موتورهای بدون سنسور

در بررسي روش هاي مختلف كنترل موتور*BLDC* همواره به اطلاعاتي از موقعيت روتور، سرعت روتور يا گشتاور توليدي نياز داريم.

سنسورهايي كه موقعيت و سرعت را اندازه مي‌گيرند. گران قيمت هستند و داراي رفتار غيرخطي مي‌باشند كه تحليل سيستم را پيچيده‌تر مي‌كنند اين سنسورها يكي از منابع نويز، خطا و تأثير در سيستم هستند، علاوه برآن محدوديت دمايي دارند و در كاربردهاي كمتر از يک *1* وات ، توان مصرفي سنسورهاي موقعيت، راندمان موتور را كاهش مي‌دهد.

بنابراين با توجه به دلايل ذكر شده، حذف سنسور از دو جنبه اقتصادي و فني داراي اهميت است. روش هاي بدون سنسور به روش هايي گفته مي‌شود كه اطلاعات بخش مكانيكي موتور همانند موقعيت رتور، سرعت و يا گشتاور توليدي از روي ساير اطلاعات مثل ولتاژهاي و جريان ها محاسبه شود. امروزه روشهاي كنترل بدون سنسور را به دو دسته كلي مي‌توان تقسيم كرد.

۱- روش هاي مدار باز يعني روش هايي كه مستقيماً كميت هاي مطلوب را از روي ساير كميت هاي الكتريكي محاسبه مي‌كنند و معمولاً از مفاهيم عملي جهت تخمين‌زدن استفاده مي‌كنند. به عنوان مثال مي‌توان از روش هايي نام برد كه در آنها از اطلاعات *EMF* موتور استفاده شود و يا روش هايي كه از رلوكتانس متغير كه با موقعيت رتور در تغيير است . جهت تخمين موقعيت رتور استفاده مي شود، همچنين روش هايي كه در آنها شار پيوندي موتور جهت تخمين موقعيت استفاده مي‌شود.

۲- روش هاي مدار بسته يا روشهاي مبتني برمشاهده گر ابتدا متغييرهاي مهم (مثل ولتاژ ورودي و جريان خروجي) اندازه‌گيري مي‌شوند سپس با استفاده از الگوريتم هاي مدار بسته و با استفاده از مدل سيستم پارامترهاي مطلوب تخمين زده مي‌شوند. به عنوان مثال از فيلتر توسعه يافته كالمن مي‌توان نام برد كه در آن اساس مدل فضاي حالت موتور *BLDC* و با استفاده از اطلاعات آماري از نويز سيستم، سرعت و موقعيت رتور تخمين زده مي‌شوند.

همان‌گونه كه ذكر شد يكي از روشهاي كنترل بدون سنسور استفاده از اطلاعات نيروي ضد محركه (*BACK EMF*) مي‌باشد. مي‌دانيم در موتور سه فاز اتصال ستاره، تنها دو سيم‌پيچي در يك زمان توان مي‌گيرند. كنترل كننده‌هاي بدون سنسور، سيگنال‌هاي نيروي ضد محركه سيم‌پيچي را كه توان دريافت

نكرده اند تخمين مي‌زنند تا نقطه كموتاسيون را تعيين نمايند.

از سومين هارموني استاتور مي‌توانيم به عنوان اطلاعات موقعيت روتور نيز استفاده كنيم. مشكل كليه روشهاي درايو بدون سنسور، فقدان سيگنال هاي رديابي در حالت توقف مي‌باشد.

کاربردهای موتورهای *d.c* بدون جاروبک

موتورهاي *BLDC* كاربردهاي بسيار متنوعي دارند اين موتورها در جاهايي كه نياز به قابليت اعتماد بالا و نگهداري كم مي باشد استفاده مي شود. به طور كلي كاربردهاي اين موتورها را از دوديدگاه زير مي‌توان مورد بررسي قرار داد:

۱- در جاييكه ديدگاه فني عامل تعيين كننده است و عامل اقتصادي در درجه دوم اهميت قرار دارد به عنوان مثال در صنايع نظامي، هوافضا، رباتيك و ماشين‌افزار كه قابليت اعتماد و كار مطلوب موتور بسيار مهمتر از قيمت موتور مي‌باشد.
۲- در جاييكه نقطه نظرهاي اقتصادي نسبت به فاكتورهاي فني داراي اهميت يكسان و يا حتي بيشتري است. براي مثال در تجهيزات خانگي، پمپ‌ها، و تهويه كه در آنها فاكتورهاي فني مثل نسبت قدرت به وزن وقابليت اعتماد يا فاكتورهاي اقتصادي مثل هزينه اوليه و هزينه‌هاي جاري (انرژي مصرفي و تعمير و نگهداري) مورد توجه مي باشد.

در موتورهاي *BLDC* هرچند قيمت اين موتورها نسبت به موتورهاي القايي وسنكرون معمولي با قدرت يكسان بيشتر است، ولي به دليل راندمان بالا و سرويس‌دهي مطلوب اين موتورها هزينه جاري آنها كمتر است. در بررسي كه از سوي يك شركت سازنده موتورهاي *BLDC* انجام گرفت معلوم شد كه بعد از *100000* ساعت كار اختلاف قيمت اوليه موتور *BLDC* و موتور القايي با توان مشابه به طور كامل جبران مي شود و بعد ازاين مدت كار موتور *BLDC* به دليل راندمان بالاتر، اقتصادي‌تر مي باشد. به عبارت ديگر استفاده از موتور*BLDC* يك سرمايه‌گذاري مناسب ولي با دوره برگشت سرمايه طولاني است.

برخي كاربردهاي موتورهاي *BLDC* شامل موارد زير مي‌باشد:

- ديسك درايوهاي كامپيوتر
- فن‌هاي سرعت متغير

*CDROM*ها و*CD player* و ...

مقايسه موتورهاي *BLDC* با ساير موتورها

ازنقطه نظر فني موتورهاي *BLDC* از مزاياي چون سادگي سيستم كنترل و حداقل نياز به سنسور برخوردار می باشد، ولي در عوض ريپل گشتاور، محدود بودن دامنه سرعت بالا و مقاوم نبودن موتور نسبت به تغيير پارامترها، از معايب كلي اين موتورهاست.

براي آنكه بهتر با كارآيي موتور *BLDC* آشنا شويم، اين موتور را با سه نوع موتور*DC* معمولي، موتور القايي و موتور سنكرون مغناطيس دائم با قدرت برابر مقايسه نموده و مزايا و معايب هر يك ذكر شده است:

۱- مقايسه با موتورهاي *DC* معمولي

موتورهاي *BLDC* نسبت به موتورهاي *DC* معمولي داراي مزاياي زير مي‌باشند:

- پايين‌تر بودن اينرسي رتور و در نتيجه بالا رفتن سرعت پاسخ ديناميكي و كم شدن زمان شتاب گيري و ترمز.
- نسبت توان به وزن بالاتر به خاطر استفاده از مواد مغناطيسي در سيستم تحريك
- حذف شدن جاروبك و در نتيجه حذف جرقه، تلفات و نويز راديويي مربوط به آن
- حذف سيم‌پيچ تحريك و در نتيجه بالا رفتن راندمان

از سوي ديگر موتورهاي *DC* معمولي نيز در مقايسه با موتورهاي *BLDC* اين مزيت ها را دارد:

- پايين‌تر بودن قيمت اوليه
- امكان كنترل شار فاصله هوايي و در نتيجه امكان‌كار درناحيه تضعيف شار
- محدوده دمايي گسترده‌تر

۲- مقايسه با موتورهاي القايي

مزاياي موتورهاي *BLDC* نسبت به موتورهاي القايي هم‌ارزشان به شرح زير مي باشد:

- پايين‌تر بودن اينرسي رتور و در نتيجه بالا رفتن سرعت پاسخ ديناميكي
- حذف جريان مغناطيسي كننده و در نتيجه استفاده از سيستم الكتريكي با توان كمتر
- پايين آمدن تلفات مسي، بالا رفتن راندمان و ضريب توان درايو
- سادگي سيستم كنترل مدار بسته
- عدم نياز به سنسور دقت بالا

