

موتورهای پله‌ای

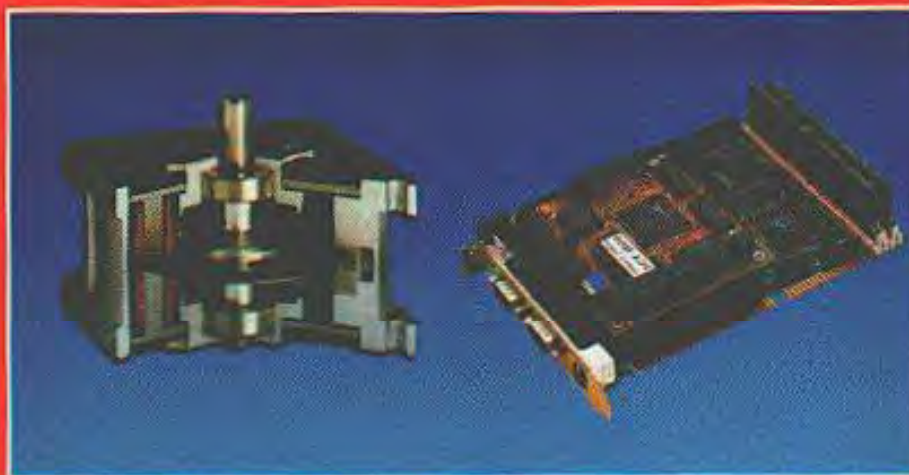
و کنترل میکروپروسسوری آنها

برای اطلاعات بیشتر

- تاریخچه و تحولات موتورهای پله‌ای
- طرح کلی موتورهای پله‌ای مدرن
- تئوری الکترومغناطیس در موتورهای پله‌ای
- کاربرد میکروپروسسور Z80 در کنترل موتورهای پله‌ای
- مشخصه‌های دینامیک و استاتیکی موتورهای پله‌ای
- مشخصه‌های گشتاور و مواصل بکس
- سیستم درایو و روشهای تحریک در موتورهای پله‌ای
- کنترل حلقه باز و حلقه بسته موتورهای پله‌ای
- کاربردهای موتورهای پله‌ای
- ساخت و تولید موتورهای پله‌ای

آکیرا سوگاوارا

تاكاشی كنجو



مترجمین:

مهندس نوید تقی زادگان کلاتی

(عضو هیات علمی دانشگاه)

مهندس امید موسیوف پور







موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپروسسوری آنها

تاکاشی کنجو - آکیراسوگاوارا

مترجمین

مهندس نوید تقی زادگان کلانتری

عضو هیئت علمی دانشگاه

مهندس امید یوسف پور



انتشارات آشینا

۱۳۸۰

Kenjo, Takashi

کنجو، تاکاشی

موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپروسسوری آنها / مؤلفین: تاکاشی کنجو و اکیرا سوگاوارا؛ مترجمین: نوید تقی‌زادگان کلانتری و امید یوسف‌پور - تبریز:

انتشارات آشینا، ۱۳۸۰.

۳۰۴ ص: مصور - جدول -

شابک: ۳-۵۶-۵۹۶۴-۹۶۴

ISBN 964-5964-56-3

Stepping motors and

microprocessor controls.

عنوان به انگلیسی:

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیپا (فهرست‌نویسی پیش از انتشار).

۱. موتورهای پله‌ای. ۲. موتورهای برقی. الف. سوگاوارا، اکیرا، نویسنده همکار. ب. تقی‌زادگان کلانتری، نوید، مترجم. ج. یوسف‌پور، امید، مترجم همکار. د. عنوان

۶۲۱/۴۶۲

TK۲۷۸۵/ک ۹ م

کتابخانه ملی ایران

۱۳۸۰



انتشارات آشینا

شابک ۳-۵۶-۵۹۶۴-۹۶۴/ ISBN 964-5964-56-3

نام کتاب	: موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپروسسوری آنها
مؤلفین	: تاکاشی کنجو - اکیرا سوگاوارا
مترجمین	: مهندس نوید تقی‌زادگان کلانتری - مهندس امید یوسف‌پور
ناظر فنی	: مهندس فرهاد آزادپور صالحی
ناشر	: انتشارات آشینا
نوبت چاپ	: اول - بهار - ۱۳۸۰
تعداد صفحه و قطع	: ۳۰۴ صفحه - وزیری
حروفچینی	: مؤسسه فرهنگی علمیران (مهدی خامنیان)
لیتوگرافی	: نگین فیلم (۵۵۳۰۹۱۲)
چاپ	: کیهان
صحافی	: لک‌لری
قیمت	: ۱۶۰۰ تومان

تیراژ: ۶۰۰۰ نسخه

حق چاپ محفوظ است

کلیه امور فنی، نمونه خوانی و صفحه آرائی این کتاب توسط مؤسسه فرهنگی علمیران انجام شده است.

مراکز پخش } تبریز - خیابان امام خمینی - بازار پارکینگ طوقانی تربیت - طبقه پائین - پلاک ۷ تلفن ۵۵۳۶۱۹۶
نشر آشینا } تبریز - خیابان جمهوری اسلامی - روبروی مسجد انگجی - کوچه علی‌خاں - پلاک ۲۰ - تلفن ۵۵۶۳۱۰۳

سخن ناشر:

کتابی که اکنون در اختیار شماست ترجمه کتاب «موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپروسسوری آنها» می‌باشد. این کتاب اثر «آکبر اسوگاوارا» و تاکاشی کنجوه دو تن از محققان بزرگ ژاپنی می‌باشد. پروفیسور کنجوه استاد دانشکده مهندسی برق و الکترونیک قدرت در دانشگاه یلی تکنیک ژاپن است و دکتر سوگاوارا مهندس ارشد در کمپانی سانئو دنیکی، که از پیشگامان سازندگان موتورهای پله‌ای در ژاپن است، می‌باشد. به هر حال انتشارات آشینا افتخار دارد که بعد از چاپ و نشر کتاب «اصول و کاربرد سنسورها - اثر پیتر هاپتمن» که برای اولین بار کتابی به زبان فارسی در رابطه با سنسورها را در ایران منتشر کرد، این کتاب را نیز برای اولین بار در ایران منتشر نماید. امید است این مجموعه نیز مانند سایر کتب منتشر شده این انتشارات مورد استقبال اساتید محترم و دانشجویان عزیز قرار بگیرد. در اینجا شایسته است از آقای مهندس نوید تقی‌زادگان و آقای مهندس امید یوسف‌پور که مسئولیت ترجمه این مجموعه را متقبل شده‌اند صمیمانه سپاسگزاری شود.

