا اصول عملکرد این ماشین‌ها یکسان است. در این فصل ساختمان انواع ماشین‌های الکتریکی گردان نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوانیم عبارت کلّی گشتاور و emf را با شرایط ساختمانی خاص هر ماشین تطبیق دهیم. در ابتدا مجدداً تاکید می‌شود که اصول عملکرد ماشین‌های ac و dc یکسان است و اختلاف آنها فقط به شکل ساختمان آنها برمی‌گردد. شکل نهائی روابط مربوط به گشتاور و emf در ماشین‌های الکتریکی ac و dc فقط به این دلیل متفاوت است که جزئیات ساختمانی این ماشین‌ها با یکدیگر فرق می‌کند.

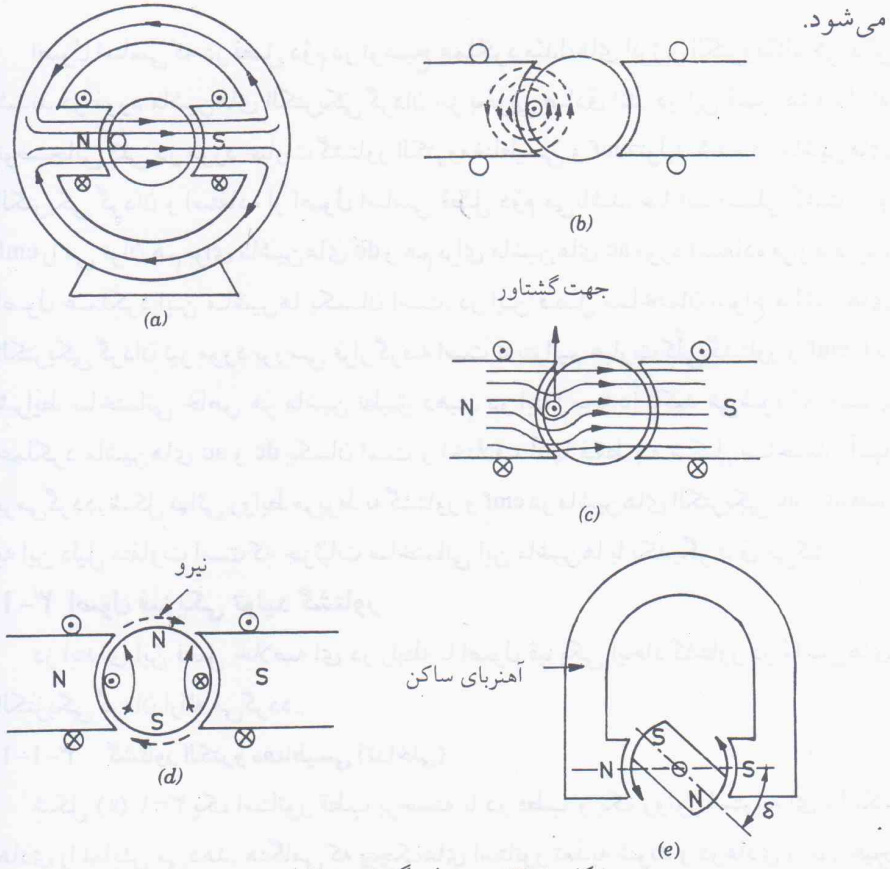
۳-۱ اصول فیزیکی تولید گشتاور

در ابتدای این فصل خلاصه ای در رابطه با اصول فیزیکی ایجاد گشتاور در ماشین‌های الکتریکی گردان ارائه می‌گردد.

۳-۱-۱ گشتاور الکترو مغناطیسی (تداخلی)

شکل (a) ۳-۱ یک استاتور قطب برجسته با دو قطب و یک روتور استوانه ای با یک هادی را نمایش می‌دهد. هنگامی که پیچک‌های استاتور تغذیه شوند و درهادی روتور هیچ جریانی وجود ندارد شار مغناطیسی استاتور در مسیری که درشکل (a) ۳-۱ نشان داده شده است ایجاد می‌شود. اگرهادی روتور حامل جریانی باشد که در شکل جهت آنرا با قرار دادن یک نقطه بطرف خارج صفحه نشان داده ایم و در پیچک استاتور نیز هیچ

جریانی وجود نداشته باشد میدان مغناطیسی مطابق شکل (b)۱-۳ ایجاد می‌شود. در صورتیکه پیچک‌های استاتور و هادی روتور هر دو حامل جریان باشند شار ایجاد شده بوسیلهٔ جریان روتور با شار تولیدی استاتور تداخل کرده و توزیع شار مغناطیسی منتجه (برآیند) بصورت نشان داده شده در شکل (c)۱-۳ خواهد شد. از آنجائیکه خطوط شار مغناطیسی مانند رشته‌های لاستیکی تحت کشش عمل می‌کنند، نیروئی بسمت بالا برهادی روتور وارد می‌شود. گشتاور راستگردی که به این ترتیب در نتیجهٔ تداخل میدان‌های مغناطیسی استاتور وروتور تولید شده، گشتاور الکترومغناطیسی یا تداخلی (تقابلی) نامیده می‌شود.



شکل ۱-۳ نحوه تولید گشتاور تداخلی

حال فرض کنید روتور دارای یک پیچک حامل جریان باشد. جهت این جریان را در شکل (d)۱-۳ با قرار دادن نقطه درهادی قرار گرفته در زیر قطب N استاتور و ضربدر در

هادی زیر قطب S استاتور نشان داده ایم. وجود این جریان منجر به ایجاد شار روتور و در نتیجه ایجاد دو قطب مغناطیسی روی روتور می‌شود. قطب S استاتور، قطب N روتور را جذب و قطب S آنرا دفع می‌کند که نتیجتاً گشتاور راستگرد ایجاد می‌کند. به همین ترتیب قطب N استاتور، قطب S روتور را جذب و قطب N روتور را دفع می‌کند که مجدداً گشتاور راستگرد ایجاد می‌کند. گشتاور برآیندی که به این ترتیب ایجاد می‌شود گشتاور الکترومغناطیسی یا تداخلی نامیده می‌شود. [شکل (d) ۱-۳] مرور کوتاهی بر بخش (۱-۴-۲) توضیحات ارائه شده را تکمیل می‌کند.

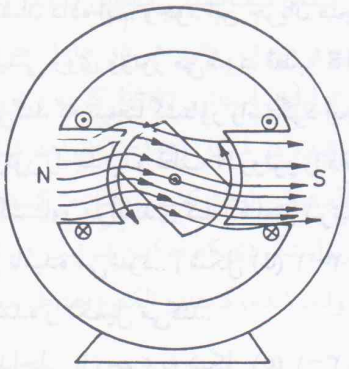
مفهوم فیزیکی گشتاور تداخلی با رجوع به شکل (e) ۱-۳ روشن تر می‌گردد. در این شکل یک قطعه مغناطیس دائم که می تواند آزادانه حول محوری دوران کند در میدان مغناطیسی یک آهنربای ساکن قرار گرفته است. تمایل دو میدان مغناطیسی مذکور برای همجهت شدن موجب ایجاد گشتاور تداخلی می‌شود. زاویهٔ بین محورهای میدان‌های مغناطیسی استاتور و روتور زاویهٔ گشتاور δ نامیده می‌شود. [شکل (e) ۱-۳]. توجّه کنید که در شکل (d) ۱-۳ زاویهٔ گشتاور δ برابر ۹۰° است. اندازهٔ گشتاور الکترومغناطیسی یا تداخلی در تمام ماشین‌های گردان متناسب است با:

$$T_e \propto (\text{شدت میدان استاتور}) \times (\text{شدت میدان روتور}) \times \sin\delta$$

۳-۱-۲ گشتاور مقاومت مغناطیسی (یا گشتاور همسوئی)

در شکل (a) ۱-۳ مسیر شار مغناطیسی هنگامی که پیچک‌های استاتور حامل جریان باشند نشان داده شده است. اگر یک روتور فرومغناطیسی را بصورت مناسبی در این میدان مغناطیسی قرار دهیم مسیر شار استاتور همانطوریکه در شکل ۲-۳ نشان داده شده است بطور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر قرار می گیرد.

از آنجاکه شار مغناطیسی تمایل به مسیری با حداقل مقاومت مغناطیسی یا بعبارت دیگر کوتاهترین مسیر ممکن دارد، روتور تحت تأثیر گشتاور چپ گرد قرار می‌گیرد که گشتاور مقاومت مغناطیسی یا همسوئی نامیده می‌شود. هنگامی که محور طولی روتور با محور قطب‌های استاتور همسو شود اندازهٔ گشتاور مقاومت مغناطیسی به صفر می رسد. توجّه کنید که گشتاور مقاومت مغناطیسی یا همسوئی فقط هنگامی می تواند وجود داشته باشد که مقاومت مغناطیسی دیده شده توسط شار عمل کننده با حرکت روتور تغییر کند. بخش ۳-۲ را ببینید.



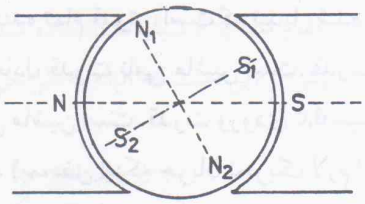
شکل ۲-۳ تولید گشتاور مقاومت مغناطیسی

مثال ۳.۱

یک ماشین گردان با استاتور ۲ قطبی و روتور ۴ قطبی مفروض است. ثابت کنید که گشتاور الکترومغناطیسی برآیند در این ماشین برابر صفر است.

حل: در شکل ۳-۳ یک ماشین الکتریکی با استاتور ۲ قطبی و روتور ۴ قطبی نشان داده شده است. قطب‌های روتور دارای توزیع فضائی یکنواختی هستند بدین معنی که هر دو قطب N و S، ۹۰° مکانیکی یا ۱۸۰° الکتریکی فاصلهٔ فضائی دارند. حال ابتدا قطب‌های N_1 و N_2 روتور را در نظر می گیریم. از آنجائیکه زاویهٔ گشتاور بین N_1 و N با زاویهٔ گشتاور بین N_2 و S برابر است، نیروی دافعهٔ (راستگرد) بین N و N_1 با نیروی جاذبهٔ (چپ گرد) بین N_2 و S خنثی می‌شود. به همین ترتیب زاویهٔ گشتاور بین N_1 و S با زاویهٔ گشتاور بین N_2 و N برابر است و لذا نیروی جاذبهٔ (راستگرد) بین N_1 و S با نیروی دافعهٔ (چپ گرد) بین N_2 و N خنثی می‌شود. بنابراین گشتاور الکترومغناطیسی خالص که از قطب‌های N_1 و N_2 روتور حاصل می‌شود برابر صفر است.

حال قطب‌های S_1 و S_2 روتور را در نظر می گیریم. ملاحظه می‌شود که زاویهٔ گشتاور بین N و S_1 با زاویهٔ گشتاور بین S و S_2 برابر است پس نیروی جاذبهٔ (چپ گرد) بین N و S_1 با نیروی دافعهٔ (راست گرد) بین S و S_2 خنثی می‌شود. به همین ترتیب نیروی جاذبهٔ (راستگرد) بین N و S_2 با نیروی دافعهٔ (چپ گرد) بین S و S_1 خنثی می‌شود و در نتیجه، گشتاور الکترومغناطیسی خالص که از قطب‌های S_1 و S_2 روتور حاصل می‌شود نیز برابر با صفر است.



شکل ۳-۳ مربوط به مثال ۱-۳

به این ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی برآیند در یک ماشین با استاتور ۲ قطبی و روتور ۴ قطبی برابر صفر است و در نتیجه در کلیهٔ ماشین‌های الکتریکی گردان لازم است تعداد قطب‌های روتور با تعداد قطب‌های استاتور برابر باشد تا ماشین قادر به تولید گشتاور الکترومغناطیسی باشد.

۳-۲ شکل ساختمانی ماشین‌های الکتریکی گردان

تمام ماشین‌های الکتریکی گردان اعّم از آنهایی که برای تولید انرژی بکار گرفته می‌شوند یا آنهایی که در انواع محرکه الکتریکی یا سیستمهای کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند، از نقطه نظر ساختمانی دارای قسمت‌های ضروری مشترکی هستند. بعنوان مثال هر ماشین الکتریکی گردان بایستی دارای (۱) استاتور (قسمت ساکن) (۲) روتور (قسمت گردان) (۳) فاصلهٔ هوائی حد فاصل روتور و استاتور و (۴) محور، یاطاقان، پایه و غیره باشد. علاوه بر اینها هر ماشین الکتریکی معمولاً دارای:

(الف) سیم پیچ *میدان* یا تحریک که شار عمل کننده را تولید می‌کند و

(ب) سیم پیچ *آرمیچر* که بوسیله شار عمل کننده در آن emf القاء می‌کند، می‌باشد.