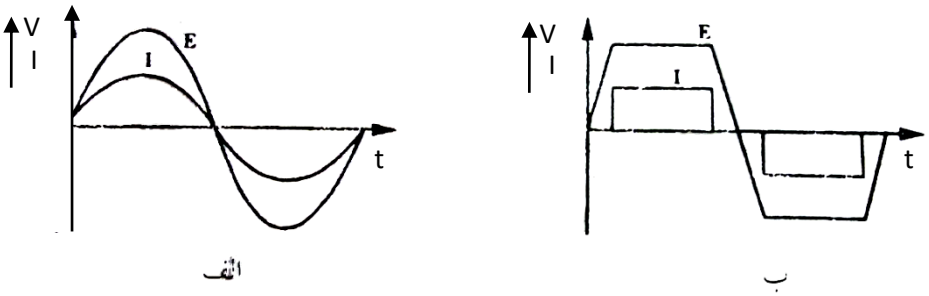
موتورهاي القايي نيز در موارد زير بر موتورهاي *BLDC* برتري دارند:

- گشتاور نسبتاً صاف به خاطر عدم وجود پديده كموتاسيون
- توانايي كار باسيستم كنترل مدار باز
- مقاوم بودن موتور نسبت به تغيير پارامترهاي و همچنين به دماي محيط

همان‌طور كه گفته شد اساس كار دو ماشين *BLDC* و *PMSM* مشابه است ولي در دو مورد باهم اختلاف اساسي دارند:

- شكل موج .ولتاژ ضد محركه در ماشين*PMSM* سينوسي است در حالي كه در *BLDC* ذوزنقه‌اي مي‌باشد.
- شكل موج جريان تغذيه در ماشين *PMSM* سينوسي است اما در *BLDC* مستطيلي مي‌باشد.

در شكل (۱) شكل موجهاي هر دو نوع ماشين نشان داده شده است. اين شكل ها حالتي را نشان مي‌دهد كه مؤلفه‌هاي اصلي شكل موج ولتاژ و جريان در هر يك از اين ماشينها، اختلاف فازي ندارند.



الف ب

شكل موج ولتاژ ضد محركه و جريان تغذيه در ماشين PMSM (الف) و BLDC(ب)

شكل(۱)

ماشين هاي *BLDC* نسبت به *PMSM* از دقت و ظرافت كمتري برخوردارند. زيرا در ماشين هاي *BLDC* براي هر فاز و در مدت يك سيكل گردش روتور، به علت مربعي بودن شكل موج جريان، تنها در چهار نقطه تغيير جريان لازم است در حالي كه در *PMSM* به علت سينوسي بودن شكل موج جريان، مقدار جريان بصورت دائم در حال تغيير است. (شكل و مقدار جريان، تابع وضعيت مكاني روتور است) بنابراين حسگرهاي بكاررفته در سيستم درايو*PMSM* بايد از دقت بالاتري نسبت به *BLDC* برخوردار باشند.

اين امر سبب مي‌شود نوسانات گشتاور در *BLDC* نسبت به *PMSM* بيشتر باشد. البته اين مطلب بدين معني نيست كه ماشين هاي *BLDC* دقيق نيستند. ماشينهاي *BLDC* اغلب ذر سروسيستم ها باكاربرد صنعتي و در سطح تجاري مورد استفاده قرار مي‌گيرند، اما ماشين هاي *PMSM* براي كاربردهاي خاص و در سروسيستم‌هايي به كار مي‌رود كه بايد مشخصه‌هاي كنترلي بسيار دقيق و مطلوبي عرضه كنند. به همين دليل قيمت سيستم هاي شامل*PMSM* بيشتر از *BLDC* است.

۳- مقايسه با موتورهاي *PMSM*

موتورهاي *BLDC* داراي مزيت‌هاي زير نسبت به موتورهاي *PMSM* مي‌باشند:

- سادگي سيستم كنترل مدار بسته
- عدم نياز به سنسور دقت بالا

درمقابل، موتورهاي *PMSM* درموارد زير نسبت به موتورهاي *BLDC* ارجحترند:

- گشتاور صاف
- عملكرد در ناحيه سرعت بالا با قدرت ثابت به كمك تضعيف شار ميدان

موتورهای پله ای

موتر پله اي ابزارهاي مكانيكي هستند كه پالس هاي الكتريكي را به حركت هاي گسسته مكانيكي تبديل مي كنند. چرخشي موتور با پالس هاي ورودي و جهت چرخش آن با توالي پالس ها رابطه مستقيمي دارد . سرعت چرخش محور موتور نيز با فركانس پالس ورودي و گام چرخش به ازای هر پالس رابطه مستقيم دارد .

٤-٧-١ ويژگي هاي موتور پله اي

مهم ترين ويژگي موتور پله اي اين است كه به ازا هر پالس اعمال شده ، رتور به اندازه يك زاويه ثابت مي چرخد . مقدار اين زاويه را زاويه پله مي گويند . با كاهش زاويه پله دقت تعيين موقعيت افزايش مي يابد .

دست يافتن به زاويه پله كوچك يكي ديگر از ويژگي هاي موتورهاي پله اي است . با دانستن تعداد پله ها در هر دور مي توان زاويه پله را از رابطه زير بدست آورد :

$$\theta = 360/s$$

كه S نماد تعداد پله ها و θ زاويه پله مي باشد .

موتورهاي پله اي گشتاور استاتيك t_1 - static torque - بزرگي توليد مي كنند . اين امر موتور را قادر به راه اندازي و توقف سريع مي كند . در راه اندازي ، موتور گشتاور بزرگي دارد كه براي حركت از موقعيت سكون و غلبه بر گشتاور بار ، مناسب است . به همين علت است كه فاصله هوايي رتور و استاتور تا حد امكان كوچك طراحي مي شود . به طور كلي هرچه گشتاور نگهدارنده t_2 - torque holding- بزرگتر باشد خطاي موقعيت (كه در اثر بار به وجود مي آيد) كوچكتر مي شود .

در موتورهاي پله اي مي توان به بازه وسيعي از سرعت ها دست يافت زيرا سرعت متناسب فركانس پالس ورودي است . به همين دليل مي توان در زماني كه بار به محور موتور متصل است به سرعت چرخش بسيار كم نيز دست يافت .

عامل مهمي كه كيفيت موتور پله اي را مشخص مي كند دقت در تعيين موقعيت موتور مي باشد . خطاي تعيين موقعيت در موتور پله اي معمولي ٣ تا ٥ درصد در هر پله است . از ويژگي مهم خطاي تعيين موقعيت جمع نشدن خطاها است . يعني خطا از يك پله تا پله بعدي با هم جمع نمي شود .در موتورهاي پله اي تا حد ممكن بايد پاسخ به پالس ورودي سريع باشد . علاوه بر آن نه تنها راه اندازي

سريع بلكه توقف سريع نيز ضروري مي باشد . اگر در هنگام كار موتور وقفه اي ايجاد شود موتور بايد قادر به توقف در موقعيت آخرين پالس باشد. اين ويژگي ديناميكي خوب ناشي از نسبت گشتاور به اينرسي بالا در يك موتور پله اي در مقايسه با موتورهاي AC معمولي است .

به دليل نبود جاروبك ها و قسمت هاي تماسی در اين موتور ها قابليت اطمينان اين موتورها بالا مي باشد. به همين علت عمر آن ها بيشتر است و تنها بستگي به عمر قسمت های چرخان آن دارد . كنترل موتورهاي پله اي به صورت حلقه باز با دقت زياد يكي از مهم ترين ويژگي هاي آن مي باشد . پاسخ موتور به پالس هاي ديجيتال ورودي يك حلقه كنترل باز را ايجاد مي كند . كنترل حلقه باز بدين معنا است كه در هنگام كار نيازي به دانستن موقعيت روتور نمي باشد . اين روش كنترل نيازي به سنسورهاي گران قيمت و ابزار فيدبك (مانند optical encoder و ...) ندارد ، زيرا موقعيت رتور به سادگي با نگه داشتن الگوي پالس ورودي مشخص مي شود . اما موتورهاي پله اي داراي معايبي نيز هست از جمله مي توان به وقوع رزونانس (تشديد) در مواقعي كه كاملا كنترل نشوند و عدم كارايي مطلوب در سرعت هاي بسيار بالا اشاره كرد .