در خاتمه ضمن تقدیر و تشکر از کلیه همکارانی که به نحوی در آماده‌سازی این مجموعه با این انتشارات همکاری داشتند به استحضار کلیه اساتید محترم و دانشجویان علاقمند می‌رساند انتشارات آشینا با هدف نشر و توسعه کتب فنی مهندسی و علوم پایه از کلیه صاحب‌نظران محترم دعوت به همکاری می‌نماید. لذا کلیه عزیزانی که علاقمند به تالیف و یا ترجمه کتب دانشگاهی در زمینه‌های یاد شده هستند درخواست می‌شود با این انتشارات مکاتبه نمایند. امید است با همکاری و همفکری اساتید بزرگوار و صاحب‌نظران محترم در شکوفایی استعدادهای ایران عزیزمان گام هر چند کوچکی برداریم، انشاءالله.

بهار ۱۳۸۰
انتشارات آشینا



هر کاری ارزش آن را دارد که خوب انجام شود.

«ارسطو»

فهرست مطالب

۱ مقدمه و بررسی تاریخی

- ۱.۱ موتور پله‌ای چیست و مشخصه های اساسی آن کدامند؟ ۹
- ۱.۲ تاریخچه ابتدایی موتورهای پله ای ۱۱
- ۱.۳ ظهور عصر کنترل دیجیتال و پیشرفت در دهه ۱۹۶۰ ۱۳
- ۱.۴ پیشرفت سریع در دهه ۱۹۷۰ ۱۷
- ۱.۵ پیشرفت در ادوات نیمه هادی - کاربرد وسیع موتورهای پله‌ای ۲۰
- ۱.۶ مینیاتوری شدن به علت پیشرفت در مغناطیس و تکنولوژی کاربردی آن ۲۲
- ۱.۷ فعالیت های دانشگاهی ۲۳
- ۱.۸ ژاپن به تولید کننده اصلی موتورهای پله‌ای تبدیل می شود ۲۳
- مراجع ۲۵

۲ طرح کلی موتورهای پله ای مدرن

- ۲.۱ سیستم های کنترل حلقه - باز ۲۷
- ۲.۲ ویژگی های موتورهای پله ای از نقطه نظر کاربرد ۳۲
- ۲.۳ طبقه بندی موتورهای پله ای ۳۷
- ۲.۴ روشهای تحریک ۶۰
- ۲.۵ موتورهای پله ای تکفاز ۷۱
- ۲.۶ ویژگی مشخصه های موتور پله ای ۷۴
- مراجع ۷۶

۳ تئوری الکترومغناطیس و ساختار موتورهای پله‌ای

- ۳.۱ مکانیزم تولید گشتاور در یک موتور پله‌ای ۷۹
- ۳.۲ تئوری گشتاور تولید شده در موتورهای پله ای هیبرید ۹۴
- ۳.۳ ساختار دندانه، تعداد دندانه ها، تعداد پله بر دور، و تعداد قطب ها ۹۸
- مراجع ۱۰۲

۴ تئوری اساسی مشخصه‌های دینامیک موتورهای پله‌ای

۴.۱ روابط اساسی	۱۰۳
۴.۲ توابع تبدیل موتورهای پله‌ای	۱۱۰
۴.۳ پاسخ پله واحد	۱۱۵
۴.۴ مشخصه‌های گشتاور بر سرعت	۱۲۰
۴.۵ تشدیدها و ناپایداری‌ها	۱۲۴
۴.۶ میراکننده‌های مکانیکی	۱۳۱
مراجع	۱۳۶

۵ سیستم درایو و مدار کنترل حلقه - باز موتورهای پله‌ای

۵.۱ سیستم درایو	۱۳۹
۵.۲ توالی سازه‌های منطقی	۱۳۹
۵.۳ درایور موتور	۱۵۳
۵.۴ کنترلر ورودی	۱۶۷
۵.۵ کنترل افزایش و کاهش سرعت توسط یک ریزپردازنده	۱۷۱
مراجع	۱۸۸

۶ مشخصه‌های گشتاور و فواصل پالس - اندازه‌گیری و بکارگیری در طراحی سیستم

۶.۱ اندازه‌گیری مشخصه‌های استاتیک	۱۸۹
۶.۲ اندازه‌گیری مشخصه‌های دینامیک	۱۹۳
۶.۳ معادله دینامیک و افزایش سرعت	۲۰۱
۶.۴ تعیین زمانبندی‌ها و فواصل پالس	۲۰۶
۶.۵ ضمایم	۲۱۴
مراجع	۲۱۷

۷ کنترل حلقه - بسته موتورهای پله ای

۲۱۹	۷.۱ محدودیت های عملکرد حلقه - باز و نیاز به عملکرد حلقه - بسته
۲۱۹	۷.۲ مفهوم زاویه پیش
۲۳۲	۷.۳ سیستم با عملکرد حلقه - بسته با استفاده از یک ریز پردازنده
۲۴۱	۷.۴ سرو موتورهای درایو مستقیم
۲۴۳	۷.۵ ساخت مدارهای مجتمع برای عملکرد حلقه - بسته
۲۴۴	۷.۶ درایو رلوکتانس سوئیچ شده
۲۴۴	۷.۷ استفاده از شکل موجهای جریان بعنوان سنسور موقعیت
۲۴۵	مراجع

۸ کاربرد موتورهای پله ای

۲۴۷	۸.۱ لوازم جانبی کامپیوتر
۲۵۴	۸.۲ کاربردها در کنترل عددی
۲۵۷	۸.۳ کاربردها در ماشین های اداری
۲۵۹	۸.۴ کاربردها در تکنولوژی نیمه هادی
۲۶۲	۸.۵ موتورهای پله ای مورد استفاده در وسایل نقلیه فضایی و ماهواره ها
۲۶۴	۸.۶ کاربردهای دیگر
۲۶۷	مراجع

۹ ساخت موتورهای پله ای

۲۶۹	۹.۱ اساس طراحی و ساخت
۲۷۱	۹.۲ طراحی
۲۷۷	۹.۳ فرایند ساخت
۲۸۹	۹.۴ مدیریت تولید، کیفیت، و مشخصه ها
۲۹۲	۹.۵ توضیحات پایانی