با بار شدن ماشین جریانی که در سیم پیچی تغییر می‌کند، جریان بار نامیده می‌شود. جریانی که تنها شار مغناطیسی عمل کننده ماشین را تولید می‌کند که با بار ماشین تغییر نمی‌کند، *جریان مغناطیس کننده*، جریان تحریک یا *جریان میدان* نامیده می‌شود. سیم پیچی که تنها جریان بار را حمل می‌کند سیم پیچی *آرمیچر* خوانده می‌شود. سیم پیچی که تنها جریان تحریک را حمل می‌کند سیم پیچی تحریک نام دارد. جریان سیم پیچی تحریک همیشه d.c است. سیم پیچی که هر دو جریان تحریک و جریان بار را تامین می‌کند سیم پیچی *اولیه* وسیله تبدیل انرژی نام می گیرد. معمولاً به سیم پیچی اولیه قدرت وارد می‌شود. سیم پیچی که قدرت از آن گرفته می‌شود سیم پیچی *ثانویه* خواهد بود.

سیم پیچی آرمیچر تامین کننده تمام قدرتی است که تبدیل شده و یا انتقال می یابد. قدرت نامی سیم پیچی آرمیچر معادل قدرت نامی ماشین است. قدرت نامی سیم پیچی تحریک حدود $\frac{1}{2}$ تا ۲٪ قدرت نامی ماشین است. قدرت ورودی d.c سیم پیچی تحریک به صورت تلفات I^2R در آن درمی آید (بمحض اینکه جریان تحریک لازم ایجاد شد).

سیم پیچهای آرمیچر، هم در ماشین‌های dc و هم در ماشین‌های ac فقط با جریان متناوب کار می‌کنند. به همین دلیل آرمیچر تمام ماشین‌های گردان را مورق (ورقه ورقه) می‌سازند تا تلفات جریان‌های گردابی (فوکو) در آنها کاهش یابد. بعلاوه تقریباً تمام ماشین‌های گردان دارای یک تعداد زوج قطب‌های N و S می‌باشند (که ساختمان چند قطبی[1] نامیده می‌شود.) بدیهی است در صورتیکه بخواهیم به روتور توانی بدهیم یا از آن توانی دریافت کنیم به اتصالات لغزان احتیاج داریم. تمام انواع ماشین‌های گردان بزرگ دارای مجاری تهویهٔ شعاعی و محوری هستند تا عمل خنک سازی در آنها تسهیل شود.

در این بخش جنبه‌های مهم ساختمانی مربوط به انواع عمومی تر ماشین‌های گردان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۳ ماشین‌های القائی چند فاز

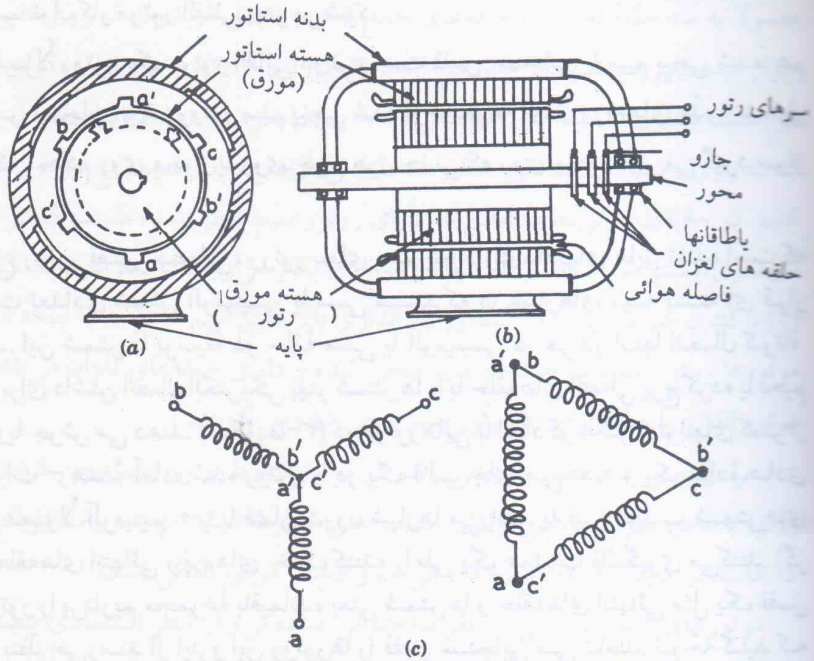
هرچند ماشین‌های القائی چند فاز می توانند بصورت ژنراتوری کار کنند ولی عملکرد ژنراتورهای القائی در اکثر کاربردها رضایت بخش نیست. از اینرو در این مبحث توجّه ما اساساً به موتورهای القائی چند فاز معطوف است.

استاتور: استاتور یک موتور القائی شامل بدنه، هسته، سیم پیچ توزیع شده چند فاز (۳ فاز یا ۲ فاز)، دو درپوش، یاطاقان‌ها وغیره است. هستهٔ استاتور عبارتست از مجموعه ای از ورقه‌های فولادی استوانه ای شکل که در سطح درونی این مجموعه شیار دار شده است تا سیم پیچ سه فاز استاتور در این شیارها قرار داده شود. ابعاد هستهٔ استاتور بگونه ای است که بخوبی در بدنهٔ چدنی استاتور محکم می‌شود. بدنهٔ استاتور و دو درپوش چدنی که در طرفین آن قرار می‌گیرند صرفاً تکیه گاهی مکانیکی برای هستهٔ استاتور فراهم می‌کنند و بعنوان بخشی از مسیر عبور شار استاتور طرّاحی نشده‌اند.

قسمت‌های اصلی یک موتور القائی سه فاز در شکلهای (a) ۴-۳ و (b) ۴-۳ نمایش

1- Hetropolar

داده شده‌اند. برای سادگی، استاتور تنها با ۶ شیار نشان داده شده است هر چند در عمل تعداد شیارهای استاتور بسیار بیش از این است که البتّه به طرّاحی سیم پیچ سه فاز استاتور بستگی دارد.



شکل ۴-۳ ویژگی‌های ساختمانی موتورهای القائی چند فاز

سه پیچک (کلاف) aa'، bb' و cc' بترتیب نمایندهٔ فازهای a، b و c هستند. این سیم پیچهای با فواصل منظّم ۱۲۰° الکتریکی از یکدیگر در فضا توزیع شده‌اند و همانطور که در شکل (c) ۴-۳ نشان داده شده است می توانند دارای اتصّال ستاره یا مثلث باشند.

اکثر اوقات ۶ سر انتهائی مربوط به سیم پیچهای سه فاز استاتور را از طریق یک جعبه ترمینال‌که روی بدنهٔ‌استاتور قرارمی‌گیردبه‌خارج‌ازبدنه‌انتقال‌می‌دهند.این ۶ترمینال‌رابصورت مناسبی علامتگذاری می‌کنند تا سرهای‌ابتداوانتهای هر کدام از سیم پیچها مشخص شوند.

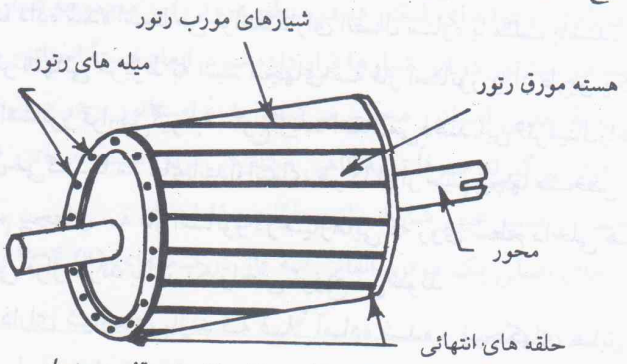
توجّه کنید که سیم پیچهای سه فاز استاتور در شیارهایی که روی سطح داخلی هسته در مجاورت فاصلهٔ هوائی قرار دارند بطور یکنواختی توزیع می‌شوند.

موتورهای بزرگ دارای شیارهای بازند که قبلاً آماده شده و پیچکهای عایق شده می‌تواند براحتی در شیارهای باز قرار داده شوند. موتورهای القائی کوچک که از شیارهای

نیمه بسته استفاده می‌کنند تا طول فاصله هوائی موثر بین استاتور و رتور کاهش یابد.
فاصله هوائی بین استاتور و رتور حتی المقدور باید کوچک باشد که در نتیجه:
(۱) شار پراکندگی بین استاتور و رتور کاهش می‌یابد.
(۲) ضریب توان کار موتور القائی بهتر می‌شود.

روتور: معمولاً روتور یک موتور القائی دو نوع است قفس سنجابی یا سیم پیچی شده. هم روتور قفس سنجابی و هم روتور سیم پیچی شده از مجموعه ای از ورقه‌های مدّور تشکیل شده‌اند که محکم روی محور یا روی چرخ هرز چدنی که روی محور قرار می گیرد سوار شده‌اند.

در نوع روتور قفس سنجابی، روتور بجای سیم پیچ دارای‌هادیهای عایق نشده است که در حقیقت تعدادی شمش آلومینیمی یا مسی هستند که در شیارهای نیمه بسته ای قرار گرفته اند. این شمش‌ها بوسیلهٔ دو حلقهٔ مسی یا آلومینیمی در هر دو انتها اتصال کوتاه شده‌اند. برای داشتن اتصال الکتریکی بهتر شمش‌ها را با حلقه‌های انتهائی پرچ کرده یا لحیم می‌کنند ویا جوش می دهند. (شکل ۵-۳) در موتورهایی با ابعاد کوچکتر - توانهای کمتر از ۴۰ کیلووات - هستهٔ آماده شده روتور را در یک قالب جای می‌دهند و یک مادهٔ هادی مذاب - معمولاً آلومینیم - را با فشار بدرون شیارها می‌رانند. به این ترتیب شمش‌های روتور، حلقه‌های انتهائی و پره‌های خنک کننده را طی یک عملیات قالبگیری می‌کنند. اگر هستهٔ روتور را برداریم مجموعهٔ باقیمانده یعنی شمش‌ها و حلقه‌های انتهائی مثل یک قفس سنجابی بنظر می‌رسند از اینرو این روتورها را قفس سنجابی می نامند. توجّه کنید که شمش‌های روتور در حقیقت یک سیم پیچ توزیع شدهٔ یکنواخت در شیارهای روتور بوجود می‌آورند. بدیهی است از آنجا که شمش‌های روتور بوسیلهٔ دو حلقهٔ انتهائی اتصال کوتاه شده‌اند هیچ مقاومت خارجی را نمی‌توان وارد مدار روتور یک موتور قفس سنجابی کرد.



شکل ۵-۳ جزئیات ساختمان رتور قفس سنجابی

در روتورهای سیم پیچی شده، سیم پیچ عایق شده‌ای شبیه به آنچه که دراستاتور مورد استفاده قرار گرفت در شیارهای روتور جای می‌گیرد. سیم پیچ روتور بصورت یکنواخت توزیع شده و معمولاً دارای اتصال ستاره می‌باشد. سه سر آزاد سیم پیچ سه فاز روتور معمولاً به سه *حلقهٔ لغزان* (یا *حلقه‌های جمع کننده*) متصل می‌شوند که روی محور ماشین سوار شده ولی نسبت به آن عایق می‌باشند (شکل (b) ۴-۳). وجود جاروبکهای کربنی که در اتصال فشاری با *حلقه‌های لغزان* می‌باشند به ما اجازه می‌دهد که برای کنترل سرعت و گشتاور راه اندازی ماشین مقاومت‌های خارجی را با سیم پیچ روتور آن سری کنیم. در حقیقت موتورهای القائی که دارای روتور سیم پیچی شده هستند گرانتر بوده و به نگهداری بیشتر نیاز دارند و لذا تنها در مواردی بکار می‌روند که بخواهیم بار مکانیکی را (۱) با کنترل سرعت یا (۲) با گشتاور راه اندازی بالا تأمین کنیم. با توجه به اینکه در اینگونه موتورها روتور بصورت چند فاز سیم پیچی شده و دارای حلقه‌های لغزان می‌باشد به آنها موتور القائی با حلقه لغزان یا روتور سیم پیچی شده می گویند.

هم در موتورهای قفس سنجابی و هم در موتورهای با روتور سیم پیچی شده شیارهای روتور با محور طولی ماشین موازی نیستند یعنی شیارها نسبت به محور ماشین کج شده‌اند که علّت این مطلب عملکرد نرم تر و بی سرو صداتر موتور القائی است.

موتورهای قفس سنجابی از نظر ساختمانی ساده تر و از نظر اقتصادی بصرفه تر از موتورهای با روتور سیم پیچی شده هستند. بعلاوه نوع قفس سنجابی نسبت به نوع سیم پیچی شده محکمتر است و به تعمیرات کمتری احتیاج دارد زیرا فاقد حلقه‌های لغزان و جاروبکهای کربنی است. یک موتور القائی چند فاز انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را تنها از یک منبع ولتاژ متناوب دریافت می‌کند و از اینرو ماشین با یک منبع تحریک نامیده می‌شود. دراینگونه موتورهاسیم پیچ میدان روی استاتورو سیم پیچ آرمیچر روی روتور قرار می گیرد.

سیم پیچ استاتور که به منبع تغذیه متصل می‌شود از نظر مشابهت با سیم پیچ اولیهٔ ترانسفورماتور، سیم پیچ اولیه نامیده می‌شود. سیم پیچ روتور نیز که انرژی را توسط شار متقابل از استاتور دریافت می‌کند - مشابه با آنچه که در یک ترانسفورماتور اتفاق می افتد - سیم پیچ ثانویه نامیده می‌شود. بعبارت دیگر موتور القائی را می توان بصورت یک ترانسفورماتور در نظر گرفت که در آن توان الکتریکی از استاتور به روتور انتقال می یابد که بر خلاف ترانسفورماتور این انتقال با تغییر فرکانس همراه است واز روتور نیز توان مکانیکی

به خارج انتقال پیدا می‌کند. بخش ۱-۶ را ببینید.