چه هنگام از موتورهاي پله اي استفاده مي كنيم ؟

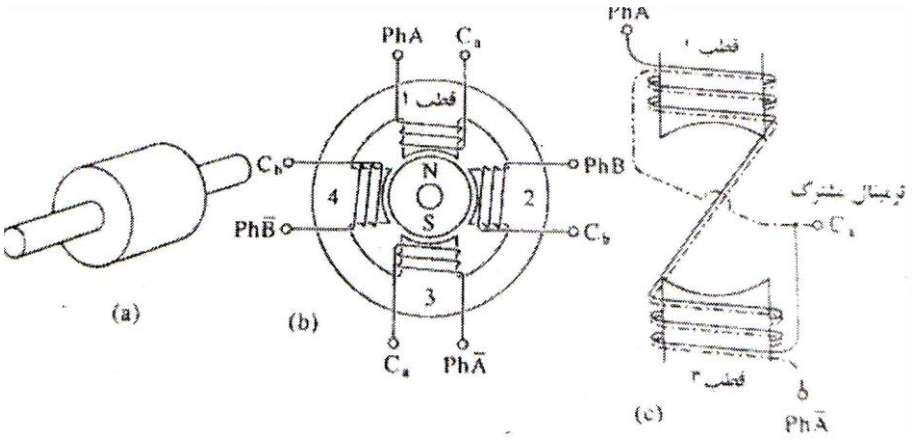
زماني كه نياز به حركت هاي كنترل شده باشد استفاده از موتورهاي پله اي انتخاب مناسبي است. از اين موتورهادر مواقعي كه نياز به كنترل زاويه گردش و سرعت و موقعيت و سنكرونيزم است مي توان استفاده نمود. به دليل مزيت هاي گفته شده موتورهاي پله اي در كاربردهاي مختلف جايگاه ويژه اي دارند . موتورهاي پله اي در پرينترها ، تجهيزات اداري با قابليت هاي گسترده ، هارد ديسك ها ، تجهيزات پزشكي ، ماشين هاي فاكس ، تجهيزات خودروها و بسياري موارد ديگر بكار گرفته می شوند.

انواع موتور های پله ای:

موتور پله ای رلوکتانسی- موتور های پله ای نوع مغناطیس دائم PM-موتور پله ای مرکب Hybrid

٤-٧-٢ موتورهاي PM :

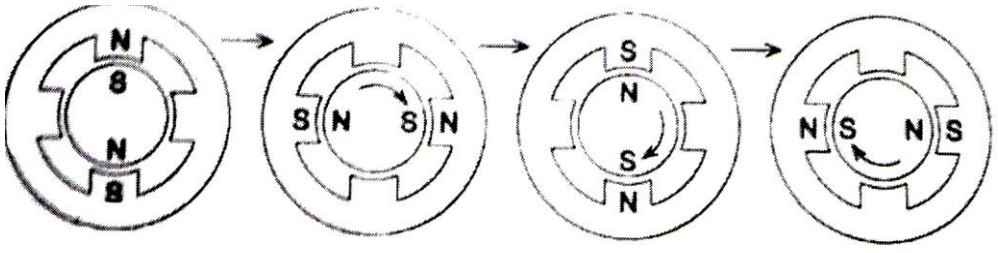
در ساختمان اين موتورها از مواد مغناطيسي دايم استفاده مي شود . رتور موتور پله اي PM دار به اندازه موتور پله اي VR دندانه ندارد و غالباً رتور آن ها از مواد مغناطيسي دو قطبي كه موازات محور رتورقرار دارد ساخته مي شود. شكل زير يك موتور PM را نشان مي دهد كه چهارقطب روي استاتور و يك مغناطيس دايم دو قطبي روي رتور دارد .



شكل(٤-٣٨) موتور PM ابتدايي (a) روتور سيلندري (b) هسته استاتور و سيم پيچي نمادين (c) سيم پيچي دو رشته اي واقعي

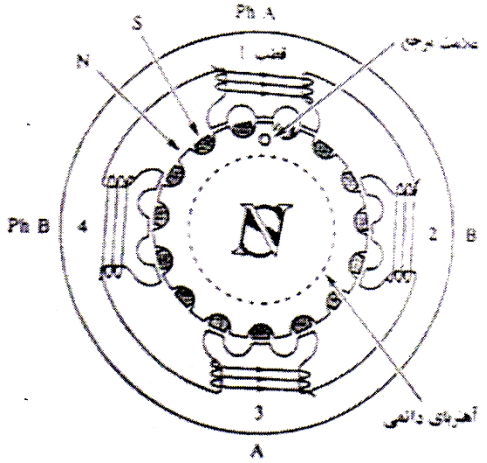
سيم پيچ فاز A روي قطب هاي يك و سه سيم پيچ فاز B روي قطب هاي ٢ و ٤ پيچيده شده اند . هنگامي كه فاز A تحريك مي شود در قطب ١ پلا ريته N و در قطب ٣ پلا ريته S به وجود مي آيد . اگر فاز $\bar{A}$ تحريك شود پلاريته معكوس مي شود . اين بدان معني است كه جهت جريان تحريك در جهت چرخش موتور دخيل مي باشد.

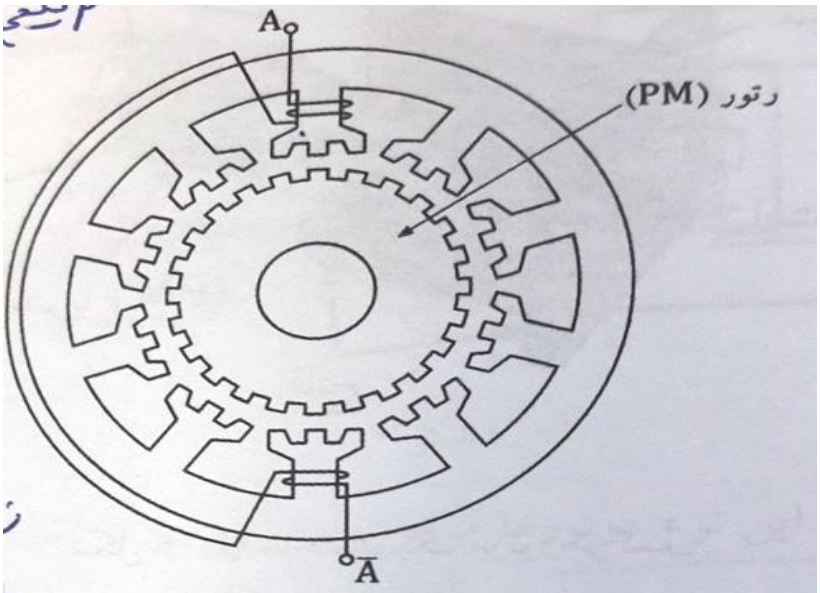
بر خلاف VRM ها اگر جهت تحريك به $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ باشد رتور در جهت ساعت گرد با پله هاي ٩٠ درجه اي مي چرخد . از ويژگي هاي موتورهاي PM ارزانی و زاويه كوچك پله می باشد. زاويه پله در نوع عملي اين نوع موتورها حدود ٧,٥ تا ١٥ درجه است . يك موتور PM در مقايسه با يك موتور VR هم اندازه آن گشتاور بزرگتري ايجاد مي كند . همچنين به علت مغناطيسي بودن رتور ، موتور PM داراي ميرايي بهتري نسبت به موتورهاي VR مي باشد .



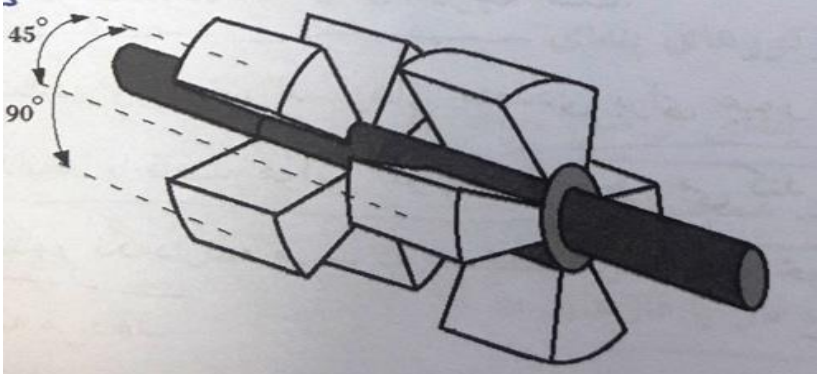
شكل (٤-٣٩) پله ها در يك موتور PM

موتورهاي مركب (Hybrid) : در شكل زير يك موتور پله اي از نوع H ديده مي شود .





