



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

گرایش: قدرت

عنوان:

موتور پله ای، راهنمایی بر تئوری و عملکرد

استاد راهنما: دکتر جلیلود

نگارش: مقدم حسین

بهمن ۸۹

## فهرست

فصل ۱	۵
موتورهای پله ای	۵
مقدمه	۵
۱،۱،۲ جنبه های طراحی	۹
۱،۲ موتورهای پله ای رلوکنانس متغیر تک دسته ای	۱۱
۱،۳ موتورهای پله ای هیبرید	۱۴
۱،۴ مقایسه ی انواع موتورها	۱۶
فصل ۲	۱۹
مدارهای فرمان	۱۹
۲،۱ مقدمه	۱۹
۲،۲ مدار راه انداز تک قطبی	۲۰
۲،۳ مدار راه انداز دو قطبی	۲۳
فصل ۳	۳۲
موقعیت یابی دقیق بار: ویژگی های گشتاور استاتیک	۳۲
۳،۱ مقدمه	۳۲
۳،۲ ویژگی های گشتاور استاتیک/موقعیت روتور	۳۲
۳،۳ خطای موقعیت به دلیل گشتاور بار	۳۴
۳،۴ انتخاب ترتیب تحریک	۳۷

۳,۵- بار متصل به موتور توسط دنده ..... ۴۵

فصل ۴ ..... ۵۱

عملکرد مینی استپ: مشخصه ی گشتاور / سرعت ..... ۵۱

۴,۱. مقدمه ..... ۵۱

۴,۲. ارتباط بین گشتاور خروج و گشتاور استاتیک ..... ۵۳

۴,۳. رزونانس مکانیکی ..... ۶۰

فصل ۵ ..... ۷۳

عملکرد با سرعت بالا ..... ۷۳

۵,۱. مقدمه ..... ۷۳

۵,۲. مشخصه ی گشتاور خروج / سرعت برای موتورهای هیبرید ..... ۷۶

۵,۳. مشخصه ی گشتاور pull-out - سرعت برای موتور رلوکتانس متغیر ..... ۹۲

۵,۴. طراحی مدار فرمان ..... ۱۰۵

۵,۵. ناپایداری ..... ۱۱۴

فصل ۶: ..... ۱۱۷

کنترل حلقه باز: ..... ۱۱۷

۶,۱. مقدمه: ..... ۱۱۷

۶,۴. پیاده سازی کنترل حلقه باز: ..... ۱۳۳

فصل ۷ ..... ۱۴۸

کنترل حلقه بسته ..... ۱۴۸

۷,۱ مقدمه ..... ۱۴۸

۷,۲ آشکارسازی اپتیکی روتور ..... ۱۵۱

۷,۳ زاویه کلیه زنی ..... ۱۵۴

۷,۴ تکنیک های آشکار سازی موقعیت پیشنهادی : آشکار سازی شکل موج ..... ۱۶۵

۷,۵ کنترل حلقه بسته در مقابل حلقه باز: ..... ۱۷۶

فصل ۸ ..... ۱۷۸

سیستم های موتور پله ای بر پایه ی ریزپردازنده ..... ۱۷۸

۸,۱ مقدمه ..... ۱۷۸

۸,۲ نرم افزار در برابر سخت افزار برای کنترل حلقه باز ..... ۱۸۰

۸,۳ کنترل بر پایه ی ریزپردازنده ی حلقه باز ..... ۱۹۷

فصل ۹ ..... ۲۰۳

ضمیمه : مشخصه های گشتاور pull out / سرعت موتور ها با سیم پیچی دو جهته ..... ۲۰۳

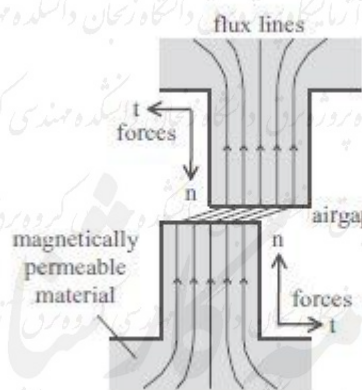
## فصل ۱

### موتورهای پله ای

#### ۱.۱. مقدمه

ویژگی اصلی موتورهای پله ای قابلیت ترجمه تغییرات تحریک به تحریکات دقیق و تعیین شده موقعیت روتور است (پله). موتورهای پله ای در طبقه بندی تحت عنوان ماشین های برجسته مضاعف معرفی می شوند، این بدین معناست که آن ها دندان هایی از جنس مواد با نفوذپذیری مغناطیسی در هر دو قسمت ثابت (استاتور) و متحرک (روتور) دارند. یک سطح متقاطع از بخش کوچکی از موتور پله ای به طور شماتیک در شکل ۱،۱ نمایش داده شده است. شار مغناطیسی از فاصله هوایی کوچک بین دندان ها در دو بخش موتور عبور می کند. بسته به نوع موتور منبع این شار می تواند یک آهنربای دائم یا یک سیم پیچ حامل جریان یا ترکیبی از هر دو باشد، در هر صورت نتیجه یکسان است. دندان ها با نیروهای موافق و مخالف مواجه می شوند که آن ها را به هم نزدیک می کند تا فاصله هوایی کاهش یابد. همانطور که در دیاگرام دیده می شود، مولفه اصلی این نیروها، نیروی نرمال ( $n$ )، قصد بستن فاصله هوایی را دارد، اما مولفه مفیدتر موتورهای الکتریکی مولفه کوچک تر نیروی مماسی ( $t$ ) است، قصد جابجا کردن دندان ها نسبت به یکدیگر را دارد. به محض این که شار عبوری از میان دندان ها حذف شود یا به مجموعه سایر دندان ها منتقل شود نیروهای جاذبه به صفر کاهش می یابند.