در این موتورها از آنجا که انرژی بواسطهٔ القاء از استاتور به روتور انتقال پیدا می‌کند (یعنی عمل ترانسفورمری) نام موتور القائی بر آنها گذاشته شده است. به این ترتیب موتور بنام رتور مورد استفاده خوانده می‌شود یعنی موتور قفس سنجابی یا رتور سیم پیچی شده.

۲-۲-۳ ماشین‌های سنکرون

در ماشین‌های سنکرون، سیم پیچ آرمیچر تولید کنندهٔ توان ac (در ژنراتورهای سنکرون) و دریافت کنندهٔ توان ac (در موتورهای سنکرون) می‌باشد در حالیکه سیم پیچ میدان همواره از طریق یک منبع dc تغذیه می‌شود. بعبارت دیگر، ماشین‌های سنکرون ماشین هایی دو تحریکه برای تبدیل انرژی هستند. تولید emf بطور کلی وابسته به حرکت نسبی شار میدان و سیم پیچ آرمیچر است. با توجّه به این موضوع، یک *ژنراتور* ac، *آلترناتور* یا *ژنراتور* سنکرون باید دارای قطب‌های میدان گردان و آرمیچر ساکن و یا باید دارای آرمیچر گردان و قطب‌های میدان ساکن باشد. معهذا، ماشین‌های سنکرون بزرگ بدون استثناء با سیم پیچ آرمیچر پر قدرت روی استاتور و سیم پیچ میدان کم قدرت روی روتور ساخته می‌شوند. هر چند ماشین‌های سنکرون کوچک ممکن است با ترتیب معکوس آنچه که گفته شد ساخته شوند.

مزایای قرار دادن سیم پیچ میدان روی روتور و سیم پیچ آرمیچر روی استاتور عبارتند از:

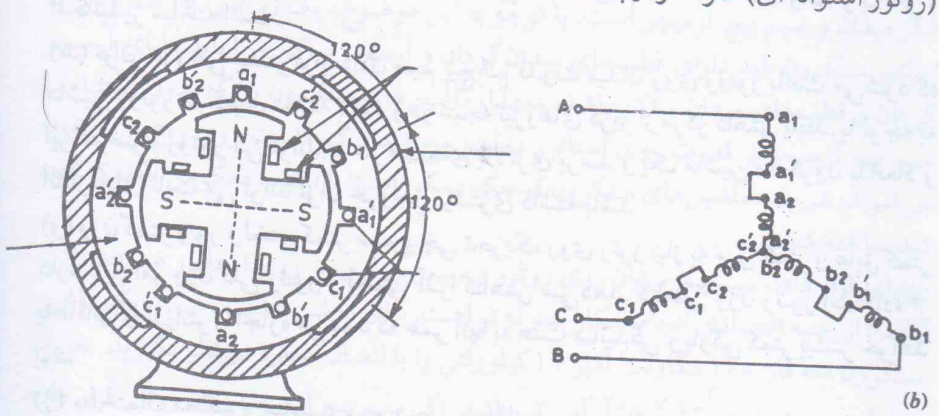
(الف) از جنبه اقتصادی انجام اینکار بصرفه تر است. برای روشن شدن موضوع، یک ماشین سنکرون سه فاز ۲۰۰ مگاولت آمپر ۱۱ کیلوولتی را با اتصال ستاره در نظر بگیرید. جریان خط آمپر $= \frac{۲۰۰ \times ۱۰^{۳}}{\sqrt{۳} \times ۱۱} = ۱۰۵۰۰$ آمپر می‌باشد. اگر سیم پیچ آرمیچر روی روتور قرار داده شود، سه حلقه لغزان مورد احتیاج خواهد بود که هرکدام قابلیت عبور دادن ۱۰۵۰۰ آمپر را داشته باشند. علاوه براین هر حلقهٔ لغزان را باید برای ولتاژ $\frac{۱۱}{\sqrt{۳}} = ۶/۳۵$ کیلوولتی نسبت به محور بخوبی عایق بندی کرد. همچنین نقطهٔ ستارهٔ سیم پیچ نیز باید به یک حلقهٔ لغزان چهارمی متصل شود تابه یک صفحهٔ فلزی که از طریق یک مقاومت زمین شده است وصل گردد.

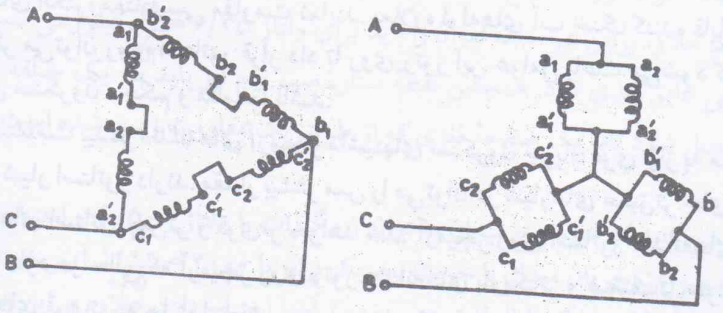
حال فرض کنید که سیم پیچ میدان به توان ۱ مگاوات با ولتاژ ۵۰۰ ولت احتیاج داشته باشد. در اینصورت جریان میدان یا جریان تحریک برابر با $\frac{۱۰۰۰}{۰/۵} = ۲۰۰۰$ آمپر خواهد بود که به دو حلقهٔ لغزان، هریک با ظرفیت عبور ۲۰۰۰ آمپر احتیاج دارد. علاوه بر این هر حلقهٔ لغزان باید فقط برای ولتاژ ۵۰۰ ولتی نسبت به محور عایق بندی شود. مطالب گفته شده نشان می دهند که قرار دادن سیم پیچ میدان روی روتور ارزان تر از قرار دادن سیم پیچ آرمیچر روی آن تمام می‌شود. به این ترتیب ساختن ماشین سنکرون با سیم پیچ آرمیچر روی

استاتور و سیم پیچ میدان روی روتور بسیار اقتصادی تر است.
(ب) *بازده* بیشتر در ماشین سنکرون با قرار گرفتن سیم پیچی آرمیچر روی استاتور و سیم پیچی تحریک روی رتور تنها به دو حلقه لغزان نیاز هست. بنابراین تلفات حلقه‌های لغزان کمتر و بازده ماشین سنکرون بیشتر خواهد بود.
(ج) *عایق بندی* بهتر سیم پیچهای ساکن آرمیچر را درولتاژهای بالا می توان بطور رضایتبخشی عایق بندی نمود که این موضوع به ماشین امکان داشتن ولتاژهای بالا را می‌دهد که بعنوان مثال می توان از ماشین‌های سنکرون ۳۳کیلوولت یاد کرد.
(د) خنک کردن بهتر سیم پیچ ساکن آرمیچر را با بازدهی بیشتری می توان خنک کرد که همین موضوع ساختن ماشین‌های سنکرون بزرگ با توانهای ۱۰۰۰ مگاوات و بالاتر را امکانپذیر ساخته است.
(هـ) *توان* خروجی بیشتر قرار دادن سیم پیچ کم قدرت میدان روی روتور باعث می‌شود که ماشین روتور سبکتری داشته باشد و در نتیجه نیروهای گریز از مرکز کاهش یابند. با توجّه به این موضوع روتور می تواند به سرعت‌های بالاتری برسد و یک ماشین سنکرون با ابعاد و اندازه‌های ثابت می تواند توان خروجی بیشتری داشته باشد.
(و) *وزن* کمتر رتور و *لختی* کمتر سیم پیچی تحریک روی رتور نیاز به مس کمتر و عایق کمتر دارد. این امر وزن کلی رتور و لختی آنرا کاهش می‌دهد. کاهش وزن رتور استفاده از یاطاقانهای ارزانتر را اجازه می‌دهد که عمر آنها به علت سائیدگی و پارگی کمتر بیشتر خواهد بود.
(ژ) *ساختمان* محکم و *مناسب* سیم پیچی سه فاز آرمیچر واقع در شیارهای استاتور که می‌تواند فشار قوی، جریان قوی باشد می‌تواند طوری بسته شوند که بسادگی در مقابل نیروهای الکترومغناطیسی مقاومت نمایند. بعلاوه لوله‌های آب خنک کننده قابل انعطاف را ساده‌تر می‌توان روی استاتور قرار داد تا روی رتور این عوامل باعث می‌شود که ساختمان ماشین سنکرون محکم و مناسب باشد.
(ح) *استقامت* بیشتر *دندانه‌های آرمیچر* ماشینهای سنکرون جریان قوی نیاز به مس بیشتری در هر شیار استاتور دارند. مقدار بیشتر مس را می‌توان در شیارهای عمیق‌تر جای دارد و لذا دندانه‌های استاتور پهن‌تر و قوی‌تر خواهد شد. آرمیچر روی استاتور دندانه‌های پهن‌تر و قوی‌تر دارد در حالی که آرمیچر روی رتور دندانه‌های باریک‌تر و ضعیف‌تر خواهد داشت دندانه‌های قوی‌تر به علت ارتعاش سر و صدای کمتر ایجاد می‌کنند و هنگام ساخت و استفاده احتمال صدمه کمتر دارند. بنابراین سیم پیچی آرمیچر باید روی استاتور و سیم پیچی تحریک روی رتور باشد.
ماشین‌های سنکرون بسته به ساختمان هندسی روتور به دو دستهٔ تقسیم بندی می‌شوند:

(الف) *نوع قطب برجسته* و (ب) *نوع روتور استوانه‌ای* یا روتور گرد (مدّور) یا *قطب صاف*. در شکل (a) ۶-۳ یک روتور با ۴ قطب برجسته نمایش داده شده است. سیم پیچ میدان که روی قطب‌های برجسته قرار گرفته است یک سیم پیچ متمرکز است. در نوع روتور استوانه ای، سیم پیچ میدان یک سیم پیچ توزیع شده است که در شیارهای روتور جای می گیرد. شکل (b) ۷-۳ را ببینید.

تفاوت دیگری که بین این دو نوع وجود دارد این است که ماشین سنکرون قطب برجسته دارای فاصلهٔ هوایی غیر یکنواخت است که در زیر مراکز قطب‌ها حداقل و در فاصلهٔ بین قطب‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسد. شکل (a) ۶-۳. در ماشین‌های سنکرون قطب صاف (روتور استوانه ای) صرفنظر از پهنای دهانه شیارها فاصلهٔ هوایی کاملاً یکنواخت است.





شکل ۶-۳ (a) ساختمان قطب برجسته ۴ قطب سه فاز (b) اتصالات ستاره و مثلث سری (c) اتصال ستاره موازی

هم استاتور ماشین سنکرون قطب برجسته واستاتور نوع روتور استوانه‌ای هر دو شبیه به

استاتور موتور القائی می‌باشند. به این ترتیب استاتور یک ماشین سنکرون نیز شامل یک بدنهٔ چدنی، یک هستهٔ استوانه ای مورق که بصورت یکنواخت شیار دار شده است، یک سیم پیچ چند فاز توزیع شده که در شیارهای استاتور جای می گیرد، یاطاقان‌ها، پایه وغیره است، شکل (a) ۶-۳. مانند موتور القائی چند فاز، بدنه استاتور و درپوش‌ها صرفاً تکیه گاهی مکانیکی برای هستهٔ استاتور بشمار می‌روند و برای عبور شار مغناطیسی طّراحی نشده‌اند.

مولدهای سنکرون بخاطر مزایای تولید، انتقال و مصرف قدرت سه فاز معمولاً سه فاز ساخته می‌شود. با این حال مولدهای یکفاز نیز در موارد خاص ساخته می‌شوند. برای تولید ولتاژ سه فاز حداقل سه پیچک یکی برای هر فاز بفاصله ۱۲۰° الکتریکی از یکدیگر در فضا لازم است. در ماشین سنکرون ابتدائی شکل (a) ۶-۳ آرمیچر مجموعاً ۱۲ شیار دارد یعنی ۴ شیار در فاز، گرچه استاتور ماشین واقعی بسته به طراحی سیم پیچی سه فاز تعداد بیشتری شیار در آرمیچر دارد. در شکل (a) ۶-۳ هر فاز دارای دو پیچک است. برای مثال پیچکهای فاز a، a_1 ، a'_1 و a_2 و a'_2 می‌باشند. دو پیچک هر فاز با هم سری شده‌اند به طوریکه ولتاژهای آنها با هم جمع شود. لذا سه فاز را می توان طبق شکل (b) ۶-۳ به صورت ستاره یا مثلث وصل کرد. در این شکل سه سر (ترمینال) سیم پیچی با a_1 و b_1 و c_1 مشخص شده‌اند. دو پیچک فاز a می‌توانند موازی شوند به طوریکه a_1 و a_2 یک سر و a'_1 و a'_2 سر دیگر سیم پیچی را تشکیل دهد. به طور مشابه پیچکهای فاز b و c را می‌توان اتصال داد. اتصال موازی دو پیچک جریان هر مسیر موازی را دو برابر می‌کند این پیچکهای موازی با ۶ سر را می توان به صورت ستاره یا مثلث بست اتصال ستاره پیچکهای موازی در شکل (c) ۶-۳ نشان داده شده است.