شکل ۴-۳۸

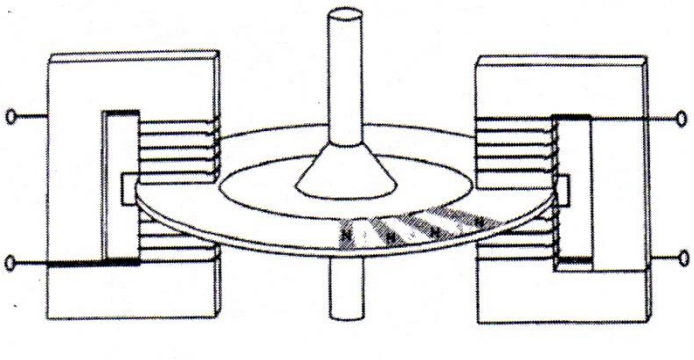


شکل ۴-۳۹) موتور پله‌ای دو پشته

موتورهاي پله اي نوع مركب از نوع PM گران تر هستند ولی زاويه پله در اين نوع موتور كوچكتر بوده و مشخصه گشتاور سرعت بهتر می باشد. يرای مثال زاويه پله در يك نوع موتور پله اي هيبريد عملي حدود ۰,۹ تا ۳,٦ درجه است .

به دليل وجود دندانه ها روي رتور مسيرهايي براي عبور شار مغناطيسي ايجاد مي شود و شار از محل دندانه ها با فاصله هوايي كوچكتر عبور مي كند كه اين امر موجب افزايش گشتاور نگه دارنده مي شود و مشخصه ديناميكي گشتاور را در مقايسه با موتورهاي VR و PM بهتر مي كند .

امروزه از موتورهاي نوع VR استفاده نمي شود و دو نوع PM و هيبريد بيشترين استفاده را دارند . اگر طراح مطمئن نباشد كه كدام نوع از موتورهاي پله اي خواسته هايش را فراهم مي كند ابتدا بايد محاسبات طرح خود را با نوع PM انجام دهد ، با توجه به اين كه نوع هيبريد چندين برابر گران تر از نوع PM است . در صورتي كه طراح به خواسته هاي مطلوب خود نرسيد انتخاب صحيح نوع هيبريد خواهد بود . طرح هاي ويژه اي از موتورهاي پله اي نيز وجود دارد . يكي از آن ها موتور مغناطيسي ديسكي است . در اينجا رتور از مواد مغناطيسي كمياب بصورت ديسك ساخته مي شود .(مانند شكل ٤-٤٣)



شكل(٤-٤٣)

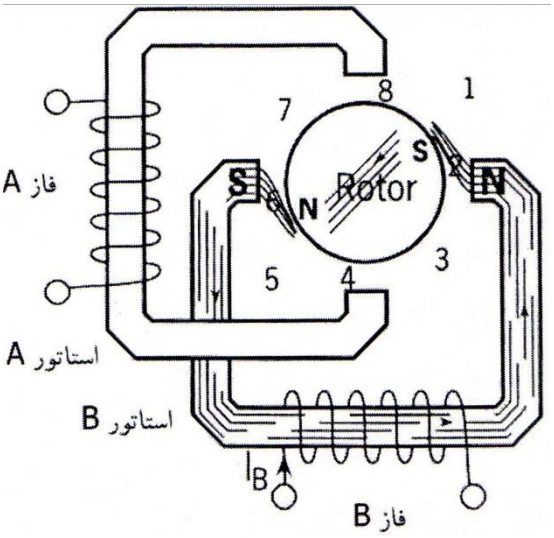
مهمترين مزيت اين نوع موتور مي توان به پايين بودن اينرسي ، بزرگ بودن گشتاور و نبود كوپل مغناطيسي بين دو سيم پيچ استاتور است. اين ويژگي ها در برخي از كاربردها بسيار مهم و ضروري مي باشد .

توليد گشتاور در موتورهاي پله اي :

گشتاور توليد شده در موتورهاي پله اي را مي توان از تئوري ميدان هاي مغناطيسي گردان و يا از تئوري انرژي و يا كوانرژي محاسبه كرد . در اينجا از تئوري ميدان هاي مغناطيسي گردان براي گشتاور توليد شده در موتورهاي پله اي استفاده كنيم .

٤-٧-٢-٢ ميدان هاي مغناطيسي گردان :

زماني كه سيم پيچي يك فاز موتور پله اي توسط جرياني تغذيه مي شود ميدان مغناطيسي در استاتور ايجاد مي شود . جهت ميدان مغناطيسي توسط قانون دست راست تعيين مي شود . شكل زير مسير ميدان مغناطيسي را زماني كه فاز B در جهت نشان داده شده تحريك شود نشان مي دهد .



براي مينيمم شدن رلوكتانس ، رتور در جهت ساعت گرد مي چرخد تا اين كه قطب S در مقابل قطب N استاتور B (در موقعيت ٦) قرار بگيرد . براي ايجاد يك حركت چرخشي سيم پيچي هاي استاتور را به گونه اي تحريك مي كنيم كه يك ميدان مغناطيسي گردان به وجود آورد و رتور توسط آن جذب شده و به دنبال آن حركت كند .

به طور كلي گشتاور توليد شده در توسط موتورهاي پله اي به عواملي چون تعداد پله ها، جريان در سيم پيچي هاي استاتور و نوع موتورپله اي وابسته است . در يك موتور پله اي هنگامي كه ميدان مغناطيسي رتور و استاتور به دنبال يكديگر حركت كنند گشتاور توليد مي شود . استاتور از يك ماده مغناطيسي با نفوذ پذيري بالا ساخته مي شود . اين امر موجب مي شود تا شارهاي مغناطيسي در قطب هاي استاتور متمركز شود . گشتاور خروجي توليد شده توسط موتور پله اي متناسب با چگالي شار مغناطيسي ايجاد شده توسط سيم پيچي هاي تحريك است . مهم ترين رابطه اي كه شدت ميدان مغناطيسي را بيان مي كند رابطه $H = (N.I/L) / L$ است

، كه در آن N تعداد دور سيم پيچي و I جربان و H شدت ميدان مغناطيسي و L طول مسير شار مغناطيسي است . اين رابطه نشان مي دهد كه چگالي شار مغناطيسي و گشتاور نتيجه از آن متناسب با تعداد دور سيم پيچي ها و جريان است و با طول مسير مغناطيسي رابطه عكس دارد . اين رابطه نشان مي دهد كه با تغيير پارامترهاي سيم پيچي مي توان گشتاورهاي متفاوتي داشت .

ماشین های رلوکتانس متغییر :

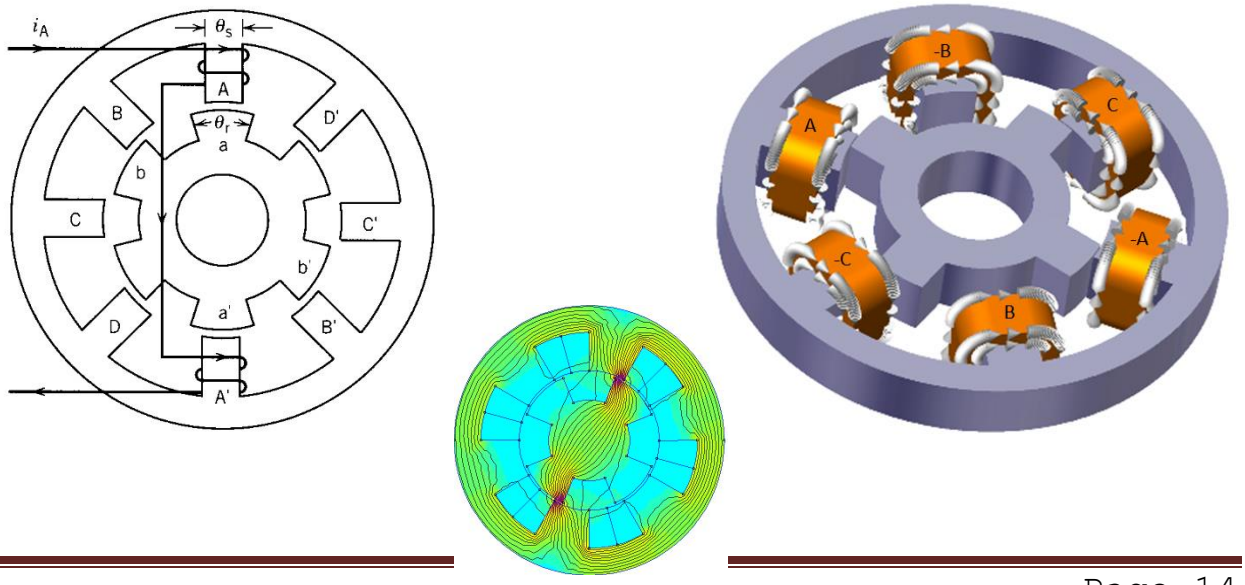
موتور رلوکتانس متغییر $Variabl\ Reluctance\ Motor\ (VRM)$ساده ترین نوع ماشین های الکتریکی است در این نوع موتور استاتور از تعدادی قطب مجهز به سیم پیچ هایی به نام فاز تشکیل شده و رتور آن نتها دارای قطب برجسته می باشد.گشتاور موتور از میل به هم راستایی قطب های آهنی رتور با میدان مغناطیسی حاصل از تحریک قطب های استاتور نتیجه میشود،به عبارت دیگر اثر گشتاور بر روی رتور به گونه ای است که شار مغناطیسی پیوندی در سیم پیچ تحریک شده استاتور ماکسیموم شود.گشتاور تولید شده در ماشین ها را می توان با در نظر گرفتن این حقیقت که اندوکتانسهای سیم پیچی این استاتور تابعی از موقعیت زاویه ای رتور است،محاسبه کرد اگر چه ایده کلی به گشتاور به روش رلوکتانس متغییر از مدت ها پیش مطرح بوده ولی اخیرا این موتور ها کاربرد های وسیعی پیدا کرده اند.