فهرست راهنما

به نام خدا

مقدمه مترجمین:

سپاس خداوند را که بار دیگر توانائی عرضه کتاب دیگری را به محافل علمی کشور اسلامی و عزیزان ایران به ما عطا فرمود. کتابی که هم اکنون در اختیار خوانندگان علم دوست قرار دارد اولین کتاب منتشر شده در زمینه موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپروسسوری آنها می‌باشد که به همت مسئولین محترم انتشارات "آشینا" در تبریز، علی‌الخصوص جناب آقای جمشید میراب لکتری و آقای مهندس فرهاد آزادپور صالحی امکان ترجمه و چاپ و نشر را پیدا کرده است. در این کتاب موتورهای پله‌ای از نقطه نظر ساختمان، کاربرد و کنترل میکروپروسسوری بطور کامل و فراگیر مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و برای اینکار از روابط ریاضی، اشکال روشن کننده و دیاگرام های زیادی استفاده شده است. با اینحال همواره کارهای انجام شده در مقابل کارهای انجام نشده بسیار اندک است.

یک نیاز اساسی در ترجمه کتب علمی به زبان فارسی وجود یک فرهنگستان علمی فراگیر و کامل و مورد قبول همگان می‌باشد. برای اینکار لازم است که از دانش همه اهل فن در دانشگاه، صنعت و سایر مراکز علمی - آموزشی استفاده شود. ترجمه یک کتاب با اتکا به اصل امانتداری در انتقال مطالب و هم ارزی کلمات در دو زبان کار سهل و آسانی نیست. در خاتمه از آقای مهندس امید یوسف‌پور که زحمت اساسی در ترجمه این کتاب را به عهده داشته‌اند سپاسگزاری می‌شود.

بهار ۱۳۸۰
نوید تقی‌زادگان





مقدمه و بررسی تاریخی

این کتاب به ماشین‌های الکتریکی سوسوم به موتورهای پله‌ای یا پله^۱ می‌پردازد، و شامل ساختار، اصول، تئوری، تکنیکهای درایو، و کاربردهای آنها می‌شود. برای شروع ما تاریخچه‌ای کوتاه و پیشرفت تکنولوژی موتورهای پله‌ای را بررسی خواهیم کرد. به انواع مختلف موتور پله‌ای در این فصل اشاره شده است، اما جزئیات ساختاری موتورهای مدرن در فصل بعدی بررسی خواهد شد.

۱.۱ موتور پله‌ای چیست و مشخصه‌های اساسی آن کدامند؟

شکل ۱.۱ مقطع عرضی ساختار یک موتور پله‌ای مدرن نمونه را نشان می‌دهد؛ این موتور به نام موتور رلوکتانس متغیر تک پشته‌ای^۲ خوانده می‌شود. ما ابتدا با استفاده از این شکل نحوه عملکرد این ماشین را مطالعه خواهیم کرد. هسته استاتور دارای شش قطب یا دندانه برجسته می‌باشد، روتور هم دارای چهار قطب است، هر دو هسته روتور و استاتور از جنس فولاد نرم هستند. سه دسته سیم پیچی همانطور که در شکل نشان داده شده، آرایش داده شده‌اند. هر دسته دارای دو کلاف است که بصورت سری متصل شده‌اند. یک دسته از سیم پیچی‌ها فاز نامیده می‌شود، و نتیجتاً این ماشین یک موتور سه فاز است. جریان از یک منبع تغذیه DC از طریق کلیدهای I، II، III به سیم پیچی‌ها تأمین می‌شود. در وضعیت (۱)، سیم پیچی فاز I از طریق جریان کلید I تغذیه می‌شود، یا به اصطلاح فنی فاز I تحریک می‌شود؛ شار مغناطیسی ناشی از تحریک که در فاصله هوایی واقع می‌شود با پیکانهایی نشان داده شده است. در وضعیت (۱)، دو قطب برجسته استاتور فاز I که تحریک شده‌اند با دو دندانه از چهار دندانه روتور هم‌ردیف هستند. این حالت از نظر دینامیکی یک حالت تعادل است. هنگامیکه کلید II برای تحریک فاز II علاوه بر فاز I بسته می‌شود. شار مغناطیسی در قطبهای استاتور فاز II به حالت نشان داده شده در وضعیت (۲) بوجود می‌آید، و گشتاوری در جهت عکس ساعتگرد باعث کش^۳ در خطوط خمیده میدان مغناطیسی بوجود می‌آید. از اینرو روتور سرانجام به وضعیت (۳) خواهد رسید.

از اینرو روتور با یک زاویه ثابت می‌چرخد، که زاویه پله^۴ خوانده می‌شود، که در این مورد 15° با انجام هر عمل سوئیچینگ است. اکنون اگر کلید I برای تخلیه انرژی فاز I باز شود، روتور 15° دیگر برای رسیدن به وضعیت (۴) حرکت خواهد کرد.

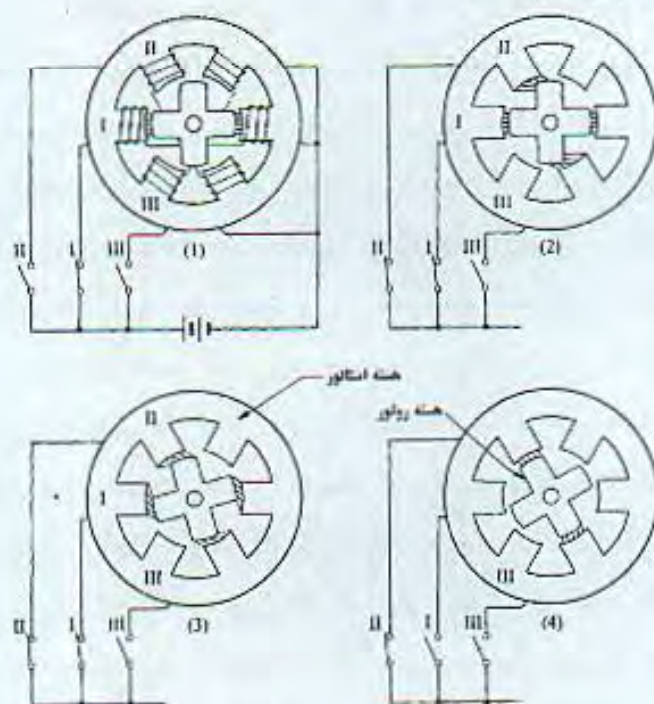
1- stepping or step motors
3- tension

2- single - stack variable - reluctance motor
4- step angle

پس موقعیت زاویه‌ای روتور را می‌توان بر حسب واحدهای زاویه پله از طریق فرایند سوئیچینگ کنترل کرد. اگر سوئیچینگ به ترتیب انجام شود، روتور با حرکتی پله‌ای خواهد چرخید: سرعت متوسط را هم می‌توان از طریق فرایند سوئیچینگ کنترل کرد.

