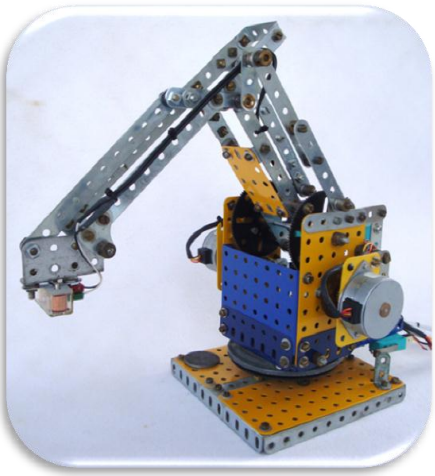
مقدمات

- موتورهای پله‌ای به دلیل قابلیت تبدیل پالس‌های دیجیتال به حرکت مکانیکی به سادگی توسط میکرو کنترلرها و کامپیوترها قابل کنترل هستند.
- محور این موتورها به ازای هر پالس یگ گام حرکت نموده و در هر گام از حرکت به اندازه معین (بر حسب درجه) جابجا می‌شود. مقدار این جابجایی معمولاً بین ۱/۸ تا ۹۰ درجه است که بستگی به ساختار موتور و روش درایو آن دارد.
- از آنجایی که موقعیت محور موتور پله‌ای به ازای تعداد پالس مشخص معلوم است، این موتورها برای کنترل موقعیت حلقه باز (Open Loop) بسیار مناسب هستند. البته در شرایطی که موتور به درستی انتخاب گردد.
- گشتاور این موتورها بین ۱ μN.m (موتورهایی به قطر ۳ میلی متر) تا ٤٠ N.m (موتورهایی با قطر ۱۵ سانتی متر) و حتی بیشتر متغیر است.
- موتورهای پله‌ای امروزی قادرند چند صد هزار گام در یک ثانیه طی کنند و با سرعتی در حد ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه بچرخند.

کاربردها

کنترل موقعیت در انواع کاربردها از جمله:

- رباتیک
- درایو فلاپی و CD و ...
- دستگاه‌های اسکنر، پرینتر، کپی، پلاتر و ...
- CNC
- تجهیزات پزشکی
- خودروها
- و ...



مزایای موتورهای پله‌ای

- قیمت پایین
- استحکام بالا
- سادگی ساختار
- قابلیت اطمینان بالا (عدم وجود جاروبک)
- مدارهای درایو نسبتاً ساده
- امکان کنترل مستقیم توسط PC و میکرو کنترلرها
- تنوع بالا در انتخاب
- عدم تجمع خطای موقعیت در گامهای متوالی
- عملکرد دو جهتی
- گشتاور نگهدارنده (در انواع PM و هیبرید)
- گشتاور بالا (در اندازه یکسان، چهار برابر موتور DC و دو برابر BLDCM) حتی در سرعت پایین
- عدم نیاز به جعبه دنده
- عدم نیاز به تعمیر و نگهداری
- عدم نیاز به تنظیم جهت پایداری
- عدم نیاز به مدارهای فیدبک
- امکان استفاده در تمامی محیط ها
- قابلیت توقف لحظه‌ای بدون آسیب دیدن موتور

معایب موتورهای پله ای

- امکان بروز رزونانس و زمان مورد نیاز بالا برای رسیدن به حالت دائم
- عملکرد غیر یکنواخت و اورشوت در سرعت‌های پایین (با استفاده از تکنیک ریزگام یا میکرو استپینگ مرتفع می‌گردد)
- امکان از درست رفتن موقعیت صحیح در شرایط نا مساعد
- امکان افزایش دما به دلیل جریان مصرفی بالا صرفنظر از مقدار بار
- تلفات بالا در سرعت‌های بالا و داغ شدن و ایجاد سر و صدا در این شرایط
- محدود بودن گشتاور و سرعت
- بسیاری از مشکلات فوق را می‌توان با افزودن فیدبک به سیستم مرتفع نمود.

سرو موتورها یا موتورهای پله‌ای؟

- برای کنترل موقعیت می‌توان از موتورهای پله‌ای و یا سرو موتورها استفاده نمود. اما در سرو موتورها از مدار فیدبک آنالوگ استفاده می شود، در حالیکه در موتورهای پله‌ای نیازی به فیدبک نیست که خود یک مزیت به شمار می‌رود.
- در استفاده از موتورهای پله‌ای، انتخاب موتور مناسب با زاویه گام مورد نظر اهمیت دارد، اما در انتخاب سرو موتورها مسأله پایداری مجموعه پتانسیومتر و مدارات آنالوگ در مسیر فیدبک حائز اهمیت است.
- معمولاً از موتورهای پله‌ای برای کاربردهای با شتاب پایین و بار ثابت استفاده می‌شود و در مواردی که شتاب بالا مورد نیاز بوده و تغییرات بار زیاد است به فیدبک نیاز است و بنابر این در این شرایط بهتر است از سرو موتورها (Servo Motors) استفاده شود.

انواع ساختار موتورهای پله‌ای

موتورهای پله ای بر اساس ساختار به سه نوع کلی زیر تقسیم بندی می شوند:

۱- موتورهای پله‌ای نوع مقاومت مغناطیسی متغیر (Variable Reluctance: VR) شامل انواع زیر:

الف) تک پارچه یا تک تکه (Single Stack)

ب) چند پارچه یا چند تکه (Multi-Stack)

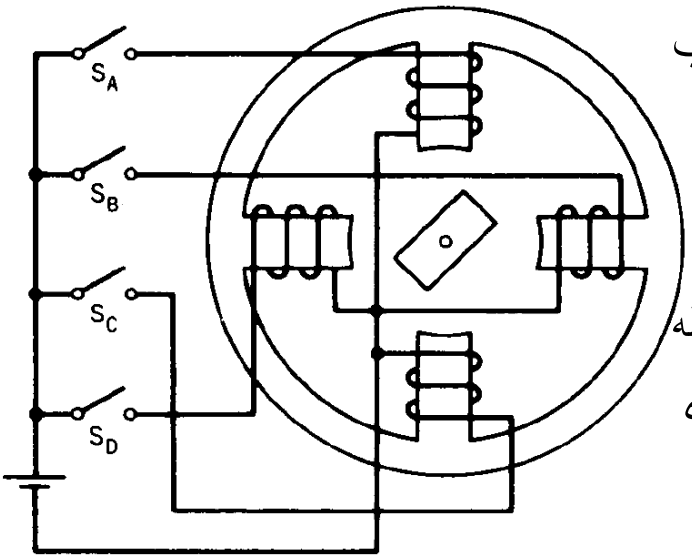
۲- موتورهای پله‌ای از نوع مغناطیس دائم (Permanent Magnet: PM)

۳- موتورهای پله‌ای نوع هیبریدی یا ترکیبی (Hybrid)

در ادامه به معرفی انواع فوق پرداخته می‌شود.

موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر (VR) تک پارچه

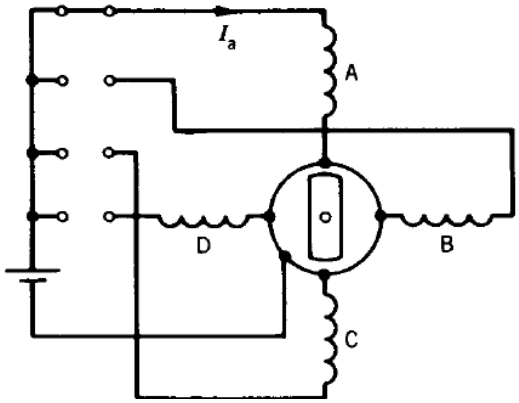
یک موتور پله‌ای دو قطبی (یعنی تعداد دندانه‌های روتور) و چهار فاز (یعنی تعداد سیم بندی های استاتور) در شکل نشان داده شده است.

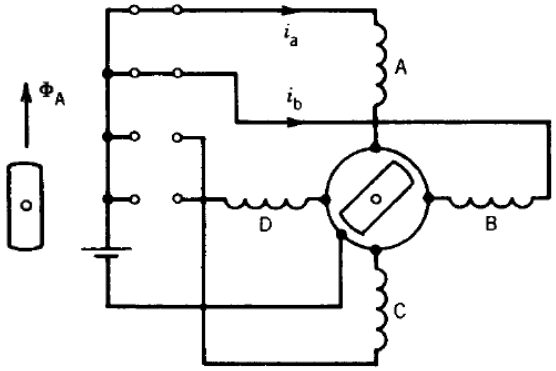


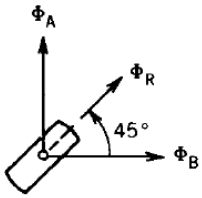
سیم پیچیهای فازهای A، B، C و D به ترتیب باید برقدار شوند تا روتور در جهت مورد نظر ساعتگرد مورد نظر بچرخد.

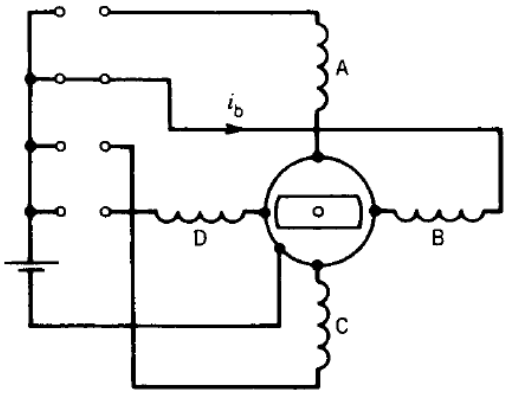
اگر کلیدزنی فاز به فاز انجام شود (در هر لحظه فقط یک فاز روشن باشد) زاویه گام موتور ۹۰ درجه خواهد بود.

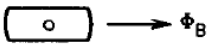
موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر تک پارچه چهار فاز دو قطبی





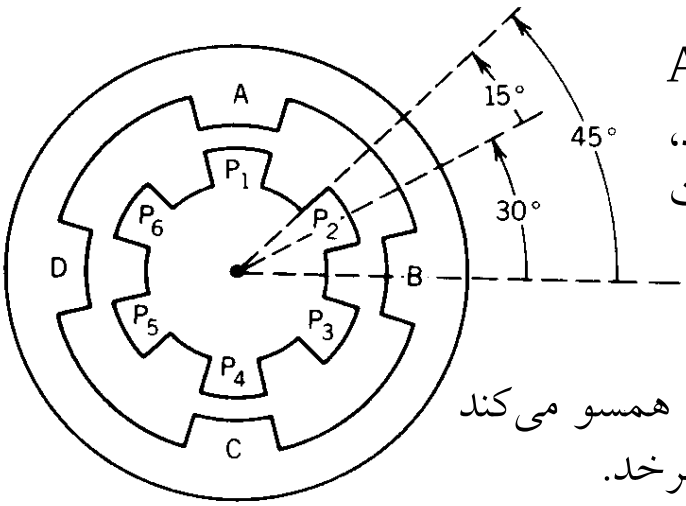






با این روش کلیدزنی، زاویه گام در این موتور ۴۵ درجه است. به منظور افزایش تعداد گامها یا کاهش زاویه هر گام باید از روتوری با تعداد قطبها (دندانه‌های) بیشتر استفاده نمود (اسلاید بعدی).

موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر تک پارچه چهار فاز شش قطبی



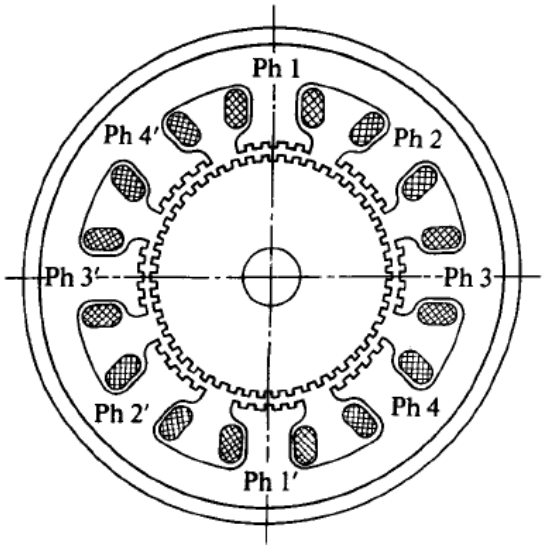
اگر فاز A برقدار شود، قطب P_1 در زیر فاز A قرار می گیرد. حال اگر فاز B نیز برقدار شود، میدان منتجه استاتور ٤٥ درجه در جهت عقربه‌های ساعت تغییر وضعیت می‌دهد.

در این حالت قطب P_2 خود را با میدان منتجه همسو می‌کند و روتور ۱۵ درجه در جهت پاد ساعتگرد می‌چرخد.

بعد از این نوبت فاز B است که با برقدار شدن آن قطب P_3 زیر فاز B قرار گرفته و روتور ۱۵ درجه دیگر در جهت پاد ساعتگرد خواهد چرخید.

و لذا اگر ترتیب برقدار کردن فازها A، A+B، B، B+C و ... باشد، روتور در جهت پاد ساعتگرد گام‌های ۱۵ درجه را طی می‌کند.