بخش های آتی به ما نشان خواهند داد که این قانون ساده چگونه به صورت عملی در موتورهای پله ای استفاده می شود. موتورهای پله ای به صورت گونه های مختلفی از دو نوع باید مشخص شوند: رلوکتانس متغیر و هیبرید. در موتور هیبرید منبع اصلی شار مغناطیسی آهنربای دائم است، و جریان dc که در یک یا چند سیم پیچ جریان دارد شار را در مسیرهای متناوب دیگر هدایت می کند. دو ترکیب برای موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر وجود دارد، کد در هر دو میدان مغناطیسی فقط با جریان سیم پیچ ها ایجاد می شود.



شکل ۱،۱: مولفه های نیرو بین دو دندانه نفوذپذیر مغناطیسی

## ۱،۲. موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر چند دسته ای

در موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر شار مغناطیسی سیم پیچ های حامل جریان هستند که روی دندانه های استاتور قرار دارند. این سیم پیچی ها به ترتیب تحریک می شوند تا موجب منطبق شدن مجموعه دندانه های روتور و استاتور شوند، و ویژگی حرکت پله ای به موتور بدهند.

### ۱،۲،۱. قواعد عملکرد

موتور پله ای رلوکتانس متغیر چند دسته ای در طول محورش به بخش های مغناطیسی مجزا تقسیم می شود، دسته هایی که هر کدام با سیم پیچ مجزایی قابل تحریکند (فاز). به عنوان مثال در شکل برش خورده ی ۱،۲ موتور دارای سه دسته و سه فاز است، البته این موتورها تا هفت دسته و هفت فاز نیز ساخته شده اند.

هر دسته دارای یک استاتور است، که توسط بدنه خارجی موتور در موقعیت خود قرار گرفته است و سیم پیچی موتور، و یک عنصر گردان را شامل می شود. عناصر گردان تحت یک قسمت واحد ساخته می شوند، که در هر انتهای ماشین به یک یا کاتان منتهی می شود و شامل یک شفت برای اتصال به بار خارجی است. شکل ۱،۳ بیانگر این موضوع است. استاتور و روتور از فولاد الکتریکی ساخته شده اند، که عموماً به صورت ورقه ورقه هستند تا میدان های مغناطیسی درون موتور بتوانند بدون ایجاد تلفات جریان چشمگیر ادی (eddy) به سرعت تغییر کنند. استاتور هر دسته شامل تعدادی قطب است - شکل ۱،۳.

نمونه ای با چهار قطب را به تصویر کشیده است - و بخشی از سیم پیچی فاز دور هر قطب پیچیده شده

تا میدانی شعاعی در قطب تولید کند. قطب های همجوار بر عکس سیم پیچی شده اند تا میدان های شعاعی در قطب های همجوار در خلاف جهت هم باشند. مدار مغناطیسی کامل برای هر دسته از یک قطب شروع می شود، از فاصله هوایی می گذرد، وارد روتور می شود، از داخل روتور عبور می کند، سپس فاصله هوایی، وارد قطب مجاور می شود، از آن عبور می کند و به قطب اول بازمی گردد، که به آن بن فشار (back-iron) گفته می شود. مدار مغناطیسی برای قطب تکرار می شود و در نهایت، به عنوان مثال، در شکل ۱،۳ b. چهار مسیر اصلی شار وجود دارد. نیروهای عادی جاذبه بین چهار بخش استاتور و روتور همدیگر را خنثی می کنند، در نتیجه نیروهای بین روتور و استاتور از نیروهای مماسی حاصل می شوند.