امروزه، ادوات حالت جامد^۱ بعنوان سوئیچ‌های الکترونیکی در درایو یک موتور پله‌ای بکار می‌روند، و سیگنال‌های سوئیچینگ توسط IC های دیجیتال یا ریزپردازنده تولید می‌شوند (شکل ۱.۲). همانطور که در بالا ذکر شد، موتور پله‌ای یک موتور الکتریکی است که ورودی الکتریکی دیجیتال را به یک حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. در مقایسه با دیگر ادواتی که می‌توانند اعمال مشابه یا یکسانی را انجام دهند، سیستم کنترلی که از یک موتور پله‌ای بهره می‌برد دارای چندین مزیت مشخص به ترتیب زیر است:

۱. معمولاً به هیچ فیدبکی برای کنترل موقعیت^۲ یا کنترل سرعت نیازی نباشد.
 ۲. خطای موقعیت جمع ناپذیر^۳ است.
 ۳. موتورهای پله‌ای با تجهیزات دیجیتال مدرن سازگار هستند.
- به این دلایل، انواع و کلاس‌های مختلف موتورهای پله‌ای در لوازم جانبی کامپیوتر، دستگاههای خودکار، و سیستم‌های مشابه بکار رفته‌اند.



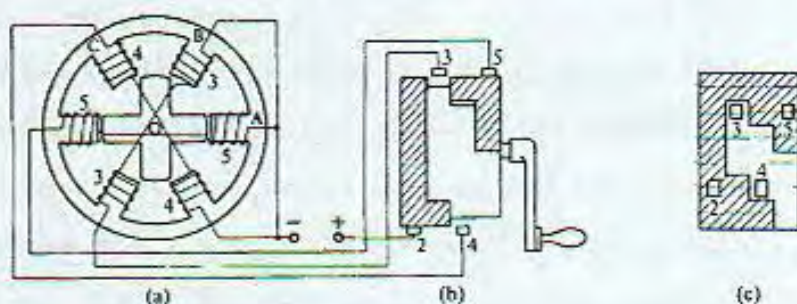
شکل ۱.۱ اساس یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر.

- 1- solid - state devices
- 3- non-cumulative

- 2- position



شکل ۱.۲: سیستم درایو مدرن برای یک موتور پله‌ای.



شکل ۱.۳: یک موتور پله‌ای بکار رفته در ناوهای جنگی انگلستان در دهه ۱۹۲۰؛ (a) موتور؛ (b) کلیدگردان.

۱.۲ تاریخچه ابتدایی موتورهای پله‌ای

در شماره‌ای از *JIEE*^[۱] چاپ سال ۱۹۲۷ مقاله‌ای با عنوان^۱ 'کاربرد الکتریسته در ناوهای جنگی' وجود داشت، و بخشی از این مقاله یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر سه فاز از نوع فوق را تشریح می‌کرد که برای کنترل از راه دور نشانگر جهت تفنگها و لوله‌های اژدرافکن^۱ در ناوهای جنگی انگلیسی بکار رفته بود. همانطور که در شکل ۱.۳ نشان داده شده، یک کلید گردان مکانیکی برای سوئیچینگ جریان تحریک بکار رفته بود. یک دور چرخش هندل شش پالس پله‌ای تولید می‌کنده باعث 90° حرکت روتور می‌شود. حرکت روتور در پله‌های 15° بمنظور رسیدن به دقت موقعیتی^۲ لازم کاهش می‌یافت.

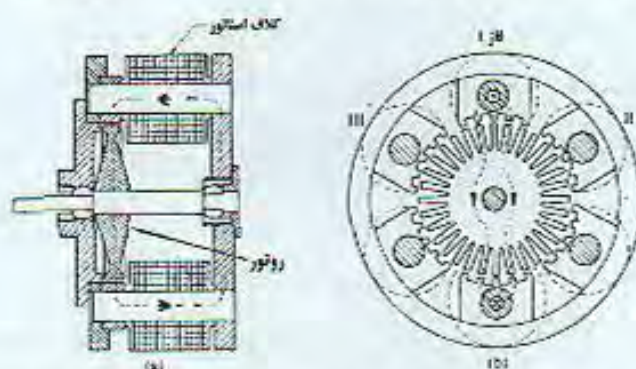
در این مقاله اشاره شده بود که در طراحی این موتور پله‌ای ظاهراً^۳ ساده فاکتورهای بسیاری می‌بایست مورد توجه قرار گیرند و احتیاطهای بسیاری بمنظور عملکرد مطلوب و مطمئن لحاظ شوند. این ماشین نیاز به نسبت بالای گشتاور به اینرسی اجزاء متحرک بمنظور اجتناب از از دست دادن پله دارد، و ثابت زمانی، نسبت اندوکتانس مدار به مقاومت، بایستی کوچک باشد تا به سرعت