گر چه این موتور ها از ساختمان بسیار ساده ای برخوردارند اما کنترل تحریک بسیار پیچیده ای دارند و باید موقعیت رتور را در هر لحظه شناسایی کرد تا فاز مناسب استاتور برای تولید گشتاور تحریک شود.

به همین دلیل به این نوع موتور ها $SRM(Switched\ Reluctance\ Motor)$ نیز می گویند.

امروزه با توجه به کاهش قیمت تجهیزات میکروالکتریکی و الکترونیک قدرت این موتورها با موتور های DC والقایی رقابت جدی دارند.

شکل زیر به عنوان نمونه یک موتور ۴ فاز SRM را نشان می دهد.



اگر سیم پیچ های استاتور توسط جریان DC تغذیه شوند قطب های استاتور مغناطیسی شده و دنده های رتور در جهت قطب های مغناطیسی شده استاتور قرار می گیرند. به این ترتیب رتور می چرخد و حرکت گردشی به وجود می آید.

نکته :

$$\theta = \frac{360}{m.Pr} \qquad \theta = \frac{360}{S}$$

$S = m.P_r$ تعداد پله در هر دور

m : تعداد فاز ماشین

P_r : تعداد قطب روتور

اگر $P_r = 20$

ماشین ۳فاز $m = 3$

این موتور یک دور کامل $(360°)$ را با (۶۰) پله طی می کند.

یعنی در هر پله $6° = \frac{360}{60}$ $(۶°)$ را طی می کند

* بنابراین تعداد دنده های استاتور عمل مستقیمی در تعیین زاویه پله نیست.

P_r : تعداد قطب های روتور

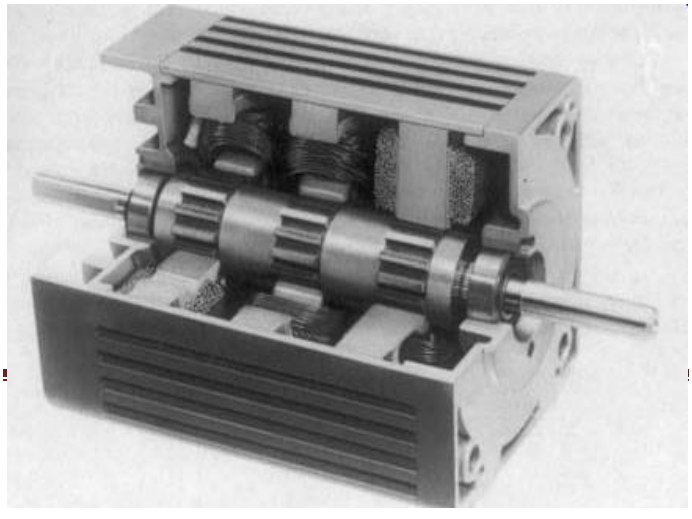
P_s : تعداد قطب های استاتور

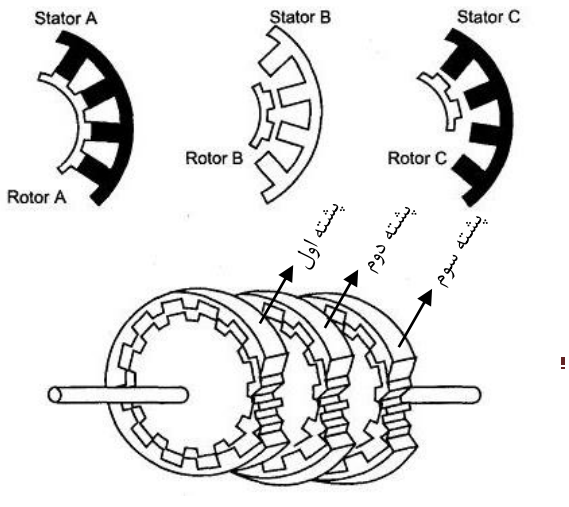
$\frac{m}{2}$: تعداد فازها

$$=> \ P_r = P_s \ \pm \frac{m}{2}$$

برای کوچکتر کردن زاویه پله از موتور های چند پشته ای $(Multi\ Stack)$ استفاده میشود.

تاکنون موتور های تک پشته ای بوده اند یعنی فازها در یک صفحه قرار گرفته اند.در موتورهای چند پشته ای $(Cascade)$ هر پشته با پشته دیگر اختلاف زاویه ای دارد و استاتور و رتور دارای گام دنده ای یکسانی می باشند.در شکل زیر یک موتور سه پشته ای به نمایش گذاشته شده است.





گشتاور در ماشین سوئیچ رلوکتانس:

با توجه به اینکه در موتورهای رلوکتانسی تحریک همزمان فازها به ندرت اتفاق می‌افتد و عملاً فازها مستقل از هم تحریک می‌شوند. روابط شار دور بر حسب جریان دارای جز کوپلینگ متقابل نمی باشد از این رو در موتور رلوکتانسی روابط شار دور بر حسب جریان فازها طبق روابط زیر به توصیف کشیده می شود.

$$\lambda_1 = L_{11}(\theta)i_1 = L(\theta)i_1 \qquad (1)$$
$$\lambda_2 = L_{22}(\theta)i_2 = L(\theta - 90)i_2 \qquad (2)$$

ماشین یک SRM دو قطبی می باشد، که محورهای مغناطیسی دوفاز ۹۰° با هم اختلاف فاز دارند.

رابطه گشتاور الکترومغناطیسی این سیستم را می توان از طریق مشتق نسبی تابع کوانرزی به تغییر مکان زاویه ای (θ) محاسبه کرد.

$$T = \frac{\partial \omega_{Fid}(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \qquad (3)$$
$$\omega_{Fid} = \frac{1}{2}L(\theta)i_1^2 + \frac{1}{2}L(\theta - 90)i_2^2 \qquad (4)$$

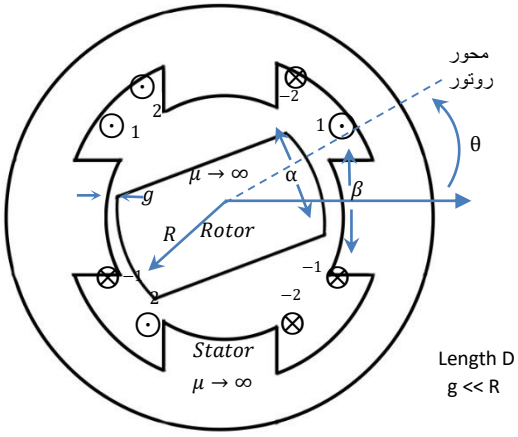
در نهایت داریم:

$$T = \frac{1}{2}i_1^2\frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2}i_2^2\frac{dL(\theta - 90)}{d\theta}$$