فرکانس e.m.f تولیدی از معادله (۵-۳) برابر است با:

$$f = \frac{pN}{۱۲۰} \text{ Hz}$$

در اغلب کشورها مولدهائی که سیستم‌های قدرت را تغذیه می‌کنند فرکانس ۵۰ Hz تولید می‌کنند و لذا تعداد قطبها:

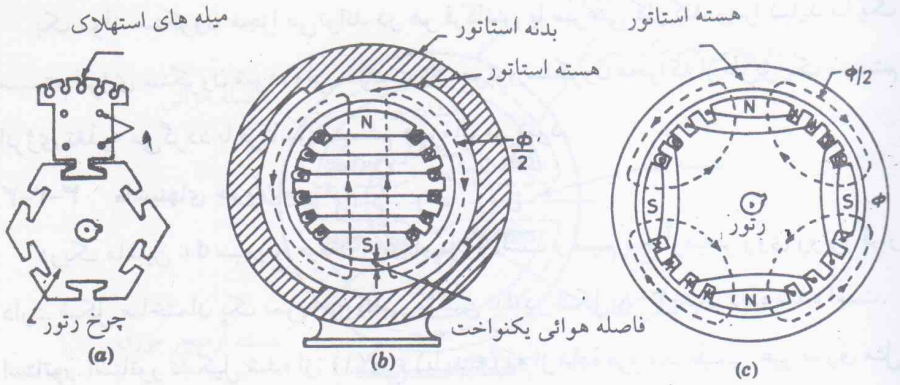
$$p = \frac{۶۰۰۰}{\text{سرعت به r.p.m N}} \qquad (۳-۱)$$

خواهد بود.

موتورهای بنزینی و توربینهای آبی در سرعتهای نسبتاً پائین بهترین کاردهی رادارند.

بنابراین دستگاههای برق متناوب که بوسیلهٔ این نوع چرخاننده‌ها بحرکت در می آید باید طبق معادله (۱-۳) تعداد زیادی قطب داشته باشند. برای جا دادن تعداد زیادی قطب، قطر روتور باید به تناسب ازدیاد قطبها زیاد شود و از نقطه نظر مکانیکی رتور قطب برجسته برای چرخاننده‌های کم سرعت مناسبترین است. ساختمان قطب برجسته روتور طبق شکل (a) ۶-۳ برای ماشینهای سنکرون نسبتاً کوچک بکار برده می‌شود. برای ماشینهای بزرگتر قطبهای برجسته و مورق به چرخ رتور پیچ شده‌اند. چرخ رتور نیز طبق شکل (a) ۷-۳ به محور خاربندی شده است. میله‌های استهلاک معمولاً در کفشک قطب‌ها قرار داده شده‌اند تا نوسانات روتور را میراکنند. کفشک قطب یک قطب برجسته طوری شکل داده شده است که یک موج سینوسی با چگالی شار شعاعی در طول فاصله هوائی بدست آید. نام تجارتی ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته *آلترناتورهای آبی* یا *مولدهای برق آبی* است.

توربینهای گازی و بخاری بهترین مشخصه عملکرد را در سرعتهای بالا دارند، بنابراین دستگاههای مولد برق متناوب که بوسیلهٔ اینها می‌چرخند باید تعداد کمتری قطب داشته باشند مثلاً ۲ یا ۴ [رابطه (۱ - ۳)]. اگر ساختمان قطب برجسته برای چنین سرعت بالائی استفاده شود ساختمان روتور ممکن است نتواند چنین نیروی گریز از مرکز بزرگ ناشی از قطب برجسته قابل را تحمل کند. بنابراین ساختمان روتور استوانه ایی از نظر مکانیکی برای چرخاننده‌های پرسرعت مناسب تر است. شکل (b) ۷-۳ یک روتور استوانه ایی را نشان می‌دهد که از یک قطعه فولاد سخت آهنگری شده تشکیل شده است. برای طول هستهٔ بزرگ، روتور از چندین قطعه فولاد سخت آهنگری شده ساخته شده که پهلو به پهلو قرار گرفته اند. شیارهای محوری تنها در بخشی از محیط روتور ایجاد شده‌اند. قطبهای اصلی تولید شده بوسیله جریان تحریک در قسمت بدون شیار سطح روتور بوجود آمده اند که در شکل (b) ۷-۳ نشان داده شده است. در این شکل جمعاً ۶ پیچک هم مرکز نشان داده شده است. شکل (c) ۷-۳ نیز رتور استوانه ای ۴ قطب را با دو پیچک هم مرکز در هر قطب نشان می‌دهد. شکل موج چگالی شار شعاعی فاصلهٔ هوائی در ماشینهای سنکرون روتور استوانه‌ای به یک موج سینوسی شبیه تر است تا در ماشین‌های قطب برجسته. ژنراتورهای سنکرون روتور استوانه ایی از نظر تجاری بنام *توربوآلترناتور* یا *توربوژنراتور* نامیده می‌شوند



شکل ۷-۳ ماشین سنکرون (a) چرخ رتور و یک ورق قطب برجسته (b) رتور استوانه ای دو قطب (c) رتور استوانه ای چهار قطب

موتورهای سنکرون. معمولاً از نوع قطب برجسته بوده و دارای همان ساختمان معمول ژنراتورهای قطب برجسته هستند. همانطور که معادله ۵-۳ نشان می‌دهد در حالت پایدار موتورهای سنکرون در سرعت ثابت کار می‌کنند. در موتورهای سنکرون قطب برجسته وظایف شمش‌های (میله‌های) میراکننده (واقع در کفش قطبها) عبارتند از میراکردن نوسانات روتور و راه اندازی موتور. (ایجاد گشتاور جهت راه اندازی)

در ماشینهای سنکرون با ابعاد بزرگ باید تمهیدات کافی جهت خنک سازی و انتقال گرمای حاصل از تلفات مختلف بکار گرفته شود. برای ماشینهای بزرگ معمولاً جریان هوای خنک، آب، هیدروژن یا هلیم مدار بسته بکار می‌رود.

یک ماشین سنکرون معمولاً به یک سیستم انرژی متصل می‌شود که بوسیلهٔ سایر مولدهای برق متناوب دیگر تغذیه می‌گردد. در یک مولد سنکرون فرکانس نیروی محرکه القایی تولیده شده به سرعت دورانی و تعداد قطبها بستگی دارد. بنابراین یک ماشین سنکرون به یک سیستم انرژی فقط وقتی فرکانس یا سرعت دورانی آن مساوی فرکانس سیستم تغذیه است می تواند متصل شود. به عبارت دیگر برای عملیات فوق سرعت دورانی یک ماشین سنکرون باید با فرکانس سیستم انرژی سنکرونیزه (همزمان) شود واین علت نامگذاری ماشین سنکرون است.

یک مولد سنکرون مجزا می‌تواند در هر فرکانس یا سرعتی کار کند زیرا نباید با یک سیستم انرژی سنکرون شود، ولی سرعت یک موتور سنکرون مجزا که از طریق یک سیستم انرژی تغذیه می‌گردد با فرکانس سیستم همزمان می‌شود.

۳-۲-۳ ماشینهای جریان مستقیم

دریک ماشین d.c سیم‌پیچ میدان روی استاتور است و سیم پیچ آرمیچر روی روتور قرار دارد. شکل ساختمان یک نمونه دو قطبی ماشین d.c در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.

استاتور. استاتور تشکیل شده از: (۱) یوغ (یا بدنه) که از مادهٔ فرو مغناطیسی غیر مورق مثل چدن یا فولاد ریخته‌ای ساخته شده است (۲) قطبهای برجسته میدان که روی محیط داخلی یوغ پیچ شده‌اند و (۳) یاطاقان‌ها، متعلقات مربوط به نگهداری جاروبکها (فنر و...) درپوش‌هاو غیره. یوغ روی پایهٔ نگهدارنده قرار می‌گیرد و در ماشینهای کوچک از آهن ریخته‌ای ساخته می‌شود. در ماشینهای بزرگتر یوغ از فولاد ساخته می‌شود که نسبت به آهن ریخته‌ای ضریب نفوذ بالاتری دارد.

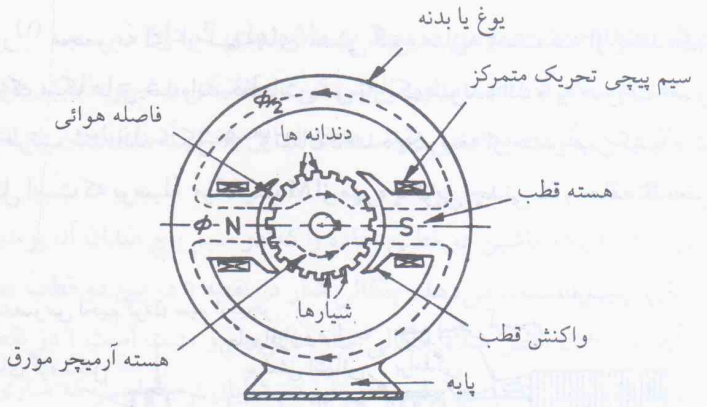
قطبهای میدان از یک مجموعه‌ای از ورقه‌های فولادی (۱ تا ۱/۵ میلی متر ضخامت) که با یکدیگر پرچ شده‌اند تشکیل شده است. هستهٔ قطب جائیکه تحریک یا سیم پیچ میدان دور آن پیچیده شده است معمولاًبدلائل زیر سطح مقطعی کوچکتر از کفشک قطب (یا سطح قطب) دارد:

(الف) وجودهسته‌باسطح مقطع‌کوچکتربمعنی‌نیاز به‌مس‌کمتری‌برای سیم پیچ میدان است.

(ب) بزرگتر بودن سطح کفشک قطب باعث افزایش شار ورودی به هر قطب آرمیچر و در نتیجه کاهش مقاومت مغناطیسی فاصله هوائی می‌گردد.

(ج) کفشک قطب مقاومت مکانیکی سیم پیچ میدان را فراهم کرده و آنرا نگه می‌دارد. از نظر اقتصادی یوغ و قطبهای ماشینهای کوچکتر ممکن است از چدن ساخته شده باشند.

سیم پیچ متمرکز میدان وقتیکه با جریان مستقیم تحریک شود یکدرمیان تولید قطبهای N و S می‌کند، که ساختمان چند قطبی نامیده می‌شود. از شکل ۸-۳ معلوم می‌شود که



شکل ۸-۳ ساختمان یک ماشین d.c دو قطب

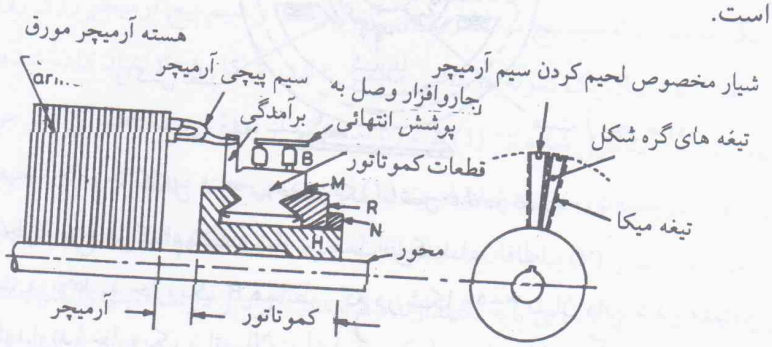
هسته آرمیچر و یوغ هر کدام نصف شار را حمل می‌کنند.

متعلقات مربوط به جاروبک B همانطور که در شکل ۹-۳ نشان داده شده مشتمل بر تعدادی نگهدارندهٔ جاروبک و اتصالات آنها به یوغ یادرپوش‌ها است. جاروبکهای کربنی ساکن در نگهدارنده‌های مربوطه قرار گرفته و توسط فنرهای با کنترل فشار روی سطح کموتاتور فشرده می‌شوند.

روتور. هستهٔ آرمیچر شامل تعدادی از ورقه‌های فولادی گرد با ضخامت بین ۰/۴ تا ۰/۶ میلیمتر است. سطح خارجی این مجموعه شیار دار شده است تا سیم پیچ توزیع شدهٔ آرمیچر در آن قرار گیرد شکل ۸-۳. این ورقها از یکدیگر عایق شده‌اند تا تلفات جریان فوکو (گردابی) را کاهش دهند. در ماشینهای کوچک ورق‌ها محکم روی محور سوار می‌شوند ولی در ماشینهای بزرگ روی یک چرخ هرز چدنی قرار می‌گیرند.

علاوه بر سیم پیچ میدان و آرمیچر، یک ماشین dc باید یک کموتاتور داشته باشد تا بصورت یک یکسو کنندهٔ مکانیکی نیروی محرکه القائی متناوب تولیدی در سیم پیچی آرمیچر را به نیروی محرکه القائی مستقیم روی ترمینال جاروبک‌ها تبدیل نماید. برای یک موتور dc کموتاتور مثل یک متناوب کننده مکانیکی عمل می‌کند که ولتاژ مستقیم اعمالی را به ولتاژ متناوب در سیم پیچ آرمیچر تبدیل می‌کند نیاز به یکسو کننده و متناوب کننده مکانیکی باعث می‌شود که آرمیچر و کموتاتور روی رتور و سیم پیچی میدان روی استاتور باشد.