1- torpedo tubes

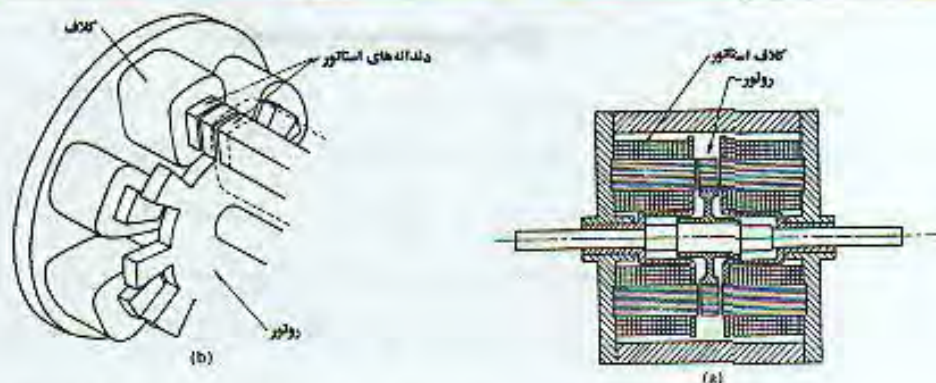
2- positional accuracy

عملکرد بالایی دست یافت. این مسائل هنوز هم در موتورهای مدرن وجود دارند. بر اساس مقاله‌ای^[2] در *IEEE Transactions on Automatic Control*، موتورهای پله‌ای بعدها در نیروی دریایی ایالات متحده با هدفی مشابه بکار گرفته شدند. با اینکه کاربردهای عملی موتورهای پله‌ای مدرن در دهه ۱۹۲۰ واقع شد، اشکال اولیه موتورهای رلوکتانس متغیر به واقع از قبل وجود داشتند. در مقاله‌ای نوشته Byrne^[3] آمده است: 'موتورهای رلوکتانس از نوع پله‌ای، که اکنون بعنوان ادوات تعیین موقعیت^۱ بکار می‌روند، مثل "ماشین‌های بخار الکترومغناطیسی"، موتورهای الکتریکی نیمه قرن نوزدهم بودند. ما در اینجا به دو اختراع قابل ذکر در سال‌های ۱۹۱۹ و ۱۹۲۰ در انگلستان می‌پردازیم.

(۱) ساختار دندانه‌ای برای به حداقل رساندن زاویه پله. امتیاز اختراعی در انگلستان در سال ۱۹۱۹ توسط یک مهندس عمران در آبردین، اسکاتلند، بنام C.L.Walker بخاطر اختراع نوعی ساختار موتور پله‌ای اخذ شد که قادر بود با زاویه‌های پله کوچک حرکت کند. شکل (b) و (a) ۱.۴ بترتیب دید مقطع طولی و عرضی یک موتور سه فاز از نوع ثبت شده را نشان می‌دهند. هر یک از قطبهای برجسته دارای یک گروه دندانه کوچک است. دندانه‌های روتور در گام یکسان با دندانه‌های کوچک استاتور می‌باشند، تعداد دندانه‌های روتور در این شکل ۳۲ می‌باشند. هنگامیکه فاز I تحریک می‌شود و شار مغناطیسی در طول مسیری که با منحنی خط چین روی شکل نشان داده شده واقع می‌شود، گروههای دندانه‌ها در این فاز با برخی دندانه‌های استاتور همانطور که در شکل (b) ۱.۴ نشان داده شده هم‌ردیف می‌شوند. در این آرایش، دندانه‌های روتور و استاتور در فازهای II و III بایستی به اندازه $1/3$ گام دندانه در جهات متقابل نا هم‌ردیف^۲ شوند. هنگامیکه جریان تحریک از فاز I به فاز II سوییچ می‌شود، روتور در جهت ساعتگرد به اندازه یک زاویه پله که در این مورد $3/75^\circ = 3/32$ می‌باشد خواهد چرخید. بهرحال اگر جریان تحریک به فاز III سوییچ شود، چرخش در جهت



شکل ۱.۴. یک موتور پله‌ای سه فاز اختراع شده توسط C.L.Walker.



شکل ۱.۵. موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر اختراع J.M.Thain و C.B.Chicken

عکس ساعتگرد با همان زاویه کوچک خواهد بود. Walker در مشخصات اختراع ثبت شده طرحی را برای ساخت نوعی از موتور پله‌ای که امروزه به نام نوع رلوکتانس متغیر چند پشته‌ای خوانده می‌شود به همراه طرح‌هایی برای ساخت یک موتور خطی ارائه کرد. به‌رحال در دهه ۱۹۵۰ بود که موتورهای پله‌ای مدرن که از اساس این اختراع بهره می‌بردند بصورت تجاری عرضه شدند.

(۲) تولید گشتاوری بزرگ از یک ساختار ساندویچی. J.M.Thain و C.B.Chicken در نیوکاسل در تین^۱ به سال ۱۹۲۰، امتیاز اختراعی را در آمریکا^[۵] بخاطر اختراع یک موتور پله‌ای که می‌توانست گشتاور بزرگی به ازای واحد حجم روتور تولید نماید به ثبت رساندند. ساختار طولی این ماشین در شکل (a) ۱.۵ نشان داده شده است، که ویژگی قابل ذکر آن فولاد نرم روتور است که پی‌درپی از بین دو هسته الکترومغناطیس متقابل همانطور که در شکل (b) ۱.۵ نشان داده شده است عبور می‌کند. این ساختار، که در آن دندانه‌های روتور بوسیله دندانه‌های استاتور احاطه شده‌اند تنها ساختار شناخته شده است که می‌تواند بزرگترین گشتاور را از یک واحد حجم روتور تولید کند. اما در دهه ۱۹۷۰ بود که یک موتور پله‌ای با بهره‌گیری از این قاعده به‌منوان یک موتور پله‌ای قدرت در ماشین‌های کنترل عددی (NC) ساخت شرکت ژاپنی Fanuc Ltd بکار گرفته شد.

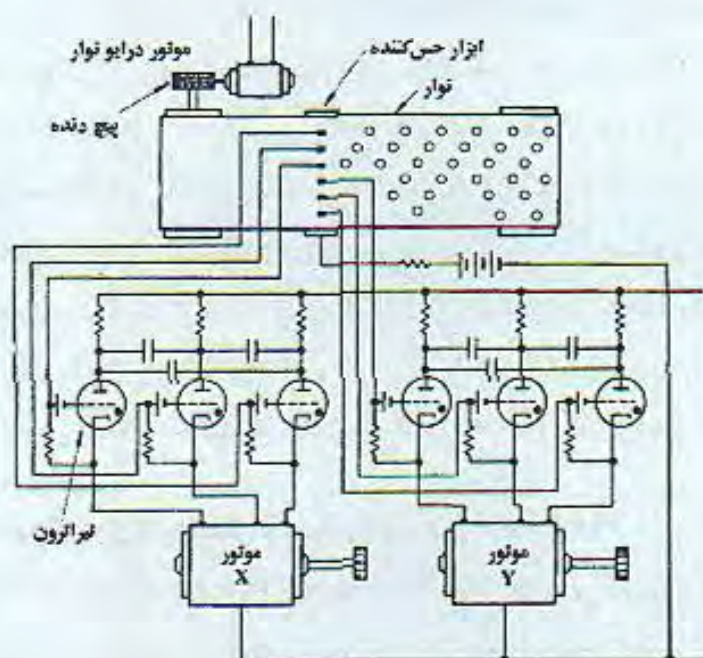
۱.۳ ظهور عصر کنترل دیجیتال و پیشرفت در دهه ۱۹۶۰