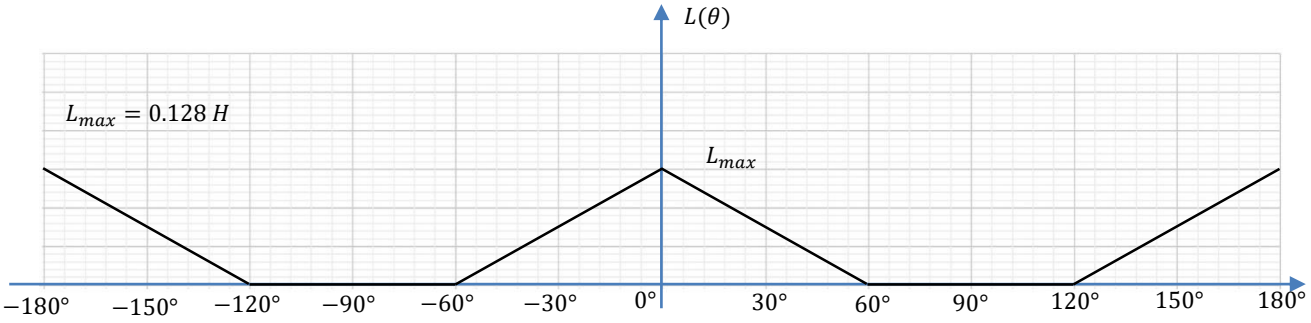
مثال:

SRM شکل زیر را در نظر بگیرید:

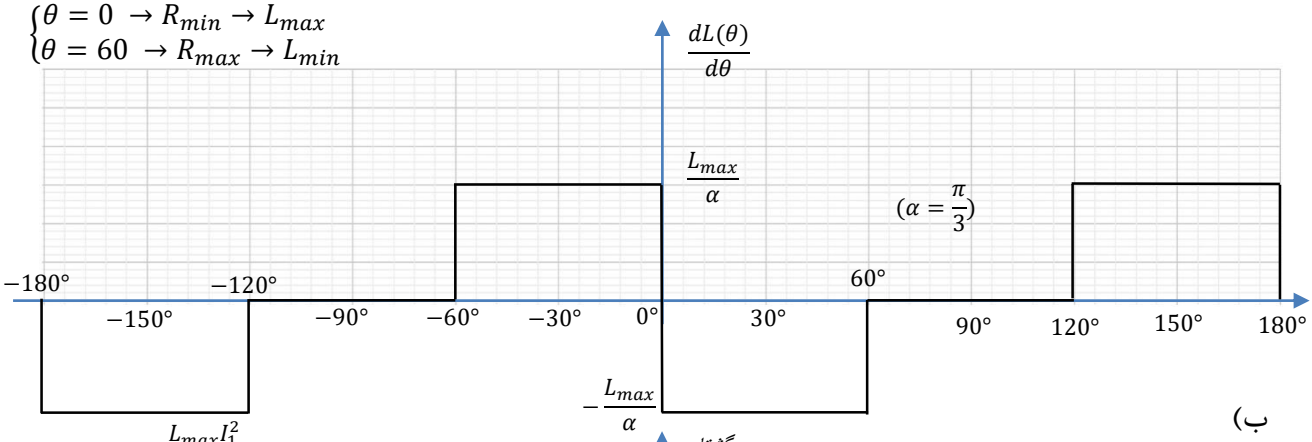
در این ماشین گشتاور را بدست آورید و برای حالت های مختلف تحلیل کنید:



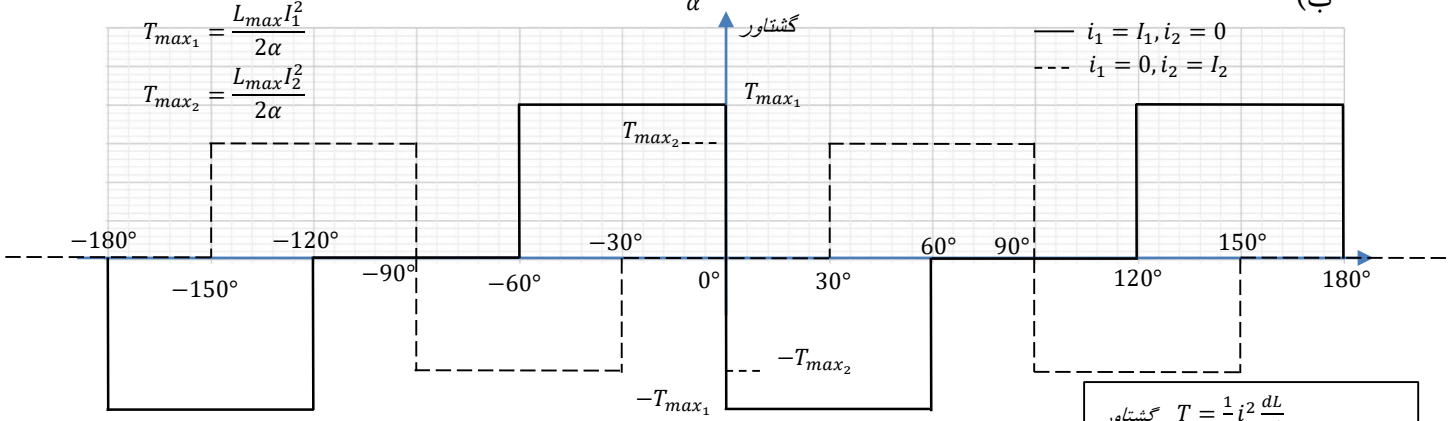
الف)



$$\begin{cases}\theta = 0 \rightarrow R_{min} \rightarrow L_{max} \\ \theta = 60 \rightarrow R_{max} \rightarrow L_{min}\end{cases}$$



ب)



گشتاور $T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$

گشتاور کل ماشین $= T_1 + T_2$

ایراد طراحی دارد $T = 0 \leftarrow \theta = 0$

$$\theta = 0 \rightarrow R_{min} \rightarrow L = \frac{N_1}{R} \rightarrow L_{\max} \qquad T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

$$\theta = 60 \rightarrow R_{max} \rightarrow L_{min}$$

گشتاور کل ماشین $T_1 + T_2 \rightarrow$ کل $T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta}$

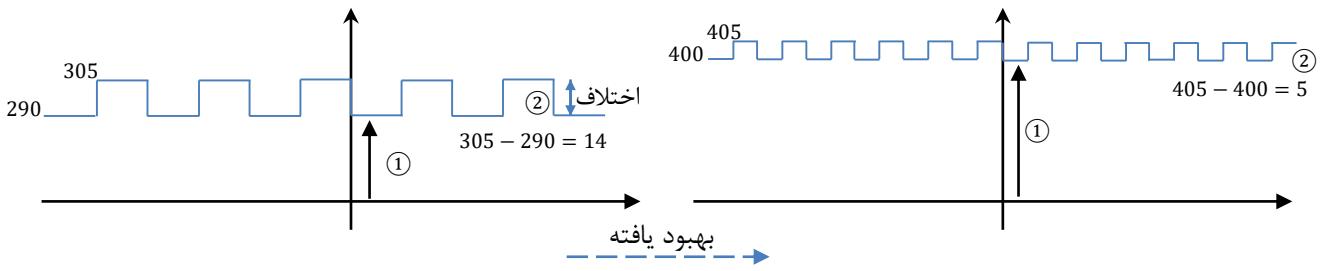
ایراد طراحی دارد $T = 0 \leftarrow \pm 90° \pm 180°$

توجه کنید که گشتاور در $\theta = 0$ مستقل از سطح جریان فازهای ۱و۲ بوده و برابر صفر است. این مشکلی است که در ترکیب موتور رلوکتانس متغیر ۴/۲ شکل (۵_۳) وجود دارد چرا که روتور در این موقعیت قفل می‌شود. (این شرایط در زوایای $\theta = \pm 90°, \pm 180°$ نیز اتفاق می‌افتد) و در این ترکیب از موتورها در زوایای مذکور گشتاور الکتریکی تولید نمی‌شود.