یک نمونه نوعی عملی از موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک پارچه



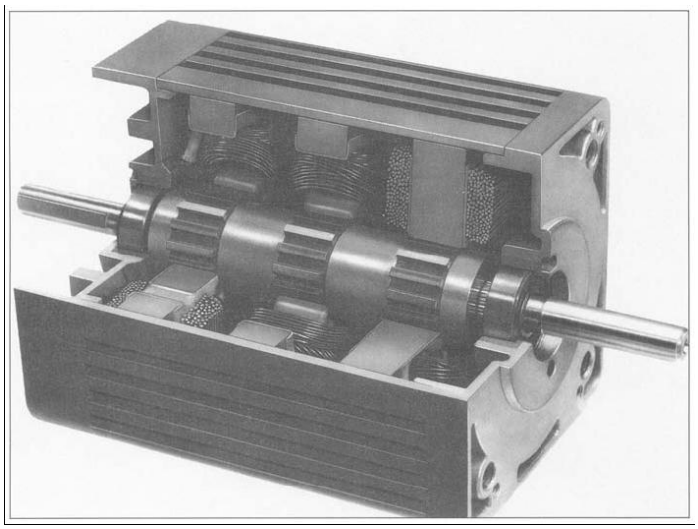
برش مقطعی یک موتور پله ای نوعی چهار فاز با ۵۰ قطب یا دندانه بر روی روتور با زاویه گام ۱/۸ درجه در هر گام یا ۲۰۰ گام در هر دور کامل

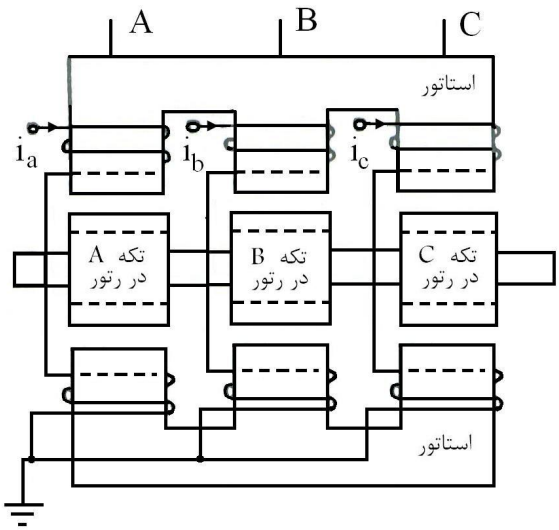
رابطه زاویه گام موتورهای پله ای تک تکه به صورت زیر قابل بیان است:

$$\Delta\theta = \frac{۳۶۰^\circ}{N_r \times P}$$

موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر چند تکه

در برخی از طرحها جهت افزایش تعداد پله ها در یک دور می‌توان روتور را از چند تکه مجزا ساخت (معمولاً ۳ تکه). شمای چنین موتوری با سه تکه در اشکال زیر نشان داده شده است. در این شکل روتور از سه تکه مجزا تشکیل شده و استاتور مربوط به هر تکه دارای چندین قطب است. غالباً در هر تکه از استاتور تنها یک فاز قرار دارد.

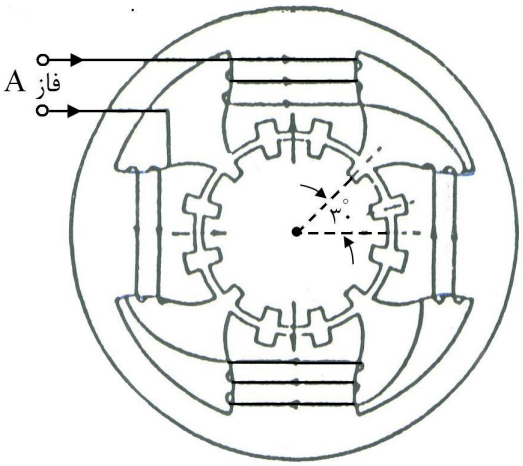


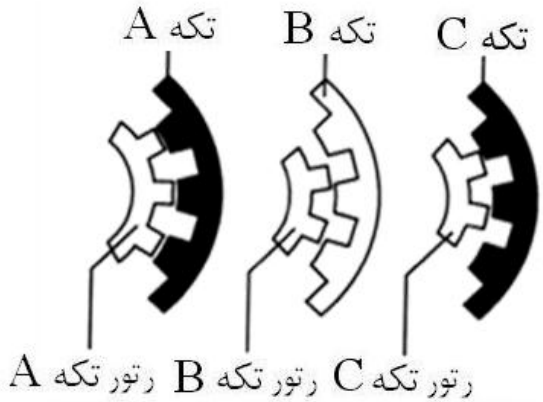


موتور پله ای رلوکتانس متغیر چند تکه

در هر تکه، روتور و استاتور دارای دندانه‌های یکسان هستند. همچنین دندانه‌های دو تکه مجاور نسبت به هم به اندازه یک سوم فاصله بین دو دندانه مجاور در یک تکه شیفت داده شده اند. (شکل سمت راست)

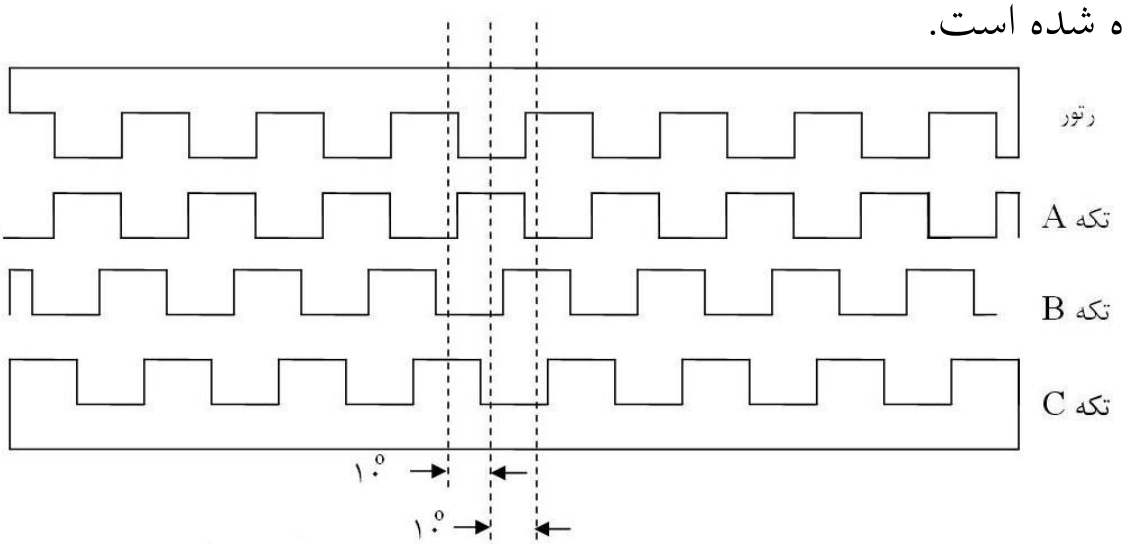
با برقدار شدن سیم بندی هر تکه، دندانه‌های روتور با دندانه‌های استاتور در همان تکه هم جهت می‌شوند. (شکل سمت چپ). بدیهی است که در این حالت دندانه‌های روتور و استاتور در دو تکه دیگر هم راستا نیستند.





موتور پله ای رلوکتانس متغیر چند تکه

وضعیت دندانه ها در تکه های مختلف در حالت برقدار بودن فاز تکه A در شکل زیر نشان داده شده است.



حال اگر استاتور تکه B برقدار شود، دندانه های روتور و استاتور در تکه B همسو خواهند شد. و لذا موتور یک گام خواهد چرخید. با برقدار شدن استاتور تکه C نیز موتور یک گام دیگر خواهد چرخید.