کموتاتور[1] مجموعه ای از تیغه‌های مسی گوه مانند است که از یکدیگر بوسیلهٔ ورقه‌های نازک میکا عایق شده‌اند. قطعات مس باریک شونده اند و به صورت استوانه‌ایی و پهلو به پهلو مرتب شده‌اند. شکل ۹-۳ نشان دهندهٔ یک تیغه از جنس مس کشیده شده با دو شیار V شکل است که بوسیلهٔ میکانیت M از مهره یا توپی چدنی H و حلقه R بخوبی عایق شده است.



شکل ۹-۳ جزئیات ساختمان ماشین d.c

ساختمان V شکل مانع از این می‌شود که تیغه‌های کموتاتور در نتیجه نیروی گریز از مرکز به خارج پرتاب شوند. حلقهٔ R پیچ دار اجزاء مختلف را به یکدیگر محکم می‌کند و توسط مهرهٔ N در محل خود نگهداشته می‌شود توپی H نیز به محور محکم می‌شود تا کموتاتور به اندازهٔ فاصلهٔ معینی از هستهٔ آرمیچر دور نگهداشته شود (برای اتصالات پیشانی). یک انتهای هر تیغهٔ کموتاتور برجستگی دارد که یک برآمدگی بوجود می‌آورد. هم‌چنین کموتاتور طوری جای داده شده است که برآمدگی رو درروی هستهٔ آرمیچر باشد شکل ۹-۳ رابینید. هر دو سر سیم آرمیچر به هر برآمدگی لحیم می‌شود.

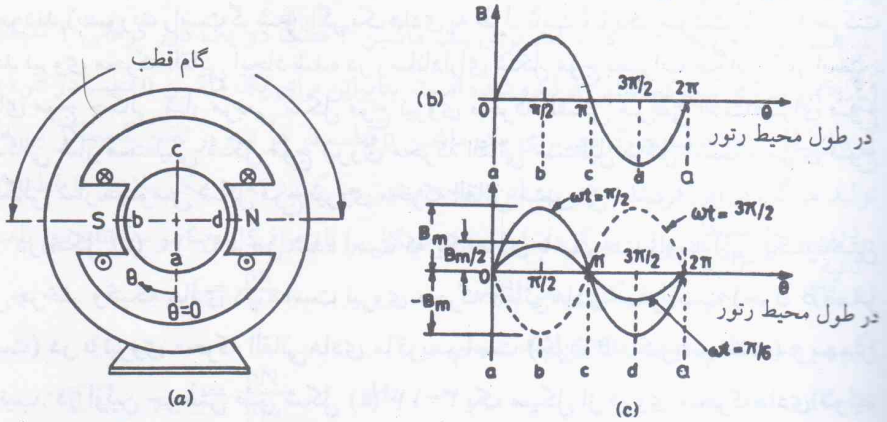
می توان یک ماشین d.c را معادل یک ماشین a.c باضافهٔ یک یکسو کنندهٔ مکانیکی مثل کموتاتور دانست. از آن جائی که سیم پیچ آرمیچر روی خودش بسته می‌شود مولدهای dc در عمل می تواند به عنوان یک دستگاه مولد برق متناوب سه فاز با اتصال مثلث عمل کند در صورتی که از سیم پیچ آرمیچر به فواصل ۱۲۰ درجه الکتریکی از طرف دیگر کموتاتور انشعاب گرفته شود.

1-Commutator

۳-۳ مفهوم اصطلاحات عمومی مربوط به ماشینهای گردان

بعضی از تعاریف مثل گام قطب، زاویه الکتریکی و مکانیکی و غیره غالباً در متون مربوط به ماشینهای الکتریکی گردان بکار می روند. هدف از این بخش آشنا ساختن خواننده با این اصطلاحات است.

شکل (a) ۱۰-۳ یک ماشین دو قطبی ساده را که دو سیم پیچ میدان آن بوسیلهٔ جریان مستقیم تحریک می‌شوند نشان می‌دهد. چگالی شار در نقطه a در بین دو قطب صفر است. در مرکز قطب که با b مشخص شده چگالی شار ماکزیمم و مثبت است ؛ در نقطه c صفر است و در نقطهٔ d مجدداً ماکزیمم ولی منفی است. شایان توجه است که شاری که وارد استاتور می‌شود یا روتور را ترک می‌کند مثبت در نظر می گیریم. به عبارت دیگر قطب S روی استاتور یا قطب N روی روتور چگالی شار مثبت ایجاد می‌کنند با توجّه به این قراردادتغییرات چگالی شار B در طول فاصلهٔ هوائی درشکل (b) ۱۰-۳ رسم شده است.



شکل ۱۰-۳ (a) ماشین دو قطب (b) تغییر چگالی شار در محیط فاصله هوائی (c) شار ضربانی

اگر تغییرات چگالی‌شار B در طول محیط فاصله هوائی طبق شکل (b) ۱۰-۳ سینوسی فرض شود گفته می‌شود که در ماشین ساده شکل (a) ۱۰-۳ چگالی شار در فضاتوزیع سینوسی دارد.

فرض کنید که سیم پیچهای میدان شکل (a) ۱۰-۳ با جریان متناوب $i = I_m \sin\omega t$ تحریک شده‌است. در $\omega t = 0$ جریان‌صفراست وهیچ شاری تولید نشده است. در $\omega t = \frac{\pi}{6}$ ، $i = \frac{I_m}{2}$ و چگالی شار در زیر قطب $\frac{B_m}{2}$ است. در لحظه $\omega t = \frac{\pi}{6}$ تغییرات موج چگالی شار در طول فاصله هوایی طبق شکل (c) ۱۰-۳ نیز سینوسی است. در $\omega t = \frac{\pi}{2}$ چگالی شار زیر

قطبها B_m است، بعد از $\omega t = \frac{\pi}{2}$ موج چگالی شار شروع به کاهش می‌کند. در $\omega t = \pi$ چگالی شار مجدداً صفر است بعد از $\omega t = \pi$ جهت جریان در سیم پیچهای میدان معکوس می‌گردد وبه تبع آن قطب‌های میدان با پلاریتهٔ معکوس بوجود می آیند. در $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ چگالی شار $-B_m$ است.

توجه کنید که محور چگالی شار در امتدا bd باقی می ماند. چنین شاری، شار متناوب یا شار ساکن تپشی (ضربانی) نامیده می‌شود.

باید توجه داشت که شار ضربانی در هر لحظه در فضا سینوسی توزیع شده است.

زاویه الکتریکی و مکانیکی

نیروی محرکه الکتریکی (emf) القاء شده در یک‌هادی توسّط قانون القاء الکترومغناطیسی فاراده که می تواند بصورتهای مختلف بیان شود، تعیین می‌گردد. در یک فرم از قانون فاراده، emf تولید شده بصورت $B\ell v$ ولت بیان می‌گردد که چگالی شار B بر حسب Wb/m^2 (T)، طول‌هادی را بر حسب m و سرعت v بر حسب m/sec بر یکدیگر عمودند (بصورت راست گوشه). اگر یک‌هادی به طول ثابت ℓ با یک سرعت ثابت v حرکت کند نیروی محرکه القایی ایجاد شده در رسانادارای شکل موج تغییرات چگالی شار است. برای موج چگالی شار مربعی شکل موج نیروی محرکه القائی مربعی است، برای موج چگالی شار مستطیلی شکل موج نیروی محرکهٔ القائی مستطیل شکل است و برای موج چگالی شار سینوسی شکل موج نیروی محرکه القائی سینوسی است.

در شکل (a) ۱۰-۳ فرض شده است که یک‌هادی با سرعت زاویه ایی یکنواختی می‌چرخد. وقتیکه هادی در a است نیروی محرکه القائی‌هادی صفر است (چون B صفر است) در b نیروی محرکه القائی‌هادی ماکزیمم است (چون B ماکزیمم است) و بهمین ترتیب. در اولین چرخش طبق شکل (a) ۱۱-۳ یک سیکل از نیروی محرکه‌هادی تولید می‌شود. حال فرض می‌شود چرخش‌هادی در ماشین ۴ قطب شکل (c) ۱۱-۳ انجام گیرد. وقتیکه‌هادی در a است نیروی محرکه القایی صفر است در b نیروی محرکه ماکزیمم است در c نیروی محرکه صفر است و به همین ترتیب. در اولین چرخش کامل مطابق شکل (b) ۱۱-۳ دو سیکل از نیروی محرکه القایی تولید می‌شود. چون یک سیکل نیروی محرکه القایی یا جریان مساوی ۳۶۰ درجه الکتریکی است زیرا در ماشین ۴ قطب در یک دور گردش ۳۶۰ درجه مکانیکی معادل ۲ سیکل یعنی ۷۲۰ درجه الکتریکی است. به عبارت دیگر ۷۲۰ درجه الکتریکی در یک ماشین ۴ قطب برابر ۳۶۰ درجه مکانیکی است

بطوریکه:

$$(۳۶۰ \text{ درجه مکانیکی}) \frac{۴}{۲} = ۷۲۰ \text{ درجه الکتریکی}$$

$$\theta_{\text{الکتریکی}} = \frac{۴}{۲} \theta_{\text{مکانیکی}}$$

برای یک ماشین p قطب، $\frac{p}{۲}$ سیکل نیروی محرکه القائی در هر دور گردش تولید خواهد شد. بنابراین برای یک ماشین p قطب

$$\theta_{\text{الکتریکی}} = \frac{p}{۲} \theta_{\text{مکانیکی}} \qquad (۳-۲)$$

حالا

$$\frac{d}{dt} (\theta_{\text{الکتریکی}}) = \frac{p}{۲} \frac{d}{dt} (\theta_{\text{مکانیکی}})$$

یا

$$\omega = \frac{p}{۲} \omega_m \qquad (۳-۳)$$

ω سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه و ω_m سرعت زاویه ایی بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه است.

همانطور که قبلاً نشان داده شد برای یک ماشین ۴ قطب در یک دور گردش ۲ سیکل ($\frac{۴}{۲}$=) از نیروی محرکه القایی تولیده شده است. بنابراین برای یک ماشین p قطب در هر دور گردش $\frac{p}{۲}$ سیکل تولید می‌گردد. برای یک ماشین p قطب در هر دور بر ثانیه $\frac{p}{۲}$ سیکل بر ثانیه تولید می‌گردد. این فرآیند ذهنی به این نتیجه منتهی می‌گردد که در یک ماشین p قطبی در $n \frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$. $\frac{p}{۲} \frac{\text{سیکل}}{\text{ثانیه}}$ تولید می‌گردد. اما تعداد سیکل بر ثانیه‌رافرکانس f موج e.m.f می نامند.

$$f = \frac{pn}{۲} \qquad \text{هرتز یا سیکل بر هر ثانیه} \qquad (۳-۴)$$

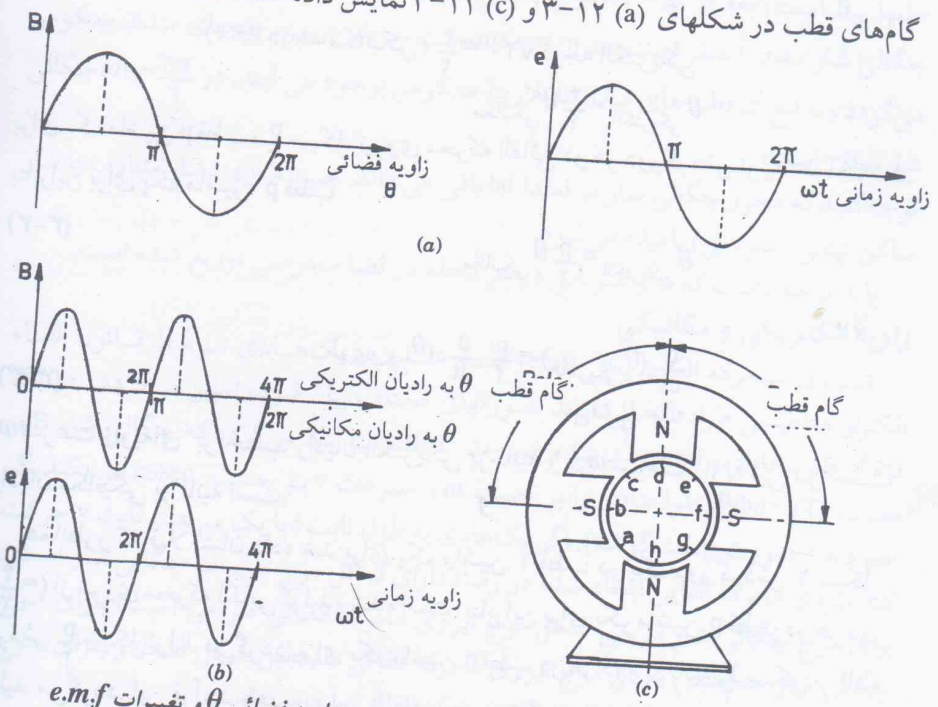
اگر سرعت N بر حسب rpm باشد. سپس

$$f = \frac{pN}{۱۲۰} \quad \text{Hz} \qquad (۳-۵)$$

توجه داشته باشید که نمودار بالائی شکل (b) یا (a) ۱۱-۳ تغییرات چگالی شار را به صورت تابع زاویه θ در طول محیط فاصله هوائی بدست می‌دهد نمودار پائینی از همان شکل (b) یا (a) ۱۱-۳ تغییرات نیروی محرکه القائی را به صورت تابع زمانی زاویه ωt می‌دهد. چون گردش روتور وابسته به زمان است می توان گفت که متغیر فضائی B بعلت گردش روتور به کمیت متغیر با زمان e تبدیل شده است.