در $\theta = 45°$ هر دوفاز گشتاور تولید می‌کنند. گشتاور فاز ۱ منفی در حالی که گشتاور فاز۲ مثبت است به علت برابر بودن جریان فازها گشتاور معادل و مخالف هم بوده و در نتیجه گشتاور خالص مساوی صفر است. لیکن مشابه حالت $\theta = 0°$ نبوده و با انتخابی مناسب جریان در هر فاز، می توان گشتاور مثبت و یا منفی را تولید کرد. در $\theta = 75°$ فاز ۱ تولید گشتاور نمی‌کند در حالی که فاز۲ تولید یک گشتاور مثبت با دامنه T_{max} می‌نماید. توجه کنید که در این موقعیت هیچ ترکیبی از جریان فازها گشتاور منفی تولید نمی‌کند، چرا که گشتاور فاز ۲ مثبت (یا صفر) است.

موتور مثال (۱) ویژگی‌های مهمی از VRMها را نشان می‌دهد. واضح است که این موتورها باید به گونه‌ای طراحی می‌شوند که این نقاط ضعف را بپوشاند. البته این مشکل مربوط به موتورهایی است که نسبت $\frac{m_{\text{استاتور}}}{n_{\text{روتور}}}$ در آنها عدد صحیحی می‌باشد.

در نهایت چنانچه موتور درست طراحی شده باشد شکل کلی گشتاور که ناشی از جمع گشتاور فازهای مختلف است، به صورت شکل زیر خواهد بود.



هدف:

۱- بالا بردن سطح کلی گشتاور

۲- کم کردن اختلاف گشتاور (کم کردن فاصله ۲ سطح، High، Low)

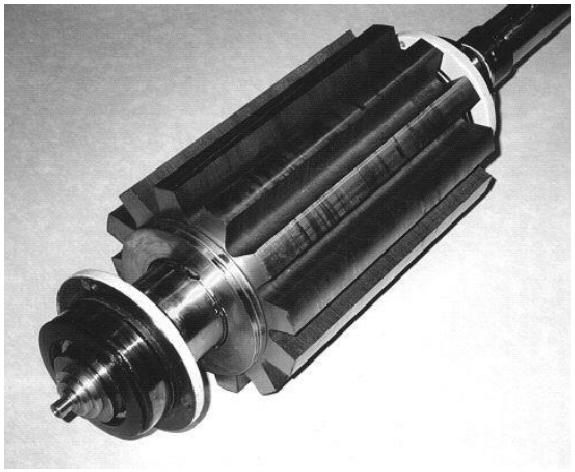
برای رسیدن به این هدف به دو صورت می‌توان اقدام کرد:

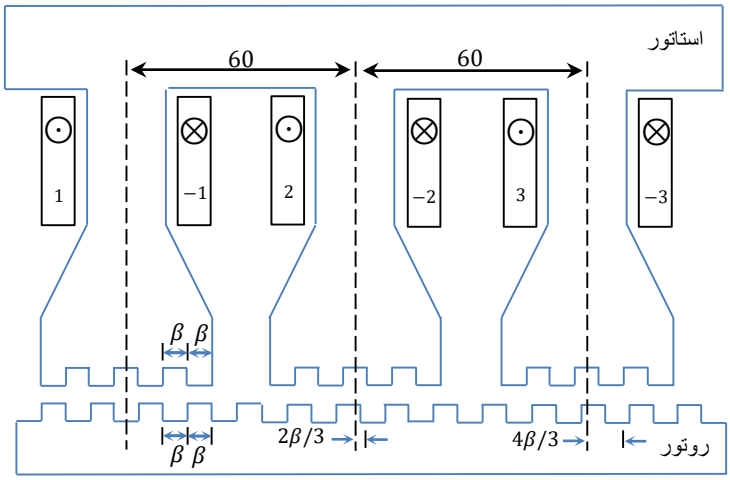
۱- بهبود طراحی ماشین

۲- طراحی مدار یا درایو بهتر

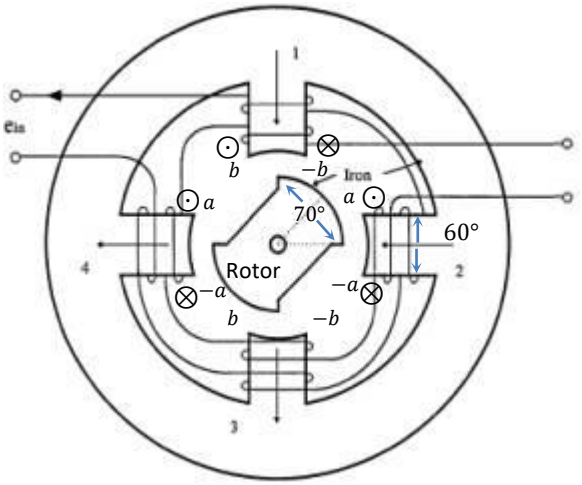
۱- دست بردن در طراحی ماشین:

یکی از این کارها زیاد کردن تعداد قطب‌های استاتور و روتور است به شکل زیر VRM کنگره‌ای می گویند.

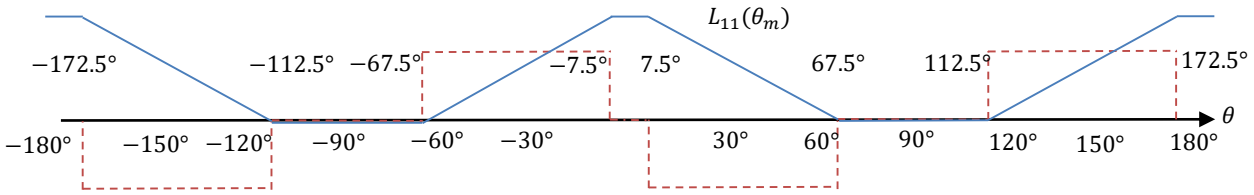




۲- بیشتر کردن دهانه قطب روتور نسبت به استاتور که شکل زیر را برای پروفیل L نتیجه می دهد.



$$\frac{dL_{11}(\theta_m)}{d\theta_m}$$

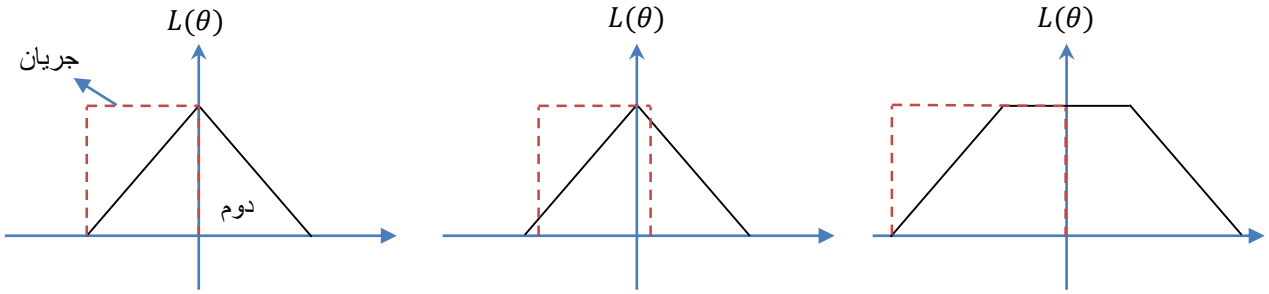


همانطور که می‌دانیم گشتاور در ماشین SRM از حاصلضرب مجذور جریان در $\frac{dL}{d\theta}$ بدست می آید

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

i^2 که مثبت است، بنابراین $\frac{dL}{d\theta}$ علامت گشتاور ماشین را تعیین می‌کند. ما باید توسط درایو طوری به ماشین جریان بدهیم که جریان در محدوده $\frac{dL}{d\theta}$ مثبت قرار گیرد، به عنوان مثال شکل زیر را در نظر بگیرید، جریانی که موتور می دهیم باید در این بازه از $-40°$ تا 0 اعمال گردد و به 0 برسد. مثلاً جریان در $30°$ اعمال شود، چنانچه جریان وارد ناحیه دوم گردد که $\frac{dL}{d\theta}$ منفی است، گشتاور منفی ایجاد می‌شود. بنابراین باید درایوهایی طراحی گردد که جریان را در محدوده $\frac{dL}{d\theta}$ مثبت اعمال نماید.

از طرفی دیگر چنانچه دهانه روتور از دهانه‌ی استاتور بیشتر گردد، یک ناحیه‌ی مرده برای L ایجاد می گردد و به جریان زمان بیشتری برای صفر شدن می دهد.