موتور پله ای رلوکتانس متغیر چند پارچه

پس در حین فرآیند برقدار شدن به ترتیب A، B و C موتور پله ای به اندازه زاویه یک دندانه روتور خواهید چرخید و در این فرآیند در هر بار برقدار شدن هر کدام از فازها میزان درجه چرخش با رابطه زیر بدست می آید:

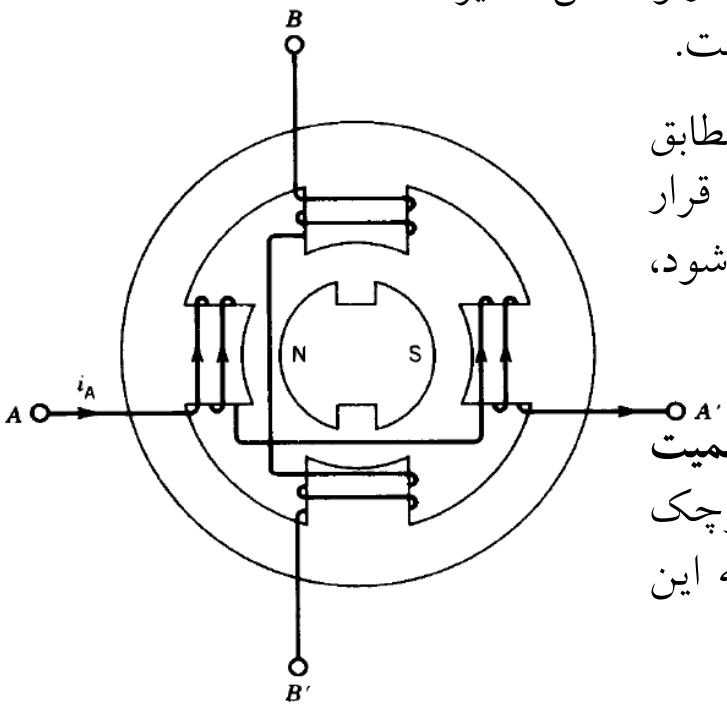
$$\Delta\theta = \frac{۳۶۰^\circ}{x \times N_r}$$

که در آن x تعداد تکه های موتور و N_r تعداد دندانه های روتور است. برای مثال برای موتور پله ای سه تکه‌ای در شکل دو اسلاید قبلی تعداد دندانه های روتور ۱۲ عدد است و لذا زاویه گام ۱۰ درجه خواهد بود.

تفاوت مهم در حالت موتورهای پله ای چند پارچه در مقایسه با موتورهای پله ای تک پارچه در این است که با برقدار شدن استاتور در هر تکه، تمامی دندانه ها در تولید گشتاور مؤثر خواهند بود. اما از طرف دیگر، در هر گام مشخص، مابقی تکه ها بلا استفاده خواهند ماند و نقشی در گشتاور تولیدی نخواهند داشت (افزایش حجم و وزن).

موتورهای پله‌ای با آهنربای دائم (PM)

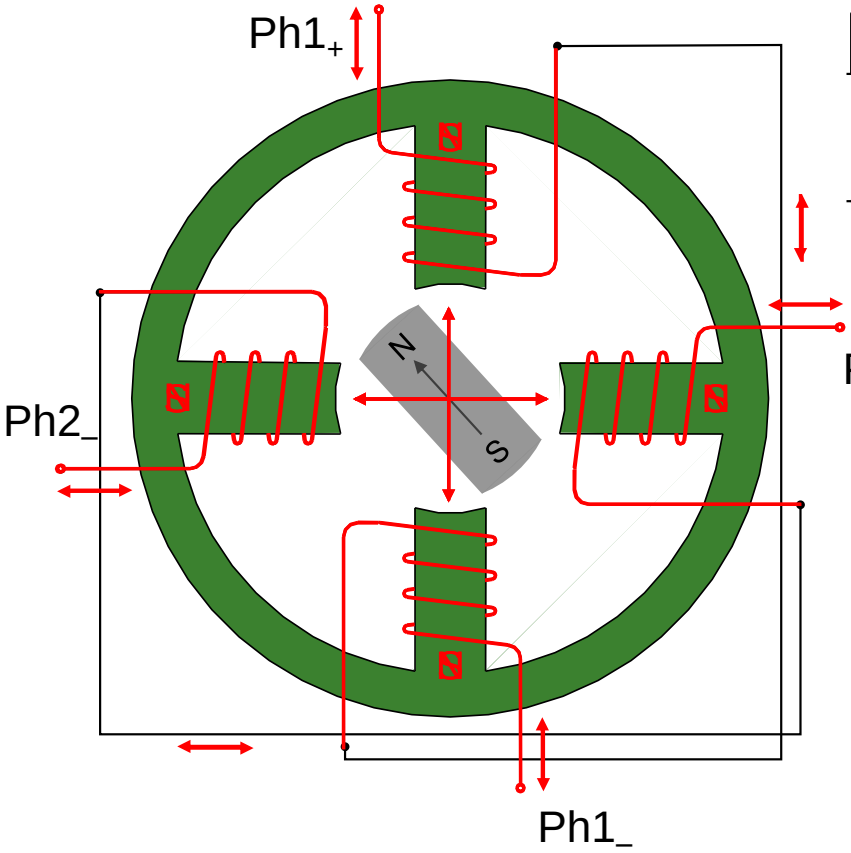
استاتور این موتورها شبیه موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر است، اما روتور آنها از آهنربای دائم ساخته شده است.

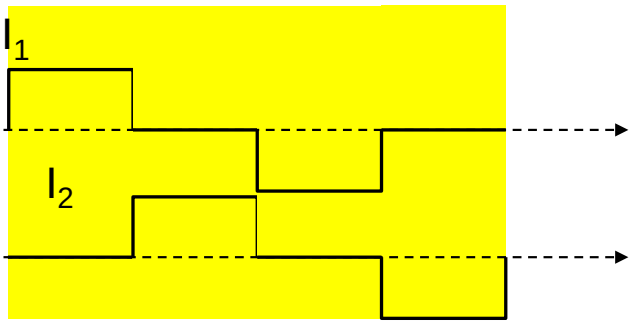


در شکل روبرو اگر سیم بندی فاز A مطابق شکل برقدار شود، روتور به صورت افقی قرار می گیرد. حال اگر سیم بندی فاز B برقدار شود، روتور ۹۰ درجه خواهد چرخید.

شایان ذکر است که جهت جریان در سیم بندیها در این نوع موتورهای پله‌ای اهمیت دارد (چرا؟). از آنجاییکه تولید آهنربای کوچک با تعداد قطب بالا دشوار است، زاویه هر پله این موتورها بین ۳۰ تا ۹۰ درجه می باشد.

موتور پله ای PM دو فاز





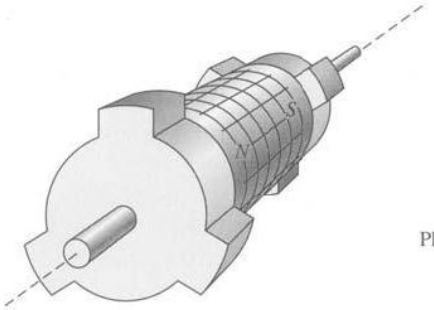
☜ جهت جریان در سیم بندیها در حال تغییر است.