شماره ژانویه ۱۹۵۷ مجله *Control Engineering*^[۶] شامل گزارشی تاریخی در مورد کاربردهای مدرن موتورهای پله‌ای تحت عنوان 'موتور پله‌ای قدرت - محرک دیجیتال نوین' بود. این گزارش به سیستمی از سه موتور پله‌ای می‌پرداخت که در برجسته‌کاری^۲ سه محوری عددی در یک ماشین فرزکاری بکار رفته بود. نوع موتور بکار رفته در این سیستم موتور رلوکتانس متغیر چند پشته‌ای است،

که روتور آن مطابق شکل ۱.۶ است؛ ادوات سوئیچینگ لامپهای گازی تیراترون بودند. سیستم درایو در شکل ۱.۷ نشان داده شده است. حرکات سه موتور بطریقه دستی یا بصورت محفوظ روی نوارهای پانچ شده برنامه ریزی شده‌اند. حرکات توسط یک هد خواندن فتو الکتریک که سیگنالهای کستریلی به تیراترونها را تأمین می‌کند خوانده می‌شود. سه موتور پله‌ای بمنظور حرکت میز در فضایی سه محوری بصورت برنامه ریزی شده عمل می‌کنند و از اینرو ماشینکاری خودکار انجام می‌گیرد. همزمان با چاپ این گزارش، کار تحقیقاتی بسیاری بمنظور بهبود عملکرد موتورهای پله‌ای در کشورهای پیشرفته صنعتی آغاز شده بود.

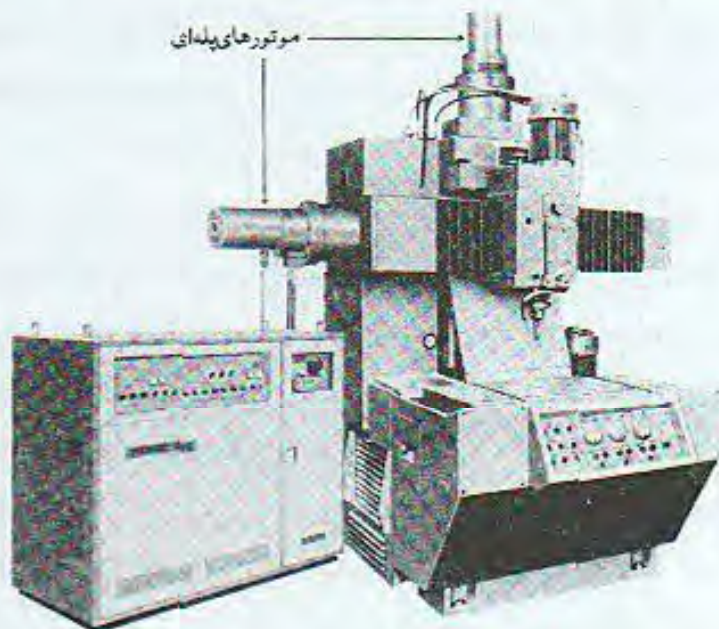


شکل ۱.۶. روتور یک موتور پله‌ای رلوکثانس متغیر چند پشته‌ای.



شکل ۱.۷. کنترل عددی سه بعدی قطعه کار بوسیله موتورهای پله‌ای رلوکثانس متغیر درایو

شده با تیراترون‌ها. (مطابق مرجع [۶])

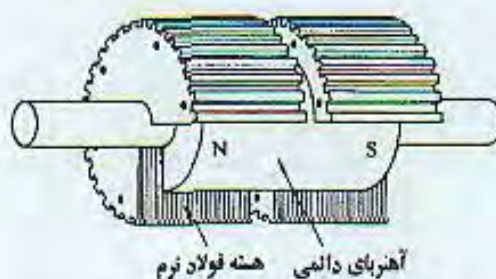


شکل ۱۹. یک دستگاه فرزکاری با کنترل عددی که از موتورهای پله‌ای هیدرولیک استفاده می‌کند. (محصول Fanuc Ltd)

به این خاطر که گشتاور و توان خروجی بزرگی برای تحریک یک دستگاه NC لازم است، موتورهای پله‌ای الکترو هیدرولیک با ترکیب موتورهای پله‌ای معمولی و یک مکانیزم فشار روغنی بطور گسترده در سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۴ در ژاپن به کار گرفته شدند (شکل ۱۸). شکل ۱۹ یک دستگاه فرزکاری^۱ ساخت سال ۱۹۶۱ است، که از موتورهای الکترو هیدرولیک برای عملیات سه محوری استفاده می‌کند، المانهای سوئیچینگ ترانزیستورهای ژرمانیوم هستند. بر اساس چندین گزارش