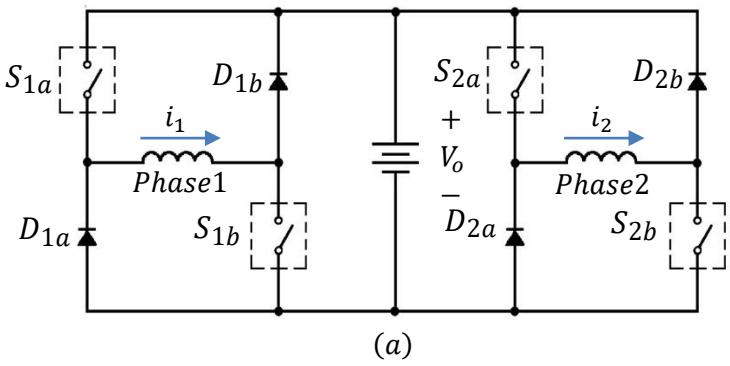
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}$$

گشتاور منفی است

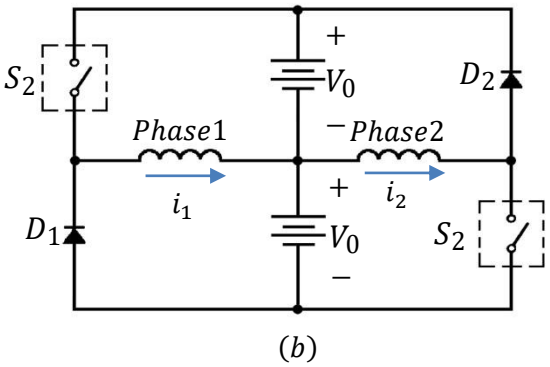
دهانه روتور بزرگتر از دهانه استاتور است گشتاور منفی نداریم

مدارات درایو در موتور SRM

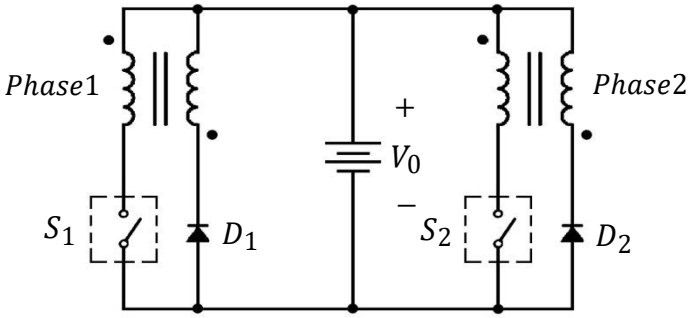
سه نمونه از درایو یک موتور SRM در زیر نمایش داده شده است



(a)

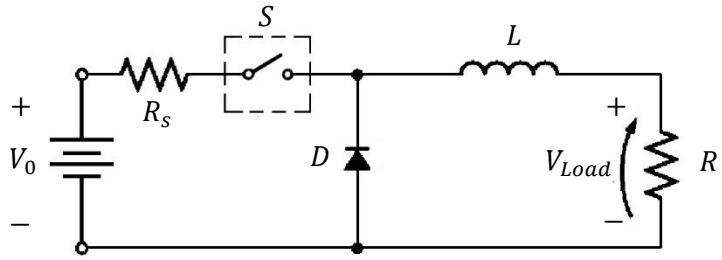


(b)



(c)

برای توضیح سه مدار بالا ابتدا فرض می کنیم در ساده‌ترین حالت مدار شکل زیر را داشته باشند



(d)

اگر هیچ دیود هرزگردی در مدار نباشد همگام باز شدن کلید جریان شروع به افت کرده و لذا یک ولتاژ منفی دو سر سلف ظاهر می شود $[L\frac{di}{dt} < 0]$ تا جریان را داخل سلف ثابت نگه دارد. این ولتاژ به اندازه‌ای بزرگ است که جریان را در کلید (اغلب به شکل یک جرقه) بر قرار می سازد و تا زمانی که تمام انرژی سلف در مقاومت ها هدر شود دوام دارد.

حضور دیود هرزگرد شرایط را به طور قابل ملاحظه‌ای عوض می کند. زیرا همچنانکه ولتاژ سلف شروع به منفی شدن می کند دیود به صورت مستقیم بایاس شده و یک مسیر دیگر برای جریان سلف به وجود می آورد. در این مدار تمام انرژی فاز هنگام قطع کلید تلف می‌شود.

شکل (a) شاید ساده‌ترین حالت تحریک فازها باشد. برای هر فاز دو کلید و دو دیود منظور شده است. برای مثال برای انرژی دار کردن فاز ۱ بایستی هر دو کلید S_1 وS_2 بسته شود. این عمل باعث می‌شود که سیم‌پیچ فاز مستقیماً به دو سر منبع وصل شده و جریان i_1 در جهت نشان داده شده جاری گردد. حال اگر کلید باز شود $\frac{di}{dt}$ منفی شده و یک ولتاژ در دو سر سیم‌پیچ فاز در جهتی به وجود می‌آید که دیودهای D_1وD_1' به صورت مستقیم بایاس شود. در نتیجه جریان به طور پیوسته از طریق سیم‌پیچ فاز جاری می گردد، که به یک پلاریته معکوس به دو سر منبع متصل شده است به طوری که جریان را اجباراً به صفر کاهش می‌دهد. در مدار شکل(d) تمام انرژی مغناطیسی که در سلف ذخیره شده است. در زمان باز شدن کلید هدر می رود (در مقاومت سلف و دیود هرزگرد) و جریان از طریق دیود هرزگرد به صفر کاهش می‌یابد. در صورتی که در شکل (a) هنگام باز شدن کلیدها انرژی به منبع بر می گردد و از تلف شدن انرژی جلوگیری می‌شود . عیب این مدار این است که از دو کلید و دو دیود برای هر فاز استفاده کرده است.

شکل (b) ترکیبی دیگر از مدار VRM را نشان می دهد این ترکیب نیاز به یک منبع دوبل (یعنی دو منبع با ولتاژ V_0) دارد اما فقط یک کلید و یک دیود در هر فاز بکار گرفته شده و وصل شدن کلید S_1 منبع DC بالایی را به سیم‌پیچ فاز ۱ مرتبط می سازد. باز کردن کلید منجر به انتقال جریان فاز به دیود D_1 شده که سیم‌پیچ را به منبع DC بالایی اخذ و مازاد از طریق منبع پایین دریافت می شود. توجه کنید که به خاطر تقارن و برابری انرژی تأمین شده از هر منبع، فاز۲ به صورت معکوس اتصال یافته به طوریکه از منبع پایین تغذیه و به منبع بالا انرژی مازاد را پس می دهد.

عیب اصلی در ترکیب شکل (b) نیاز به دو منبع است. ضمناً به هنگام باز شدن کلید، ولتاژ $2V_0$ به دو سر آن اعمال می شود. یعنی وقتی که دیود D_1 به صورت مستقیم بایاس شده و کلید به دو سر دو منبع اتصال دارد.

بنابراین کلید در شکل (b) باید قوی‌تر انتخاب گردد.

سومین نوع انتورتر در شکل (c) دیده می‌شود. این ترکیب فقط نیاز به یک منبع DC داشته و از یک کلید و دیود برای هر فاز استفاده شده است این ترکیب عمل برگشت انرژی را با استفاده از سیم‌پیچ دو المانه هر فاز با

سیم‌پیچ مجزا با کوپلینگ کامل پیچیده سده است این دو سیم‌پیچ به صورت اولیه و ثانیویه یک ترانس عمل می‌کنند.

وقتی کلید S_1 بسته است، سیم‌پیچ اولیه فاز انرژی دار می‌شود. با باز شدن کلید ولتاژی در سیم‌پیچ ثانویه القا شده (به پلاریته که در شکل (c) با نقطه نشان داده شده توجه شود) دیود D_1 به صورت مستقیم بایاس می‌شود. در نتیجه‌ی جریان از سیم‌پیچ اولیه به سیم‌پیچ ثانویه انتقال یافته و پلاریته به گونه‌ای است که جریان در فاز به صفر کاهش یافته و انرژی را به منبع باز می‌گرداند

اگر چه در این شکل محرکه الکتریکی تنها به یک منبع DC نیاز دارد ولی کلید باید ولتاژی بیش از $2V_0$ را تحمل نماید و نیاز به یک سیم‌پیچ دو المانه در هر فاز ماشین عیب دیگر آن می باشد.