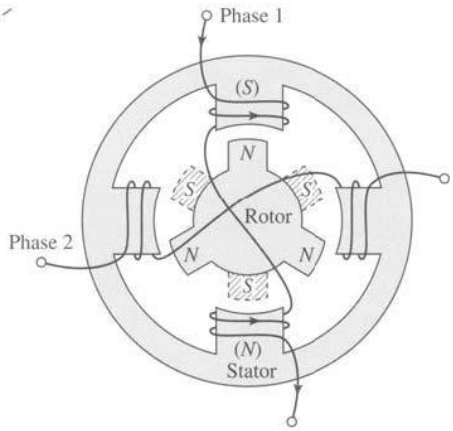
ویژگیهای موتورهای پله ای با آهنربای دائم

- زاویه گام این موتورها بزرگ است.
- گشتاور تولیدی این موتورها در اندازه و جریان یکسان بیشتر از نوع موتورهای VR است.
- در حالت خاموش موقعیت روتور ثابت می ماند (چرا؟). در برخی از کاربردها این خاصیت از اهمیت بالایی برخودار است.
- جهت جریان فراهم شده در مدارهای تغذیه این نوع موتورها باید دو جهته باشد.
- قیمت این موتورها بیشتر از نوع VR است.
- دمای محیط کار این موتورها بر عملکرد آنها تأثیر دارد (چرا؟).

موتورهای پله ای هیبرید یا ترکیبی

این نوع موتور پله ای از ترکیب دو نوع VRو PM ایجاد می‌گردد. از این رو از مزایای هر دو نوع موتور استفاده می‌شود. ساختار این نوع موتورها شبیه موتورهای VR چند پارچه (معمولاً دو تکه) است. در روتور این نوع موتورها از یک آهنربا با جهت دهی محوری استفاده می شود. از این رو همانند آنچه در شکل زیر نشان داده شده است، دندانه های یکی از تکه‌ها به صورت قطب N و دندانه های تکه دیگر به صورت قطب S در خواهند آمد.



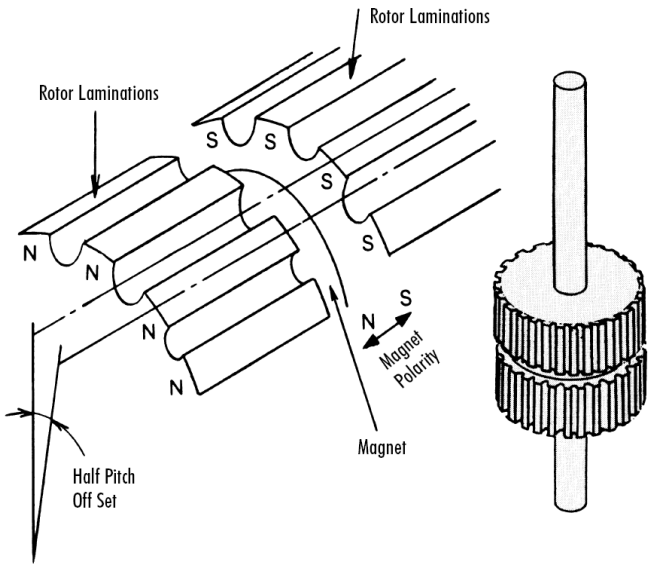


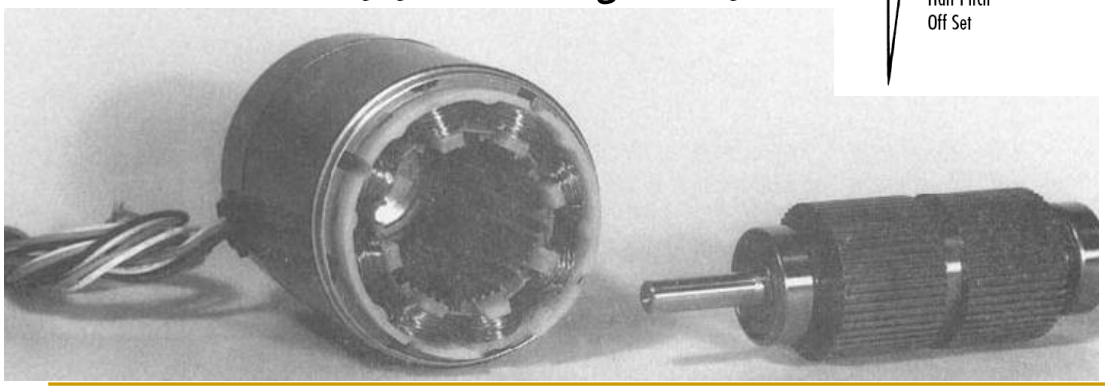
شمای یک موتور پله‌ای هیبرید در شکل روبرو نشان داده شده است. ساختار این موتور شبیه موتور VR چند تکه است.