1- milling machine

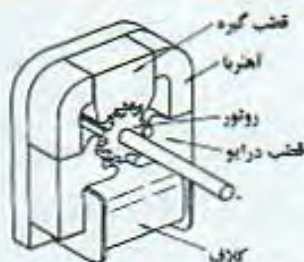
([7]-[11])، از ساخت موتورهای پله‌ای در آمریکا در دهه ۱۹۶۰ آگاهی داریم. بیست و هشت سازنده در مرجع [10] و بیست و یک سازنده در مرجع [11] فهرست شده‌اند، و آشکار است که بیش از نیمی از سازندگان، موتورهای پله‌ای مکانیکی یا موتورهای با ضامن چرخ دنده سیملوله‌ای^۱ تولید می‌کردند. ساختار و مکانیزم یک موتور با ضامن چرخ دنده سیملوله‌ای نمونه در مرجع [8] آورده شده است. سه نوع موتور پله‌ای^۲ 'الکترومغناطیسی' که از آهنربای دائمی بهره می‌برند، در کنار موتورهای رلوکتانس متغیر، به تازگی ظهور کرده بودند. ساده‌ترین آنها نوعی است که در حال حاضر بنام^۳ 'نوع آهنربای دائمی^۲' یا 'موتور PM' خوانده می‌شود. استاتور این نوع موتور دارای قطبهای برجسته می‌باشد، و روتور یک آهنربای دائمی استوانه‌ای مشابه به روتور یک موتور سنکرون معمولی می‌باشد. نوع دوم موتور هیبرید^۳ است، که روتور آن دارای ساختار نشان داده شده در شکل ۱.۱۰ می‌باشد؛ یک آهنربای دائمی استوانه‌ای که بطور محوری قطبیده شده با هسته‌های فولادی نرم دندانه‌دار پوشیده شده است. این ماشین با ترکیب اصول موتور آهنربای دائمی و موتور رلوکتانس متغیر بعنوان یک موتور پله‌ای عمل می‌کند. این ماشین توسط K.M.Feiertag و J.T.Danahoo از کمپانی General Electric اختراع و در آمریکا ثبت شد [12]. این نوع از موتور برای اولین بار توسط کمپانی General Electric و کمپانی Superior Electric بعنوان موتور سنکرون با سرعت پایین برای کار در سرعتهای کمتر از 100 r.p.m با استفاده از یک منبع ۶۰ Hz ساخته شد. بنظر می‌رسد که کمپانی دوم به این موتور نام تجاری 'slo-syn' داد و بتدریج آنرا برای استفاده بعنوان یک موتور پله‌ای بهبود بخشید. نوع سوم موتور که از آهنرباهای دائمی سود می‌برد یک موتور پله‌ای تکفاز است که توسط شرکت Sigma Instruments Inc. تحت عنوان تجاری 'Cyclonome' از ۱۹۵۲ تاکنون تولید شده است. این ماشین دارای یک ساختار منحصر بفرد با وجود دو آهنربا در استاتور خود است، که ترکیب آن در شکل ۱.۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱.۱۰. ساختار روتور در موتور پله‌ای هیبرید.

- 1- solenoid - ratchet motor
- 3- hybrid motor

- 2- permanent magnet



شکل ۱.۱۱. ساختار موتور پله‌ای Cyclonome.

اندازه موتورهای پله‌ای از آن زمان تاکنون به روش مشابه در سروموتورها^۱ بیان شده است (بطور مثال انواع ۰.۸ و ۱.۱ و ۱.۵ و ۱.۸ و ۲.۰ و ۲.۳ و ۳.۴ که در آن ۰.۸ و ۱.۱ به موتورهای با قطر بترتیب ۰/۸ و ۱/۱ اینچ اشاره می‌کنند).

از ابتدای دهه ۱۹۶۰ سازندگان کامپیوتر به امکان استفاده از موتورهای پله‌ای بعنوان محرک در ادوات ترمینال توجه کردند و پیشرفت موتورهای قابل اطمینان، با عملکرد بالا را سرعت بخشیدند. J.P.Pawletko ابتکار عمل را بدست گرفت و موتورهای پله‌ای را در محصولات IBM در اواسط دهه ۱۹۶۰ باب کرد.

در ۱۹۶۷، شرکت Sanyo Denki Co Ltd تولید سریال موتورهای هیبرید را تحت عنوان تجاری Step-Syn آغاز کرد (شکل ۱.۱۲). کمپانی Superior Electric، که کار را زودتر آغاز کرده بود، ماشین‌های سنکرون slo-syn را بعنوان یک موتور پله‌ای ۱/۸° تولید می‌کرد، و با بهره‌گیری از تمامی منابع تولید سریال موتورهای هیبرید که در سری M- مشاهده شد را در دهه ۱۹۷۰ آغاز کرد. تولید موتورهای پله‌ای هیبرید ۱/۸° توسط Sigma Instrumet Inc. در سال ۱۹۶۹ آغاز شد. توسعه موتور هیبرید پنج فاز، که سازنده آلمانی Berger Lahr آنرا بر عهده گرفته بود، استفاده از موتورهای پله‌ای را در برخی ماشینهای کنترل عددی افزایش داد، و رقابت یا همزیستی با سروموتورهای DC بدون جاروبک نمایان شد.

۱.۴ پیشرفت سریع در دهه ۱۹۷۰

پیش از آغاز دهه ۱۹۷۰، موتورهای پله‌ای با عملکرد دینامیک بسیار خوب در دسترس بودند. پس از ورود به دهه ۱۹۷۰، رشد سریعی در تعداد موتورهای پله‌ای بکار رفته در صنعت کامپیوتر مشاهده شد (شکل ۱.۱۳) و این امر منجر به تولید انبوه موتورها شد. در ایالات متحده آمریکا، ساخت چاپگرهای دارای موتورهای پله‌ای و سروموتورهای DC بصورت تجاری مخاطره آمیز

1- servomotors

درآمد. چاپگرهایی که سیستم‌های کنترل موتور الکتریکی را در برداشتند، با بکارگیری مدارهای مجتمع بجای مکانیزم‌های پیچیده معمول در گذشته، برای مهندسين جوان دارای جاذبه قوی بودند زیرا به آنها امکان بهره‌گیری آزاد از دانسته‌های الکترونیک‌شان را می‌داد. گرایش‌های مشابهی در سایر کشورهای صنعتی در سالهای نخستین دهه ۱۹۷۰ دیده شد. انواع برجسته موتورهای پله‌ای ساخته شده برای استفاده در لوازم جانبی کامپیوتر در طول این دهه شامل موارد زیر می‌شود:

موتورهای دوفاز با پله‌های $1/8^\circ$ ؛

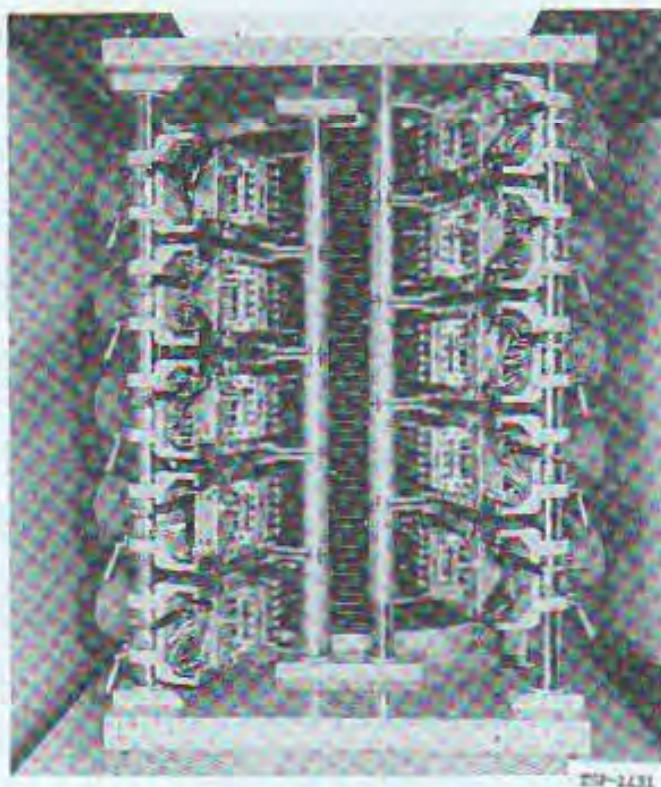
موتورهای هیبرید دوفاز با پله‌های 2° ، $2/5^\circ$ ، 5° ؛