شکل ۱،۲ برش یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر با سه دسته

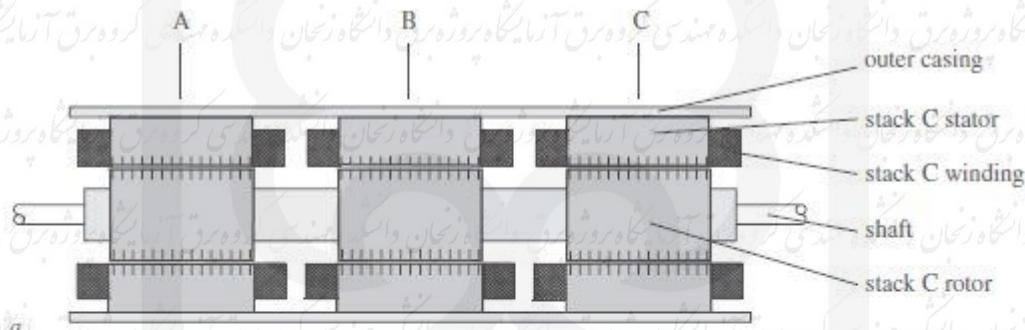
عکس از (Warner Electric Inc. USA)

موقعیت روتور نسبت به استاتور در یک دسته ی خاص، با تحریک سیم پیچی فاز تعیین می شود. دقت قرارگیری دندانها به وسیله ی تعداد مساوی دندانها در روتور و استاتور بیشتر می شود که با قرارگیری در یک خط رلوکتانس مدار مغناطیسی دسته را کاهش می دهد. در موقعیتی که دندانهای روتور و استاتور در یک خط باشند، رلوکتانس مدار به کمترین حد می رسد و شار درون دسته به بیشترین حد خود می رسد.

موتور پله ای نشان داده شده در شکل ۱،۳ b، هشت دندان ی روتور/استاتور دارد و در موقعیت متناظر با تحریک دسته است. مشاهده می کنیم که در طول محوری موتور دندانهای روتور در هر دسته به خط

شده اند. در حالی که دندانه های استاتور کاملاً در یک خط نیستند. اثر تغییر تحریک از دسته ی A به دسته ی B، همخط شدن دندانه های روتور در دسته ی B این همخط شدن جدید با حرکت روتور در جهت عقربه های ساعت به دست آمده است. در نتیجه ی تغییر تحریک موتور یک "پله" حرکت می کند.

یک پله جابجا شدن در جهت عقربه های ساعت می تواند با حذف کردن تحریک دسته ی B و تحریک کردن دسته ی C انجام شود. آخرین قدم این زنجیره، تحریک کردن دوباره ی دسته ی A است. دوباره دندانه های استاتور و روتور در دسته ی A کاملاً همخط می شوند؛ با این تفاوت که روتور یک گام دندانه حرکت کرده است (toothpitch) که این زاویه ی بین دندانه های روتور هم جوار نشان داده شده در شکل ۱.۳b است. در نتیجه در این موتور سه دسته ای، سه بار تغییر تحریک و جابجایی تحریک منجر به حرکت روتور در سه پله یا یک گام دندانه می شود. گردش در جهت عقربه های ساعت به صورت مداوم با تکرار این چرخه ی تحریک ممکن است: A,B,C,A,B,C,... در نتیجه گردش پادساعت گرد نتیجه ی چرخه ی A,C,B,A,C,B,... است. اگر عملکرد دو سویه از موتور چند دسته ای مطلوب باشد، موتور باید حداقل سه دسته داشته باشد تا داینکه دو چرخه ی تحریک مجزا ممکن باشد.



(a) نمای یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر با سه دسته به موازات شفت

شکل ۱،۳

(b) نمای یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر با سه دسته عمود بر شفت



رابطه ی ساده ای بین دندانه های استاتور/روتور و تعداد دسته ها و طول گام ها در یک موتور رلوکتانس متغیر چند دسته ای وجود دارد. اگر موتور  $N$  دسته و فاز داشته باشد، چرخه ی تحریک اصلی شامل تحریک به نوبت هر دسته می باشد که منجر به حرکت  $N$  پله ای می شود. یکی از دسته ها در ابتدا و انتهای چرخه تحریک می شود و اگر دندانه های روتور و استاتور در این دسته همخط شوند، روتور یک گام دندانه حرکت کرده است. از آنجایی که یک گام دندانه برابر  $(360/p)$  که  $p$  تعداد دندانه های روتور است، جابجایی در یک تغییر تحریک برابر است با:

$$(1,1) \quad \text{طول گام} = (360/Np)$$

موتور نشان داده شده در شکل ۱،۳، سه دسته و هشت دندانه ی روتور دارد، در نتیجه طول دندانه ۱۵ می باشد. برای یک موتور رلوکتانس متغیر چند دسته ای، طول گام معمول در بتره ی ۱۵-۲۰ است.