گام قطب: فاصلهٔ محیطی بین دو قطب مجاور گام قطب نامیده می‌شود. گام قطب بجای درجه مکانیکی همیشه برحسب درجه الکتریکی بیان می‌شود. لذا این موضوع استنباط می‌شود که گام قطب همیشه مساوی ۱۸۰ درجه الکتریکی یا π رادیان الکتریکی است.

گام‌های قطب در شکلهای (a) ۱۲-۳ و (c) ۱۱-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۳ تغییرات چگالی شار بر حسب زاویه فضائی θ و تغییرات e.m.f متناظر بر حسب زاویه زمانی ωt

(a) برای ماشین دو قطب (b) برای ماشین ۴ قطب (c) یک ماشین ۴ قطب ساده

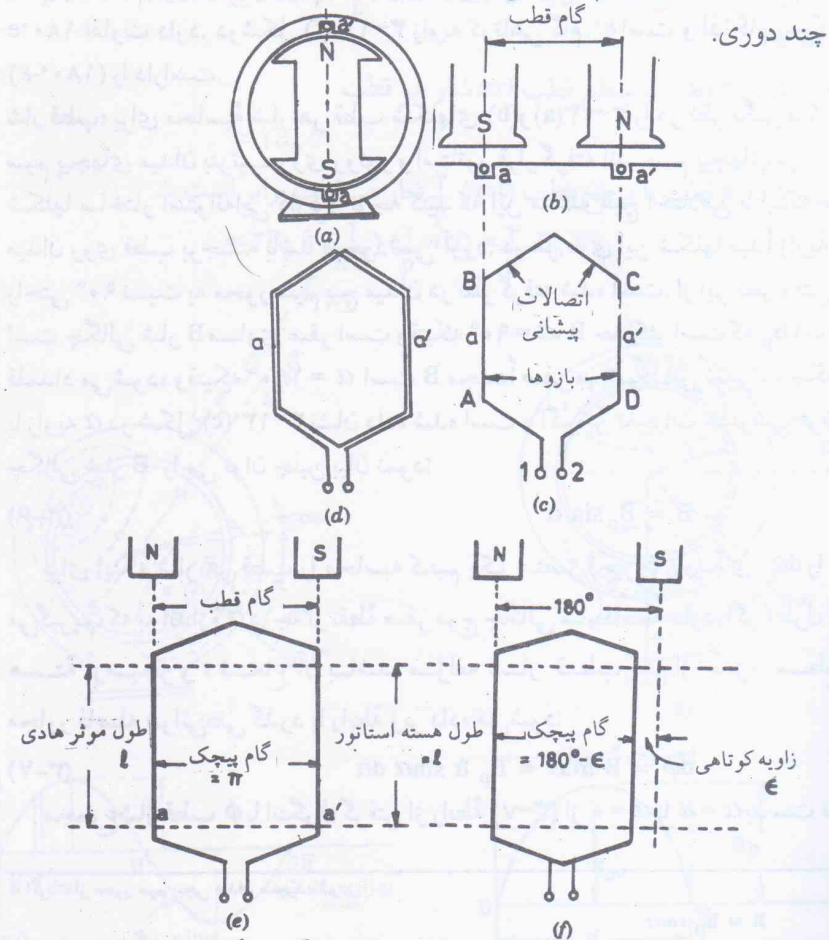
پیچک: شکل (a) ۱۲-۳ یک ماشین دو قطب را با یک پیچک[1] aa' که در دو شیار استاتور جای داده شده است نشان می‌دهد. حالت گسترده شدهٔ آن با پیچکی که بصورت تخت نشان داده شده در شکل (b) ۱۲-۳ دیده می‌شود.

شکل (c) ۱۲-۳ طرح سیم پیچ aa' را نشان می‌دهد. شکل (c) ۱۲-۳ معلوم می سازد که سیم پیچ aa' یک حلقه دارد. نیروی محرکه القائی فقط در طولهای فعال AB و CD تولید شده‌است. این طولهای فعال دوبازوی پیچک نامیده می‌شوند. برای پیچک شکل (c) ۱۲-۳ هر بازوی پیچک یک‌هادی دارد. چنین به نظر می رسد که یک حلقه شامل دو هادی‌است و یک پیچک ازدو ضلع پیچک تشکیل‌شده است. در شکل (c) ۱۲-۳ دو بازوی پیچک AB و

1- Coil

CD دراتصالات پیشانی به صورت سری به یکدیگر مربوط شده‌اند بطوری که نیروی محرکه‌القائی روی‌ترمینالهای ۱ و۲ پیچک‌برابرمجموع emfهای‌دوبازوی‌پیچک‌است.

اگر پیچک 'aa که در شکل (d) ۱۲-۳ نشان داده شده را در نظر بگیریم دیده می‌شود که این سیم پیچ دو حلقه دارد. بعبارت دیگر شکل (d) ۱۲-۳ نشان دهندهٔ یک پیچک دو حلقه ای منفرد است. هر ضلع پیچک دوهادی دارد و مجموعاً تعدادهادیها در سیم پیچ ۴ تا است شکل (d) ۱۲-۳. اگر یک سیم پیچ N دور داشته باشد آنگاه از آن بعنوان یک پیچک منفرد N دوری نام برده می‌شود با Nهادی در هر بازوی پیچک و ۲Nهادی در پیچک چند دوری.



شکل ۱۲-۳ (a) ماشین دو قطب ساده با یک پیچک (b) نمای گسترده (c) پیچک یکدوری (d) پیچک دو دوری (e) پیچک گام کامل (f) پیچک گام کوتاه

یک پیچک با دو بازو که ۱۸۰° الکتریکی یا یک گام قطب فاصلهٔ فضایی دارد *پیچک گام کامل* نامیده می‌شود. *پیچک گام کامل* را می‌توان پیچکی تعریف کرد که فاصله دوضلع آن برابریک گام قطب‌است. در شکل ۳-۱۲(a) سیم‌پیچ aa' یک پیچک با گام کامل است چون دو بازوی پیچک یک گام قطب فاصله دارند.بنابراین پیچک گام کامل پیچکی است که گام آن یا فاصله دهانهٔ آن ۱۸۰° الکتریکی باشد. گام پیچک بر حسب درجه الکتریکی، تعداد بازوها یا تعداد شیارها سنجیده می‌شود. در شکل ۳-۱۲(e) گام پیچک ۱۸۰°e الکتریکی است که آنرا پیچک گام کامل (قطری) می‌نامند در شکل ۳-۱۲(f) گام پیچک کمتر از ۱۸۰°e است و لذا پیچک گام کوتاه یا وتری نام دارد. زاویه کوتاهی گام $\varepsilon°$ زاویه‌ای است که گام پیچک از ۱۸۰°e تفاوت دارد. درشکل ۳-۱۲(f) زاویه کوتاهی گام $\varepsilon°$ است و لذا گام پیچک زاویه $(180°-\varepsilon)$ را داراست.

شار قطب: برای محاسبهٔ شار هر قطب شکلهای ۳-۱۳(b)و(a) را در نظر بگیرید که در آنها سیم پیچهای میدان بترتیب روی روتور و استاتور قرار گرفته اند. سیم پیچهای میدان در این شکلها ساختار استوانه‌ایی دارد و توجه کنید که این مسئله هیچ اختلافی با اینکه سیم پیچ میدان روی قطب برجسته باشد بوجود نمی آورد. در هر دوی این شکلها مبدأ زاویهٔ α برای راحتی ۹۰° نسبت به محور سیم پیچ میدان در نظر گرفته شده است. از این نظر وقتی $\alpha = 0°$ است چگالی شار B مساوی صفر است وقتیکه $\alpha = 90°$، B حداکثر است که B_p (مقدار قله) قلمداد می‌شود، وقتیکه $\alpha = 180°$ است B مجدداً صفر می‌شود. این تغییرات چگالی شار با زاویه α در شکل ۳-۱۳(c) نشان داده شده است و اگر این تغییرات سینوسی فرض شود چگالی شار B را می توان چنین بیان نمود:

$$B = B_p \sin \alpha \qquad (۳-۶)$$

برای اینکه شار هر قطب را محاسبه کنیم یک عنصر (جزء) زاویه‌ای $d\alpha$ را در نظر می‌گیریم، که به اندازهٔ α درجه از نقطهٔ صفر موج چگالی شار فاصله دارد. اگر ℓ طول محوری هستهٔ آرمیچر و r شعاع آن باشد، مؤلفه شار قطب که از جزء سطح $\ell r d\alpha$ مجاور فاصله هوائی می گذرد با رابطهٔ زیر داده می‌شود:

$$d\phi = B\, \ell r d\alpha = B_p\, \ell r \sin\alpha\, d\alpha \qquad (۳-۷)$$

مجموع شار قطب ϕ با انتگرال گرفتن از رابطهٔ (۳-۷) از $\alpha = 0$ تا $\alpha = \pi$ بدست می آید*.

---

* اگر α از محور سیم پیچی میدان سنجیده شود:

$$B = B_p \cos\alpha$$

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_p\, \ell r \cos\alpha\, d\alpha = 2B_p\, \ell r$$

$$\phi = \int_{\gamma}^{\pi} B_p \, lr \sin\alpha \, d\alpha$$
$$= 2B_p \, lr \qquad (۳-۸)$$

معادلهٔ (۸-۳) مقدار شار هر قطب را برای یک ماشین ۲ قطب می‌دهد. حال این مقداربرای یک ماشین p قطب تعیین خواهد شد. برای یک ماشین که ابعادش داده شده باشد:

سطح هر قطب برای یک ماشین ۲ قطب $= \frac{2\pi r\ell}{2} = \pi r\ell$

سطح هر قطب برای یک ماشین p قطب $= \frac{2\pi r\ell}{p} = \frac{2}{p}(\pi r\ell)$

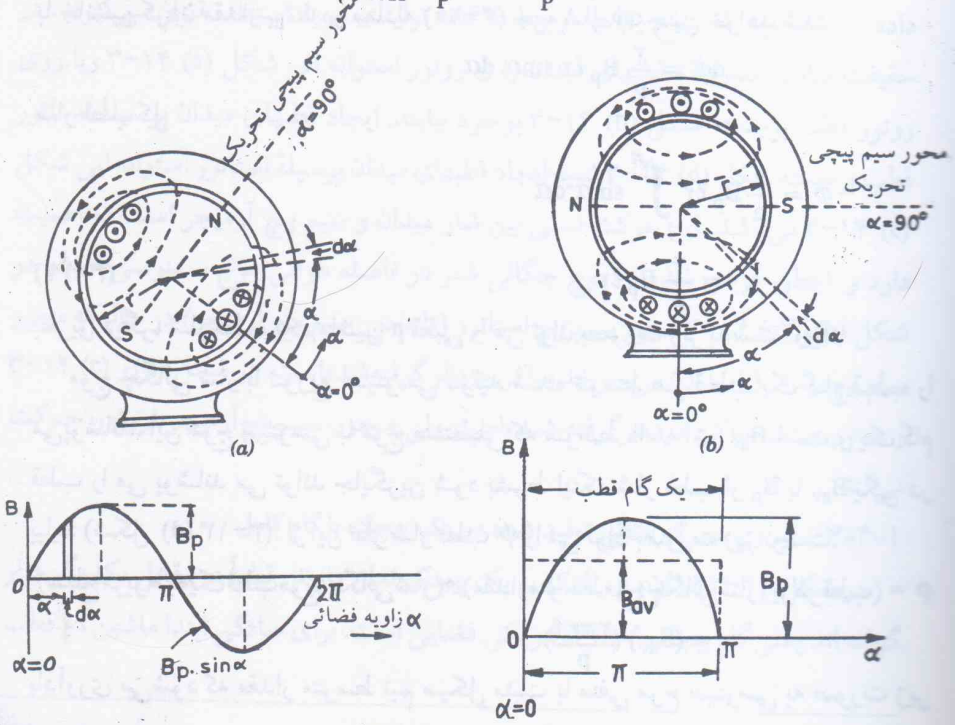
این نشان می‌دهد که سطح قطب برای ماشین p قطب $(\frac{2}{p})$ برابر سطح قطب برای یک ماشین ۲ قطب است.