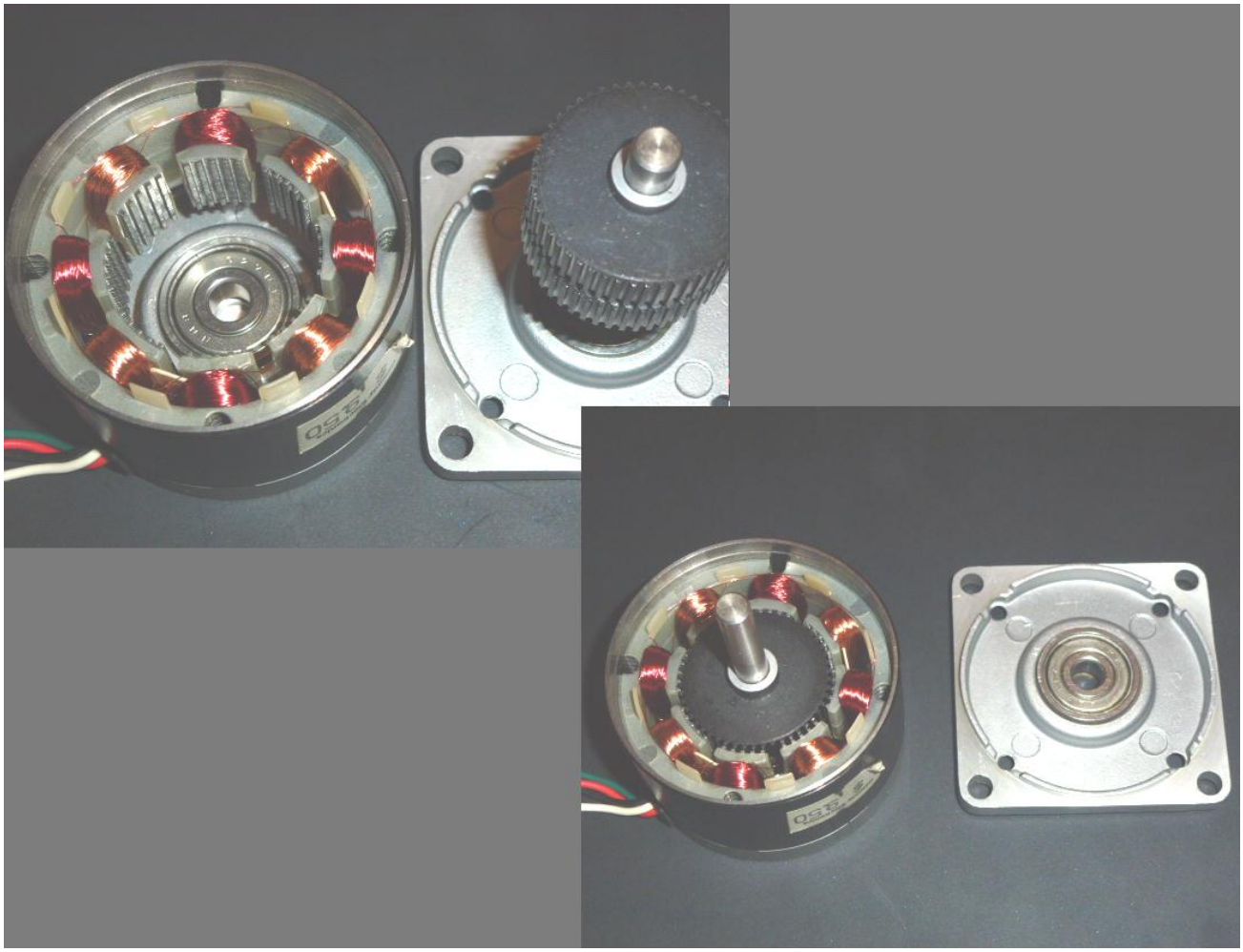
موتورهای پله ای هیبرید یا ترکیبی

وجود یک آهنربای با قطبش محوری در روتور باعث می شود که دندانه های روتور در یک تکه به صورت قطب N و در تکه دیگر به صورت قطب S در آیند.

این دندانه ها به اندازه نصف گام دندانه نسبت به هم شیفت دارند. در حالیکه ساختار قطبهای استاتور در کل بخشهای موتور مشابه است.







مشخصه موتورهای پله ای

- مشخصه موتورهای پله ای نیز مانند سایر موتورهای الکتریکی غالباً به صورت گشتاور بر حسب سرعت بیان می شود. اما موتورهای پله‌ای گشتاور حالت سکون نیز دارند. به طور کلی در موتورهای پله ای، سه مشخصه برای رفتار مکانیکی تعریف می گردد:

۱ – مشخصه گشتاور – زاویه یا مشخصه استاتیک (ایستا) که در آن مقدار گشتاور (T_m) بر حسب موقعیت روتور (θ) بیان می شود. این مشخصه مقدار گشتاور را در طی یک گام و در شرایطی که فقط یک فاز با جریان ثابت (نامی) تغذیه شده باشد ارائه می‌گردد.

مشخصه موتورهای پله ای

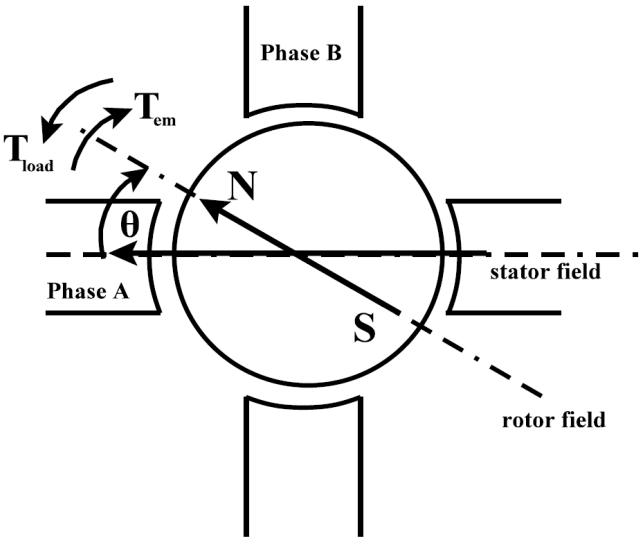
۲- مشخصه گشتاور – فرکانس در حالت چرخش دائم (pull-out) که در این مشخصه، گشتاور (T_m) را بر حسب فرکانس گام (f_{step}) نمایش داده می‌شود. فرکانس گام تعداد پله‌های طی شده موتور در یک ثانیه است. این مشخصه با مشخصه گشتاور- سرعت سایر موتورها قابل مقایسه است.

۳- گشتاور – فرکانس در حالت شروع و توقف (pull-in) که در آن گشتاور مورد نیاز برای شتاب دادن و کند کردن حرکت بر حسب فرکانس گام تعیین می‌گردد.

نکته: مشخصه اول همان مشخصه استاتیکی و مشخصه‌های دوم و سوم جزء مشخصه‌های دینامیکی موتور پله‌ای به شمار می‌روند.

مشخصه استاتیک موتورهای PM

به عنوان نمونه یک موتور پله ای PM چهار فاز را در نظر بگیرید. فرض کنید که فاز A برقدار شده باشد.



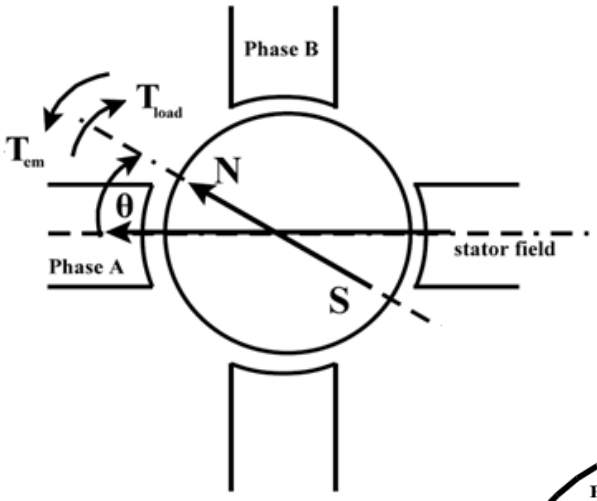
جهت گشتاور بار T_{load} بر خلاف گشتاور موتور T_{em} و مقدار آنها در حالت ایستا برابر است. اگر مقدار گشتاور T_{em} بر حسب زاویه مکانیکی θ اندازه‌گیری شود، منحنی گشتاور استاتیک فاز A بدست می‌آید. این منحنی تابعی سینوسی از θ است (چرا؟). مقدار θ نیز تابعی از میزان گشتاور بار است. در حالت بی باری مقدار θ صفر است. همچنین در یک موتور پله ای با P زوج قطب، گشتاور تابعی از $\sin P\theta$ خواهد بود. $P\theta$ همان زاویه الکتریکی است.