طراحی های موفق چند دستهای اغلب همراه با دسته های اضافی بوده اند. در نتیجه کاربر می تواند طول گام را انتخاب کند. به عنوان مثال، موتور سه دسته ای با روتور ۱۶ دندانه ای، پله ای برابر  $7/5$  ایجاد می کند. با اضافه کردن یک دسته ی دیگر (همراه با جهت گیری مجدد دسته های دیگر) پله ی  $5/625$  قابل دسترسی می باشد. هرچند استفاده کردن از تعداد بیشتر دسته ها، تسهیلات بیشتری به سازنده می دهد. باید به خاطر داشته باشیم که افزایش سیم پیچی فاز باعث افزایش مدار فرمان می شود. در نتیجه کاربر هزینه ی زیادی بابت مدارهای فرمان متقبل می شود. بعلاوه همانطور که دیده می شود (Acarney, ۱۹۷۹) موتور با تعداد دسته های زیاد مزیت خاصی نسبت به موتورهای سه دسته ای ندارد.

## ۱،۲،۲. جنبه های طراحی

هر قطب موتور پله ای چند دسته ای با یک سیم پیچی همراه است که با تحریک شدن توسط جریان DC میدانی مغناطیسی در راستای شعاعی ایجاد می کند. کارکرد موتور پله ای وابسته به قدرت این میدان مغناطیسی است. مقدار زیاد شار موجب ایجاد گشتاوری بالا که باعث ابقای موتور در همان موقعیت پله می شود. در فصل ۳ بیشتر به رابطه ی بین گشتاور و قدرت میدان می پردازیم. در اینجا فقط نیاز داریم که چگونگی حداکثر کردن جریان میدان مغناطیسی قطب را در نظر داشته باشیم.

در موقعیتی که دندانه های روتور و استاتور کاملاً همخط شده اند، همانند دسته ی  $A$  در شکل ۱،۳، b. رلوکتانس مسیر اصلی شار در کمترین مقدار خود است. در جریان های پایین سیم پیچی قطب چگالی شار در آهن روتور و استاتور کم است و رلوکتانس این بخش ها از مسیر شار بسیار کمتر از رلوکتانس

فاصله ی هوایی بین دندان‌های روتور و استاتور است. بنابراین با افزایش جریان سیم پیچ چگالی شار در فولاد به حد اشباع می‌رسد. افزایش بیشتر جریان سیم پیچ، باعث تقلیل رفتن بازخورد می‌شود.

محدودیت دیگر در قدرت میدان قطب از گرم شدن ناشی از جریان سیم پیچی به وجود می‌آید. توان تلف شده در سیم پیچی‌ها با مجذور جریان متناظر است. در نتیجه افزایش دما در سیم پیچی‌ها، نتیجه‌ی افزایش سریع جریان است. در اغلب کاربردها، وظیفه‌ی عایق بندی سیم پیچی است تا با افزایش دما، جریان را محدود کند، که تحت عنوان مقدار "نامی" آن شناخته می‌شود. در یک طراحی خوب موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر، اعمال محدودیت‌های چگالی شار قطب و افزایش دمای سیم پیچ، هر دو موثر هستند (Harris, 1977): در جریان نامی آهن استاتور و روتور به اشباع مغناطیسی می‌رسند.

برای موتور پله‌ای سه دسته‌ای نشان داده شده در شکل ۱،۳، چهار قطب و در نتیجه، چهار سیم پیچی قطب برای هر دسته وجود دارد. از آنجایی که هر چهار سیم پیچ در یک دسته باید با هم تحریک شوند، معمول است که سیم پیچی‌ها را طوری به هم اتصال دهند تا یک فاز را تشکیل دهند. سه روش مختلف برای اتصال چهار سیم پیچی در شکل ۱،۴ نشان داده شده است. هرچند جریان نامی سیم پیچی قطب فقط وابسته به افزایش دمای قابل قبول است، جریان فاز نامی متناظر به اتصالات وابسته است همانطور که در جدول ۱،۱ نشان داده شده است. ولتاژ نامی، ملتاثری است که باید به سر فاز اعمال شود تا جریان نامی در آن جاری گردد. در اتصال سری، جریان فاز کم و ولتاژ آن نسبت به حالت موازی زیاد است، اما هیچ تفاوتی در توان رسیده به فاز نیست. اغلب سازندگان موتورهای پله‌ای را از یک طراحی با بازه‌ای از اتصالات سیم پیچی‌ها تولید می‌کنند. در نتیجه کاربر می‌تواند راه اندازی با ولتاژ کم و جریان زیاد با اتصال موازی یا راه اندازی با ولتاژ زیاد و جریان کم با یک اتصال سری را انتخاب کند.

# پایان نامه کارشناسی

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه برق مراجعه فرمایید.