برای یک ماشین ۲ قطب با سطح قطب $\pi r\ell$ شار هر قطب

$$= 2B_p \, lr$$

برای یک ماشین p قطب با سطح قطب $(\frac{2}{p}\pi r\ell)$ شار هر قطب برابر است با:

$$= 2B_p \, lr \left(\frac{I}{\pi r l}\right)\left(\frac{2}{p}\pi r\ell\right) = \frac{4}{p} B_p \, lr \qquad (۳-۹)$$



شکل ۱۳-۳ محاسبه شار قطب

روش دیگر بدست آوردن معادله (۹-۳) چنین است:

برای ماشین p قطب، تغییرات چگالی شار B با زاویه فضائی α مشابه شکل (c) ۱۳-۳ است و با معادله (۶-۳) داده شده است. برای بدست آوردن شار قطب جزء (عنصر) زاویه باید بر حسب درجه مکانیکی بیان شود. بنابراین جزء زاویه فضائی $d\alpha_m$ را به درجه مکانیکی در نظر می گیریم (مشابه شکل (a) ۱۳-۳). شار گذرنده از جزء سطح مکانیکی $\ell r d\alpha_m$ چنین خواهد بود.

$$d\phi = B\ell r\, d\alpha_m = B_p \ell r \sin\alpha\, d\alpha_m \qquad (۳-۱۰)$$

اندیس p نشانه مقدار پیک است.

از معادله (۲-۳):

$$\text{درجه الکتریکی} = \frac{p}{۲} \quad \text{(درجه مکانیکی)}$$

$$\alpha = \frac{p}{۲}\alpha_m$$

$$d\alpha = \frac{p}{۲} d\alpha_m$$

با جانشین کردن مقدار $d\alpha_m$ در معادله (۱۰-۳) جزء شار $d\phi$ چنین خواهد شد:

$$d\phi = \frac{۲}{p} B_p \ell r \sin\alpha\, d\alpha$$

شار قطب کل

$$\phi = \frac{۲}{p} B_p \ell r \int_0^{\pi} \sin\alpha\, d\alpha$$

$$= \frac{۴}{p} B_p \ell r \qquad (۳-۱۱)$$

بطریق دیگر، شار قطب یک ماشین p قطبی را می توان بصورت زیر بدست آورد:

موج چگالی شار با توزیع سینوسی تولید شده توسط هر قطب یک گام قطب را می‌پوشاند. این موج سینوسی با موج مستطیلی که متوسط دامنه اش B_{av} است و یک گام قطب را می پوشاند می تواند جایگزین شود بشرط اینکه شار قطب از B_p یا B_{av} یکی در بیاید (شکل (d) ۱۳-۳). از این نظر شار قطب ϕ را می توان بصورت زیر نوشت:

ϕ = (سطح مربوط به یک قطب موج چگالی شار) × (مقدار متوسط موج چگالی شار زیر هر قطب)

$$= (B_{av})\left(\frac{۲\pi r\, \ell}{p}\right)$$

یادآوری می‌شود که مقدار متوسط نیم سیکل مثبت یا منفی موج سینوسی به صورت زیر است:

$\frac{۲}{\pi}$ (مقدار پیک موج سینوسی)

بنابراین مقدار متوسط موج چگالی شار در یک گام قطب شکل (d) ۱۳-۳ برابر است با:

$$B_{av} = \frac{۲}{\pi} B_p$$

$$\text{شار قطب} = (\frac{۲}{\pi} B_p)(\frac{۲\pi r \ell}{p})$$

$$= \frac{۴}{p} B_p r \ell \qquad (۳-۱۱)$$

۳-۴ نیروی محرکه القائی تولیدی

در ماشینهای الکتریکی گردان نیروی محرکه القائی در سیم پیچهای آرمیچر با چند روش ایجاد می‌شود: (الف) از گردش این سیم پیچها در میدان مغناطیسی (ب) چرخش میدان مغناطیسی نسبت به این سیم پیچها یا (ج) بوسیله نحوهٔ طراحی مدار مغناطیسی به طوریکه با دوران رتور مقاومت مغناطیسی متغیر داشته باشد*. در این بخش ایجاد نیروی محرکه القائی فقط در زمانیکه حرکت نسبی بین شار میدان و سیم پیچ آرمیچر وجود داشته باشد مورد بررسی قرار می گیرد. شکلهای ابتدائی ماشینهای گردان که در شکل ۱۴-۳ نمایش داده شده‌اند برای استنتاج روابط مربوط به emf تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت تفاوتی ندارد که قطبهای میدان روی روتور استوانه ائی شکل (a) ۱۴-۳ ویا روی روتور قطب برجسته شکل (b) ۱۴-۳ بوجود بیایند. ایجاد قطبهای میدان بوسیلهٔ استاتور قطب برجسته شکل (d) ۱۴-۳ شبیه ایجاد قطبهای میدان بوسیلهٔ استاتور استوانه ایی شکل (c) ۱۴-۳ می‌باشد. این حرکت نسبی بین شار میدان و سیم پیچ آرمیچر است که اهمیت دارد و اینطور فرض شده که موج چگالی شار در فاصله هوائی موج سینوسی است. در شکل (b) و (a) ۱۴-۳ محور سیم پیچ استاتور (یا محور سیم پیچ آرمیچر) در حالیکه محور سیم پیچ‌میدان (یامیدان) می چرخد ساکن درنظر گرفته‌شده‌است. در شکل (d) و (c) ۱۴-۳ و محور میدان ساکن درنظرگرفته شده‌است ولی محور سیم‌پیچ آرمیچرباروتور حرکت می‌کند.

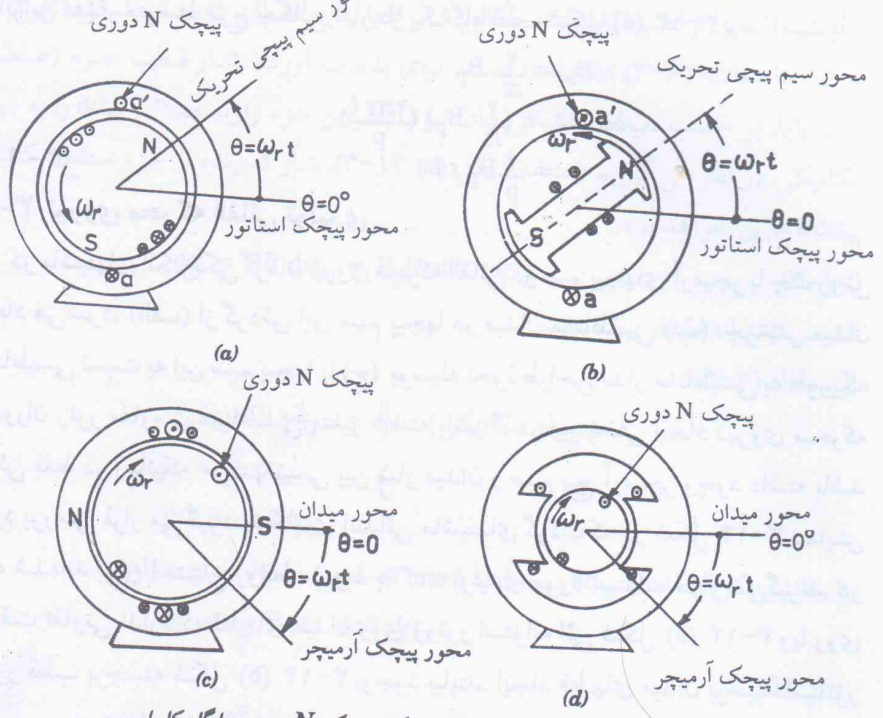
۳-۴-۱ نیروی محرکه القائی تولید شده در یک پیچک با گام کامل

در شکل ۱۴-۳ اضلاع a و a' که به یک پیچک تعلق دارند، قطراً در مقابل یکدیگر قرار گرفته اند یعنی گام پیچک ۱۸۰° الکتریکی فضایی است. برای سادگی ابتدا ماشین دو قطب

---

* آلترناتور اندوکتور براساس این اصل کار می‌کند. Inductor alternators

با یک سیم پیچ آرمیچر N دوری با گام کامل در شکل ۱۴-۳ در نظر گرفته می‌شود



شکل ۱۴-۳ تولید e.m.f در یک پیچک N دوری با گام کامل

هر چند که به صورت واقعی یک ماشین الکتریکی ازتعداد زیادی پیچک آرمیچر که بصورت مناسب به یکدیگر متصل شده‌اند تشکیل شده است. ولتاژ منتجهٔ آرمیچر در هر ماشین از جمع emfهای تک تک پیچک‌ها به روشی که به نحوه طراحی سیم پیچ آرمیچر بستگی دارد بدست می آید.

در شکل ۱۴-۳ مبدأ زمان به دلخواه در لحظهٔ یکسان شدن محور سیم پیچ با محور پیچک میدان انتخاب شده است. درمبدأ زمان یعنی لحظهٔ $t = 0$ زاویهٔ زمانی $\theta = \omega_r t = 0$ است و محور پیچک بر محور سیم پیچ میدان منطبق است. اینجا ω_r سرعت زاویه‌ایی رتور بر حسب رادیان برثانیه می‌باشد. از بررسی شکل ۱۴-۳ روشن است که در لحظهٔ $\theta = 0$ شاری که از پیچک می گذرد (پیوند می‌خورد) حداکثر است ($\phi \cos 0^\circ =$) به عبارت دیگر در $\theta = 0$ تمامی شار ϕ که بوسیلهٔ یک‌قطب تولید می‌شود از میان پیچک می گذرد. زمانیکه $\theta = \omega_r t = 90^\circ$ است محور سیم پیچ میدان بر محور پیچک آرمیچر عمود است، شاری که

از میان پیچک می گذرد صفر است ($\phi \cos ۹۰°$=). برای $\theta = \omega_r t = ۱۸۰°$ شاری که از میان پیچک می گذرد دوباره حداکثر شده ($\phi \cos ۱۸۰°$=) ولی جهتی معکوس دارد. براساس مسائلی که در فوق مطرح گردید رابطه ایی که تغییرات شار عبوری از پیچک را می‌دهد به صورت $\phi \cos \theta$ یا $\phi \cos \omega_r t$ بیان می‌گردد. بنابراین شار دربرگیرنده (پیوندی) ψ برای پیچک آرمیچر N دوری با گام کامل در هر زمان t عبارت است از:

ψ = N (شار عبوری از پیچک درزمان t)

$$= N \phi \cos \omega_r t \qquad (۳-۱۲)$$

با توجه به قانون فاراده نیروی محرکه القائی در پیچک آرمیچر N دوری آرمیچر با رابطهٔ زیر بیان می‌شود:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = N \phi \omega_r \sin \omega_r t - N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega_r t \qquad (۳-۱۳)$$

در رابطهٔ (۱۳ - ۳) جمله $N \phi \omega_r \sin \omega_r t$ نشان دهندهٔ ولتاژ ناشی از حرکت (دوران) و جمله $N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega_r t$ ولتاژ ترانسفورماتوری است زیرا شامل مشتق زمانی شار ϕ می‌باشد. اگر شار میدان ϕ با زمان ثابت باشد (یعنی ϕ تغییری در زمان نداشته باشد) نیروی محرکه القائی ترانسفورماتوری در رابطهٔ (۱۳ - ۳) به صفر کاهش می یابد و نیروی محرکه القـــــائی

ایجاد شده فقط برابر ولتاژ حرکتی یا emf حرکتی است. بنابراین برای ماشینهای الکتریکی با شار ثابت در زمان نیروی محرکه القائی ایجاد شده مساوی نیروی محرکه القائی حرکتی یا چرخشی است وبا رابطهٔ زیر بیان می‌شود:

$$e = N \omega_r \phi \sin \omega_r t \qquad (۳-۱۴)$$

در رابطهٔ (۱۴ - ۳) N تعداد دور یک پیچک با گام کامل، ϕ شار هر قطب و ω_r سرعت نسبی بین موج شار میدان و پیچک آرمیچر است. نکته قابل توجه این است که رابطهٔ (۱۴ - ۳) نمایندهٔ رابطهٔ کلی نیروی محرکه القائی است و بنابراین در هر دو نوع ماشینهای ac و dc که شار میدان برحسب زمان ثابت باشد مورد استفاده قرار می گیرد.

در ماشین‌های ac با پیچک N دوری حداکثر مقدار سرعت یا نیروی محرکه القائی یعنی E_{max} زمانی که $\sin \omega_r t = ۱$ است روی می‌دهد.

$$E_{max} = \omega_r N \phi = ۲\pi f_r N\phi$$

مقدار مؤثر r.m.s نیروی محرکه القائی در یک پیچک گام کامل:

$$E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\,\pi\, f_r\, N\phi = 4/44\, f_r\, N\phi \qquad (3-15)$$

در رابطهٔ فوق f_r فرکانس سرعتی یا چرخشی نامیده می‌شود زیرا مقدار آن به سرعت نسبی بین موج چگالی شار و سیم پیچ آرمیچر بستگی دارد. مقدار f_r به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_r = \frac{pn_r}{2} \quad \text{هرتز}$$

n_r سرعت نسبی برحسب دور بر ثانیه (r.p.s) بین سیم پیچ آرمیچر و موج چگالی شار است.

این نکته نیز قابل توجه است که رابطهٔ (۱۵ - ۳) مقدار r.m.s نیروی محرکه القائی ایجاد شده در یک پیچک آرمیچر N دوری با گام کامل ماشین ac را بدست می‌دهد.