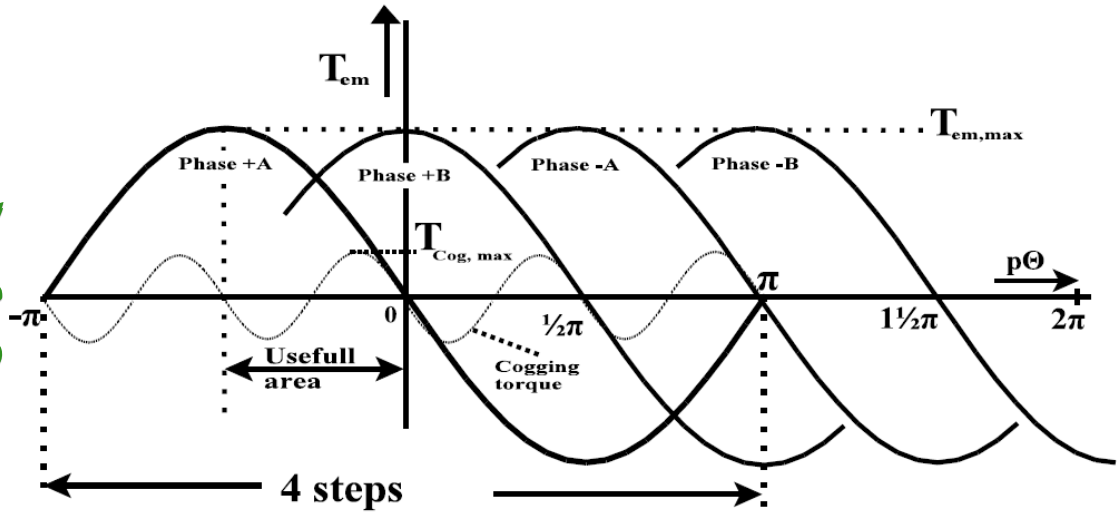
توجه: در شکل فوق تعداد زوج قطب روتور برابر ۱ است (P=1)

مشخصه استاتیک موتورهای PM

گشتاور هر دو فاز در دو حالت جریان مثبت و منفی در شکل زیر نشان داده شده است.

گشتاور نگهدارنده T_{cog} همان گشتاور موتور در حالت بدون جریان (یا بعضاً Holding Torque) است.





گشتاور نگهدارنده تنها در موتورهای PM و هیبرید وجود دارد.

مشخصه استاتیک موتورهای VR

مشخصه گشتاور – زاویه موتورهای پله ای VR را به منظور سادگی در تحلیل، تقریباً مشابه موتورهای پله ای PM و به صورت تابعی سینوسی از موقعیت زاویه ای محور در نظر می گیرند.

و لذا در کل می توان مشخصه گشتاور – زاویه موتورهای پله ای را به صورت زیر بیان نمود:

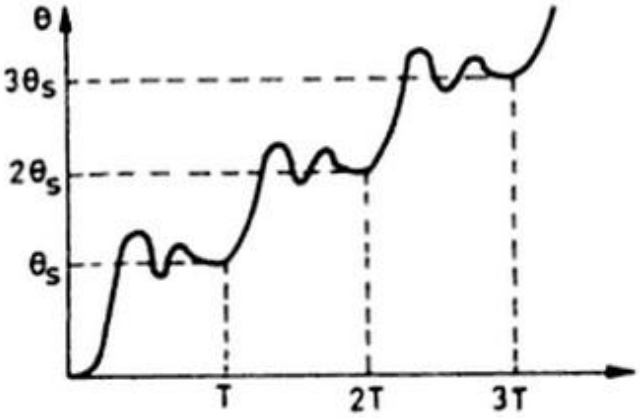
$$T_{em} = -T_{em,\max} \sin p\theta$$

نکته: مقدار $T_{em,max}$ در موتورهای پله ای PM متناسب با جریان و در موتورهای پله ای VR متناسب با مجذور جریان است. به $T_{em,max}$ گشتاور Holding Torque نیز گفته می شود.

مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

- مشخصه موتور پله ای در حال حرکت را مشخصه دینامیکی گویند که شامل دو مشخصه راه اندازی (starting) و مشخصه چرخش دائم (slewing) است.

  - **مشخصه راه اندازی** : این منحنی مربوط به مد حرکتی شروع – توقف (Start-stop) یا حالت تک گام (single stepping) است. در این حالت موتور پس از طی کردن یک گام، کاملاً متوقف شده و تا اعمال پالس بعدی متوقف می‌ماند. شکل زیر تغییرات زاویه شفت موتور را در چند گام متوالی نشان می دهد.



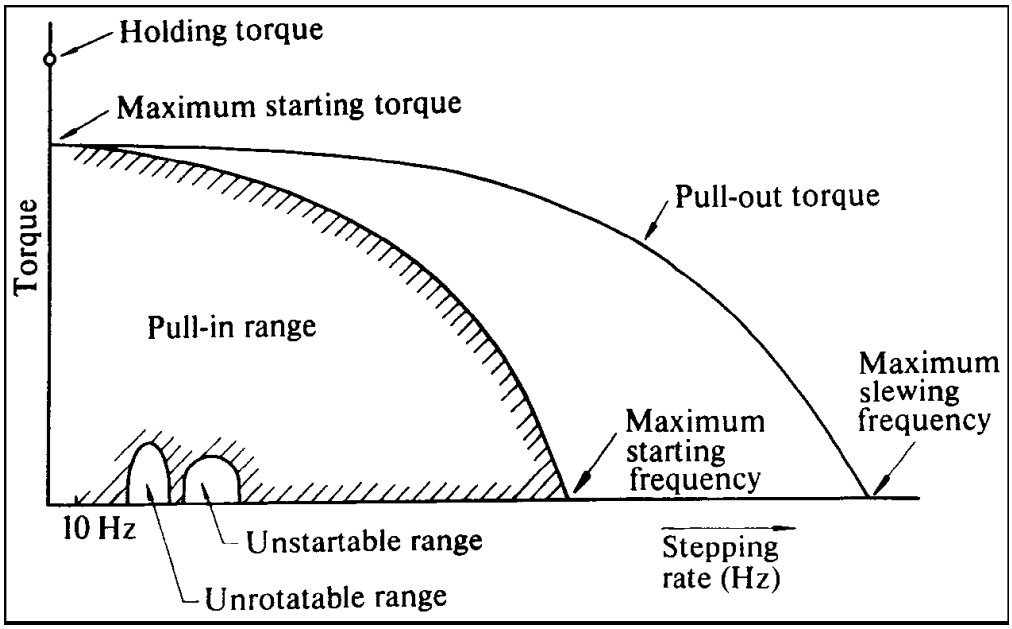
مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

در این حالت (راه اندازی) دو مشخصه مهم برای موتور قابل تعریف است:

- **گشتاور راه اندازی (Pull-in Torque)**: حداکثر گشتاوری است که به ازای یک فرکانس گام مشخص بدون از دست رفتن همزمانی (Synchronism) توسط موتور در حالت کاری شروع – توقف (به صورت پیش رو یا پس رو) قابل تأمین است. (منظور از همزمانی در موتورهای پله‌ای این است که موتور به ازای هر تعداد پالس اعمالی توسط مدار درایو، همان تعداد گام را طی کند).
- **حداکثر فرکانس راه اندازی (Maximum Starting Frequency)**: حداکثر تعداد پالس در یک ثانیه که در آن یک موتور بدون بار (با گشتاور صفر) می تواند شروع به کار کند و بدون از دست رفتن همزمانی به چرخش خود ادامه دهد. طبعاً در فرکانسهای بالاتر از این فرکانس، موتور قادر به چرخش و رفتن به گام بعدی نخواهد بود (شفت موتور در همان موقعیت اولیه نوسان می کند.)

مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

همانگونه که از نمودار مشخص است، به منظور حفظ شرایط همزمانی، با افزایش گشتاور بار، مدت زمان مورد نیاز برای طی شدن یک گام افزایش و یا به تعبیر دیگر فرکانس گام کاهش خواهد یافت خواهد یافت و بالعکس.

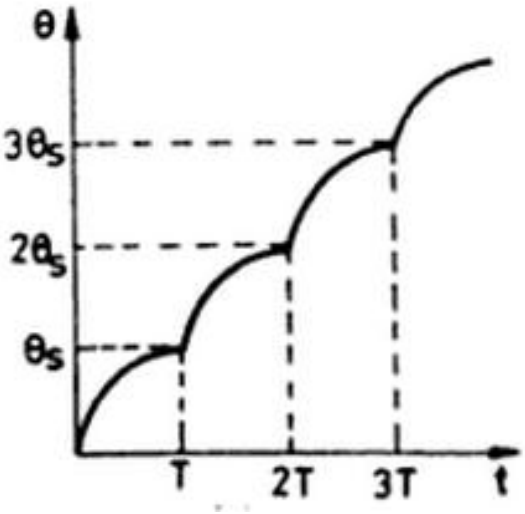


مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

- همچنین در این مد حرکتی، مقدار اینرسی مجموعه (موتور و بار) در تعیین رفتار دینامیکی بسیار مهم است. با افزایش اینرسی، مشخصه گشتاور به سمت چپ شیفت پیدا می‌کند.
- در شرایط حاد و به ازای یک گشتاور بار بالا، موتور با کمترین فرکانس گام نیز راه اندازی نمی‌شود. حداکثر گشتاور در پایین‌ترین فرکانس ایجاد می‌شود. در حالت بی باری نیز اگر فرکانس گام از مقدار فرکانس بی باری (Maximum Starting Frequency) بیشتر باشد، گشتاور متوسطی توسط موتور ایجاد نمی‌شود. پس گشتاور و فرکانس پالس زنی در موتورهی پله‌ای با هم رابطه عکس دارند.
- **نکته**: مقدار گشتاور راه اندازی حداکثر (Maximum Starting Torque همان گشتاور قید شده برای موتور) در فرکانسهای کم (در حدود ۱۰ هرتز) مشخص می‌شود که طبعاً از حداکثر گشتاور مشخصه حالت سکون یا گشتاور نگهدارنده ($T_{em,max}$ یا همان Holding Torque) کمتر است.

مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

- **منحنی چرخش دائم :**این منحنی مربوط به مد حرکتی چرخش دائم (slewing mode) یا حرکت پیوسته است. به عبارت دیگر در این مد حرکتی، موتور پله‌ای هنوز به ازای پالس جریان قبلی در حال حرکت است که پالس جدیدی به آن اعمال می گردد و گامهای متوالی باهم ادغام می‌شوند. شکل زیر:



مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

- باید توجه نمود که نمی‌توان از حالت سکون به یکباره به حالت چرخش دائم رسید و نیز با قطع پالسهای جریان موتور سریعاً متوقف نمی‌شود و قبل از توقف چند گام بدون اعمال پالس طی خواهد کرد.
- در حالت چرخش دائم (Slewing) دو مشخصه برای موتور قابل تعریف است:
  - گشتاور چرخش دائم (Pull-out Torque): حد اکثر گشتاوری است که به ازای یک فرکانس گام مشخص توسط موتور بدون از دست رفتن همزمانی (synchronism) در حالت کاری چرخش دائم قابل تأمین است.
  - حداکثر فرکانس در حالت چرخش دائم (Maximum Slewing Frequency): حداکثر فرکانس پالسی است که در حالت چرخش دائم می‌توان به موتور در حالت بی باری (گشتاور صفر) اعمال نمود.

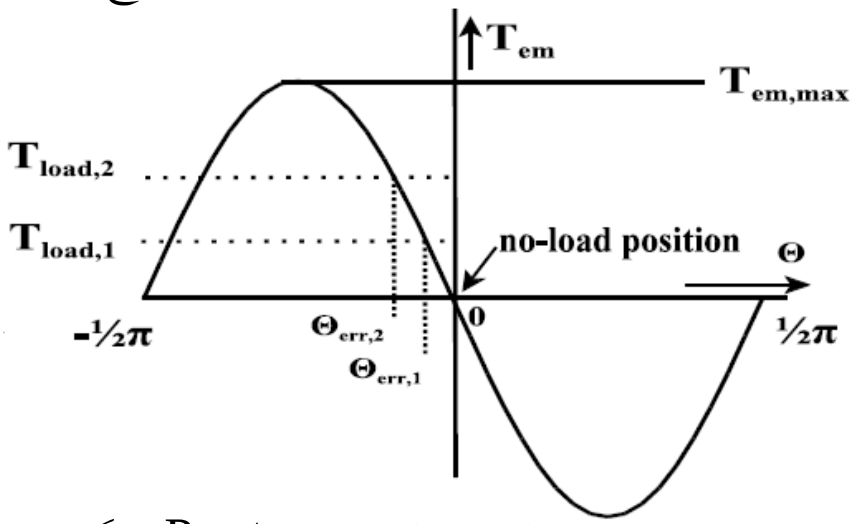
مشخصه دینامیکی موتور پله‌ای

- این مشخصه به نوعی مشابه مشخصه گشتاور-سرعت موتورهای دیگر (که چرخش دائم دارند) می‌باشد.
- این مشخصه‌ها علاوه بر مشخصات موتور، به روش و مشخصات مدار درایو و دینامیک بار نیز بستگی دارد. این منحنی‌ها در مشخصه موتورهای پله ای توسط برخی سازنده‌ها ارائه می‌گردد.
- همانگونه که از شکل مشخص است، مشخصه حالت چرخش دائم نیز شبیه حالت شروع-توقف است. در نمایش همزمان این دو مشخصه، دو ناحیه (Slewing Range) حائز اهمیت است: به ازای یک گشتاور معین ناحیه Pull-in در ($f_s<f_{PI}$) و ناحیه Pull-out در ($f_{PI}<f_s<f_{PO}$) قرار دارد.

خطای موقعیت در موتورهای پله ای

اختلاف موقعیت محور یک موتور پله ای تحت بار در مقایسه با حالت بی باری را خطای زاویه موتور پله ای گویند. در حالت تعادل، گشتاور بار T_{load} و گشتاور موتور T_{em} باهم برابر است. از این رو خطای زاویه محور موتور پله ای را می توان به صورت زیر تعریف نمود (مقدار خطای قابل قبول پنج درصد است):

$$\theta_{error} = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{T_{load}}{T_{em,\max}}\right)}{p}$$



دقت کنید که به ازای تعداد زوج قطب P و گشتاور حداکثر $T_{em,max}$ بیشتر میزان خطا کمتر خواهد شد.