رابطهٔ (۱۴-۳) را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\left.\begin{aligned} e &= N\omega_r \phi \cos\left(\omega_r t - \frac{\pi}{2}\right) \\ &= E_{max} \cos\left(\omega_r t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (3-16)$$

بررسی رابطه‌های (۱۲-۳) و (۱۶-۳) نشان می‌دهد که نیروی محرکه القائی ایجاد شده ۹۰ درجه از شاری که آن را تولید کرده از نظر فاز عقب است ولی این عبارت وقتی صحیح است که شار تغییری در زمان نداشته و در فضا توزیع سینوسی داشته باشد. لازم به ذکر است که در اینجا ذکر نشده است که پیچک آرمیچر حرکت می‌کند ویا موج چگالی شار حرکت می‌کند تنها سرعت نسبی بین موج چگالی شار و پیچک است که حائز اهمیت می‌باشد.

۳-۴-۲ نیروی محرکه القائی ایجاد شده در پیچک باگام کوتاه

پیچک آرمیچر N دوری را در نظر بگیرید که گام آن ε درجهٔ الکتریکی کوتاه شده باشد بطوری که گام پیچک (ε - ۱۸۰) درجهٔ الکتریکی است. برای پیچک گام کوتاه یا پیچک وتری، شکل (b) ۱۴-۳ مجدداً در شکل (a) ۱۵-۳ رسم شده است. برای اینکه محور پیچک و محور سیم پیچ میدان منطبق شوند زاویهٔ کوتاهی گام ε به صورت $\frac{\varepsilon}{2}$ در دو محل نشان داده شده است. *زاویهٔ وتری (قوسی)* طبق تعریف زاویه ای است که گام پیچک به اندازهٔ آن زاویه از ۱۸۰° الکتریکی کمتر می‌شود که آنرا زاویه کوتاهی گام نیز می‌گویند. واضح است که شارعبوری از پیچک گام کسری یا وتری شکل (a) ۱۵-۳ کمتر از شارعبوری از پیچک گام کامل شکل (b) ۱۴-۳ است.

لازم به ذکر است که شار هر قطب مساوی $2B_p l r$ برای یک ماشین ۲ قطب و

$\frac{۴}{p}B_p\ \ell r$ برای یک ماشین p قطب می‌باشد. مبدأ زاویه مکانی α نیز عمود بر محور میدان است. برای اینکه شارعبوری از پیچک یا پیوندی آن تعیین گردد، رابطهٔ (۷-۳) باید از $\alpha = \frac{\varepsilon}{۲}$ تا $\alpha = \pi - \frac{\varepsilon}{۲}$ انتگرال گیری شود، با مراجعه به شکلهای (b) و (a) ۱۵-۳:

∴ شارعبوری از میان پیچک گام کوتاه (وتری) شکل (a) ۱۵-۳:

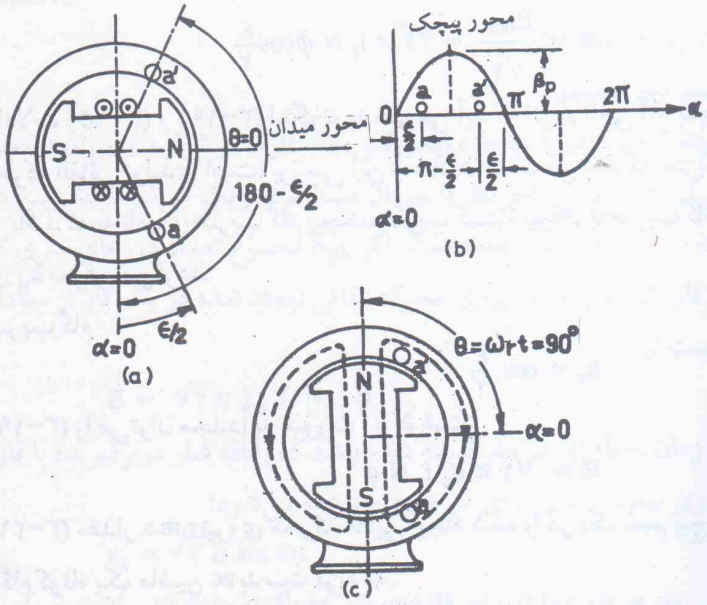
$$= \int_{\varepsilon/۲}^{\pi - \varepsilon/۲} B_p\ \ell r \sin\alpha\ d\alpha = ۲B_p\ \ell r \cos\frac{\varepsilon}{۲}$$

اما $۲B_p\ \ell r = \phi$

∴ شار عبوری از پیچک وتری:

$$= \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲}$$

مبدأ زمان در روابط فوق لحظه ایی است که محور سیم پیچ میدان و محور پیچک آرمیچر منطبق باشند. بنابراین با رجوع به شکل (a) ۱۵-۳ زمانیکه $\theta = \omega_r t = ۰$ است شارعبوری از پیچک حداکثر بوده و برابر $\phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} (= \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲}\cos ۰°)$ می‌باشد. با رجوع به شکل (c) ۱۵-۳ زمانیکه $\theta = \omega_r t = ۹۰°$ است شارعبوری از پیچک صفر خواهد بود $(= \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \cos ۹۰°)$. در شکل (c) ۱۵-۳ اگرچه یک خط شار در اطراف پیچک aa' نشان داده شده است، امّا در این حالت شار عبوری از پیچک با توجه به اینکه محور مغناطیسی



شکل ۱۵-۳ e.m.f تولیدی در پیچک با گام کوتاه (وتری)

پیچک و محور سیم پیچ میدان بر یکدیگر عمودند، صفراست. برای $\theta = \omega_r t = ۱۸۰^\circ$ رابطه شار پیچک مجدداً حداکثر ولی این بار در جهت معکوس خواهد بود ($= \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \cos ۱۸۰^\circ$). بنابراین عبارت کلی برای شار عبوری از پیچک وتری اینگونه خواهد بود:

$$\phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \cos \omega_r t \qquad \text{یا} \qquad \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \cos \theta$$

∴ شار دربرگیرنده (پیوندی) پیچک N دوری با گام کوتاه برابر است با:

$$\psi = N \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \cos \omega_r t \qquad (۳-۱۷)$$

با توجه به قانون فاراده نیروی محرکه القائی در پیچک آرمیچر N دوری با گام کوتاه با رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = N \phi \omega_r \cos\frac{\varepsilon}{۲} \sin \omega_r t \qquad (۳-۱۸)$$

در رابطهٔ فوق تغییر شار ϕ با زمان ثابت در نظر گرفته شده است.

حداکثر مقدار ولتاژ گردشی E_{max} زمانی است که $\sin\omega_r t = ۱$ باشد.

∴
$$E_{max} = N \phi \omega_r \cos\frac{\varepsilon}{۲}$$

و مقدار r.m.s آن:

$$E = \frac{E_{max}}{\sqrt{۲}} = \sqrt{۲}\,\pi\, f_r\, N\, \phi \cos\frac{\varepsilon}{۲} \qquad (۳-۱۹)$$

از معادلات (۳-۱۵) و (۳-۱۹) اینگونه به نظر می آید که اثر کوتاهی گام پیچک کاهش نیروی محرکه القائی تولیدی است. بررسی این معادلات نشان می‌دهد که ضریب کاهش، $\cos\frac{\varepsilon}{۲}$ می‌باشد که به نامهای ضریب گام پیچک، ضریب گسترهٔ پیچک یا ضریب گام باعلامت اختصاری k_p معرفی می‌گردد.

∴ ضریب گام

$$k_p = \cos\frac{\varepsilon}{۲} \qquad (۳-۲۰)$$

معادلهٔ (۳-۱۹) را می‌توان مجدداً به صورت زیر نوشت:

$$E = \sqrt{۲}\,\pi\, k_p\, f_r\, N\, \phi \qquad (۳-۲۱)$$

معادلهٔ (۳-۲۱) مقدار r.m.s نیروی محرکه القایی ایجاد شده را در یک سیم پیچ آرمیچر N دوری باگام کوتاه یک ماشین ac بدست می‌دهد.

۳-۴-۳ ماشینهای A.C

در ماشینهای الکتریکی گردان برای استفادهٔ کامل از محیط آرمیچر ضروری است که حلقه‌های سیم پیچ آرمیچر را بجای متمرکز کردن در یک شیار در کلیهٔ شیارها توزیع نمود. اثر توزیع حلقه‌ها در شیارهای مختلف کاهش بیشتر نیروی محرکه القایی تولیدی با ضریبی موسوم به k_d است. این ضریب، ضریب توزیع، *پهنا* یا پخش نامیده می‌شود (بخش ۱-۵-۳ را ببینید.)

بنابراین نیروی محرکه القائی ایجاد شده برای یک سیم پیچ گام کوتاه توزیع شده با توجه به معادلهٔ (۲۱-۳) اینگونه است:

$$E = \sqrt{2}\,\pi\, k_p\, k_d\, f_r\, N\, \phi$$
$$= \sqrt{2}\,\pi\, k_w\, f_r\, N\, \phi \qquad (۳-۲۲)$$

به طوریکه $k_w = k_p\, k_d$ ضریب سیم پیچی نامیده می‌شود.

در رابطهٔ (۲۲-۳) توجه داشته باشید که N تعداد دورهای توزیع شده به صورت سری‌است. رابطهٔ اصلی نیروی محرکه القائی تولیدی در ماشین‌های a.c همان رابطهٔ (۲۲-۳) است. اکنون این رابطه برای انواع مختلف ماشینهای a.c که دامنهٔ شارفاصله هوائی آنها ثابت باشد اصلاح گردیده است.

(۱) ماشینهای سنکرون

(الف) سیم پیچ آرمیچر

سیم پیچ آرمیچر دو یا سه فازه (بطورکلی چند فازه) در شیارهای پیرامون محیط آرمیچر توزیع می‌گردد. سیم پیچ تحریک با جریان مستقیم تحریک می‌شود بنابراین دامنهٔ موج شارمیدان با زمان تغییر نخواهد داشت. اگر N_{ph} مجموع تعداد دورهای سری هر فاز سیم پیچ چند فازه آرمیچر باشد نیروی محرکه القائی ایجاد شده در یک فاز از معادله (۲۲-۳) عبارت است از:

$$E = \sqrt{2}\,\pi\, k_w\, f_r\, N_{ph}\, \phi \qquad (۳-۲۳)$$

اگر مبدأ زمان لحظه ای در نظر گرفته شده باشد که رابطه شار دربرگیرنده با فاز a حداکثر است نیروی محرکه القائی برای فاز a چنین نوشته می‌شود:

$$e_a = \sqrt{2}\, E \sin \omega t$$

برای توالی فاز a، b و c ولتاژ برای فازهای b و c اینگونه می تواند بیان شود.

$$e_b = \sqrt{2}\, E \sin(\omega t - ۱۲۰^\circ)$$

$$e_c = \sqrt{2}\, E \sin(\omega t - ۲۴۰^\circ)$$

روابط فوق ولتاژهای فاز e_a ، e_b و e_c هستند که می توان آنها را بین ترمینال خط و نقطهٔ خنثی در یک آلترناتور اتصال ستارهٔ اندازه‌گیری کرد. در یک آلترناتور اتصال مثلث e_a ، e_b و e_c نشان دهندهٔ emfهای فاز و خط هر دو می‌باشند.

یک ماشین سنکرون فقط در سرعت سنکرون کار می‌کند. نتیجتاً سرعت نسبی بین موج چگالی شار و سیم پیچ آرمیچر باید سرعت سنکرون باشد. فرکانس گردشی f_r مساوی $\frac{pn_r}{۲}$ است و در چنین ماشینهائی $\frac{p(\text{سرعت سنکرون به r.p.s})}{۲}$ می‌باشد ویا $\frac{pn_s}{۲}$ مساوی فرکانس f به هرتز است. نیروی محرکه القائی در هر فاز ماشین سنکرون عبارت است از:

$$E_{ph} = \sqrt{2}\, \pi\, f\, k_w\, N_{ph}\, \phi \qquad (۳-۲۴)$$

معادله (۲۴-۳) برای ماشین سنکرون و معادله (۴-۱) برای ترانسفورماتور از ماهیت یکسانی برخوردارند. در یک ترانسفورماتور شارداخل هسته با زمان تغییر می‌کند و نیروی محرکه القائی در سیم پیچهای ساکن اولیه و ثانویه ایجاد می‌گردد اما در یک ماشین گردان حرکت نسبی بین سیم پیچ آرمیچر و موج چگالی شار باعث تغییر شار دربرگیرنده در زمان گردیده و نیروی محرکه القائی در سیم پیچ آرمیچر ایجاد می نماید. در عبارت مربوط به emf ترانسفورماتور شار ϕ_{max} حداکثر مقدار شار هسته است ولی در یک ماشین سنکرون شار ϕ شارکل هر قطب است. در یک ترانسفورماتور سیم پیچها متمرکز می‌باشند ولی در یک ماشین سنکرون سیم پیچ آرمیچر توزیع شده است و ضریب کاهش k_w حتماً بایستی در رابطهٔ نیروی محرکه القائی ظاهر گردد.

(ب) سیم پیچ میدان

سیم پیچ میدان یک ماشین سنکرون همیشه با جریان مستقیم تغذیه می‌شود. در حالت پایدار جریان تحریک یا میدان برابر است با:

$$I_f = \frac{V_f}{r_f} \qquad (۳-۲۵)$$

V_f = ولتاژ مستقیم اعمال شده به سیم پیچ میدان

و r_f = مقاومت سیم پیچ میدان