موتورهای آهنربای دائمی با پله‌های $7/5^\circ$ ، 45° ، 90° ؛

موتورهای رلوکتانس متغیر سه و چهار فاز با پله‌های $7/5^\circ$ یا 15° ؛

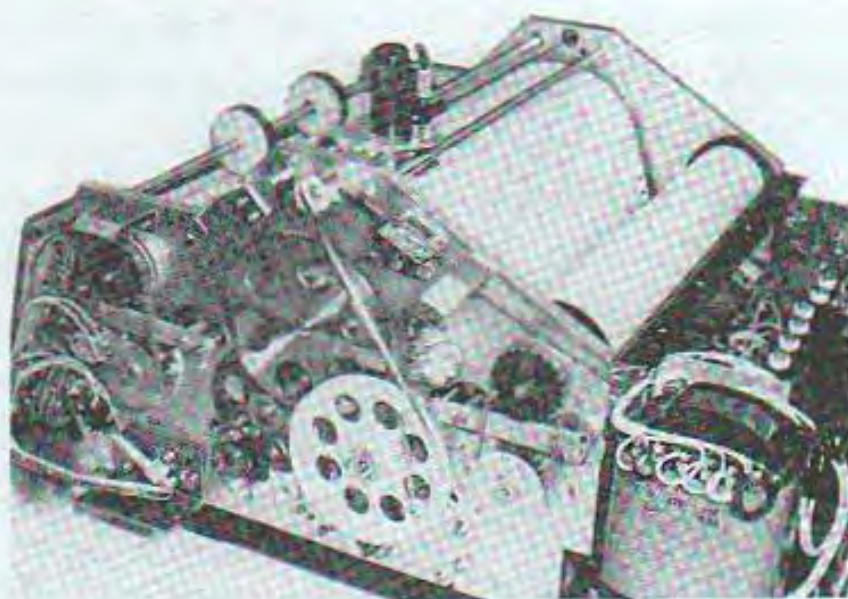
موتورهای رلوکتانس متغیر با ۱۲۸ یا ۱۳۲ پله‌بردور.

دسته آخر شامل موتورهای تک منظوره برای چاپگر سریال می‌شود که برای انطباق تعداد کاراکترهای بکار رفته در خط طراحی شده است.



شکل ۱.۱۲. واحد حافظه دیسک ظرفیت بالا با استفاده از ده موتور پله‌ای نوع سه پشته 12° .

(ساخت Sanyo Denki Co Ltd.)



موتورهای پله‌ای در پشت پاتل کاری هستند



شکل ۱.۱۳ کاربرد موتورهای پله‌ای در رسم - XY ساخته شده در اواسط دهه ۱۹۷۰.

در سالهای نخستین دهه ۱۹۷۰، ماشینهای نقشه‌کشی^۱ خودکار^[۱۳] با بهره‌گیری از موتورهای پله‌ای سطحی از نوع هیبرید ظاهر شدند. در اواخر دهه ۱۹۷۰ بود که موتورهای خطی از نوع رلوکتانس متغیر بمنظور انتقال حامل در پرستهای سریال^[۱۴] همانطور که در شکل ۱.۱۴ نشان داده شده بکار گرفته شدند. بهرحال، کاربرد موتورهای خطی همانگونه که از ابتدا انتظار می‌رفت بدلیل اندازه بزرگ و انعطاف ناپذیری در طراحی ترقی نکرده‌اند.

در موتورهای پله‌ای بکار رفته در ماشینهای NC نیز پیشرفت حاصل شد. در سال ۱۹۷۳، Fanuc Ltd. با رهبری S.Inaba، به ساخت یک موتور پله‌ای توان بالای منحصر بفرد نائل شد. این موتور

یک موتور رلکتناس متغیر چند پشته‌ای است، اما از ساختار ساندویچی پیشنهاد شده در مرجع [2] برای اعمال گشتاوری بالا بهره می‌برد؛ از این موتور در ماشین‌های با کنترل عددی استفاده شده است. بهرحال، بزودی این موتور با یک سروموتور DC جایگزین شد. یک دلیل برای اینکار محدودیتی است که موتورهای پله‌ای در دستیابی به حرکت پایانی آرام دارا هستند، دلیل دیگر نیز پیشرفت‌های حاصل شده در سیستم‌های درایو دیجیتال برای موتورهای DC بود.

در زمینه کامپیوترها هم سروموتورها در جایی که سرعت‌های بالا و کاهش / افزایش سریع ضروریست بکار گرفته شده‌اند، بعنوان مثال در درایوهای گردونه دیزی^۱ و محورهای گرداننده^۲ نوار مغناطیسی. اما در موتورهای DC کموتاتور و جاروبک‌ها در برابر سایش مکانیکی قرار دارند. تجربه با موتورهای پله‌ای نشان می‌دهد که آنها از مشکلات سایش مکانیکی بدور هستند و قابلیت اعتماد بالایی را فراهم می‌کنند.

۱.۵ پیشرفت در ادوات نیمه هادی - کاربرد وسیع موتورهای پله‌ای

همچون زمینه‌های دیگر، پیشرفت تکنولوژی موتورهای پله‌ای در کنار پیشرفت ترانزیستورها و دیگر ادوات نیمه هادی صورت گرفت. در سال ۱۹۴۷، ترانزیستور اتصال نقطه‌ای^۳ توسط آزمایشگاه تلفن بل اختراع شد. به دنبال اختراع ترانزیستورهای پیوندی در سال ۱۹۵۱، ادوات حالت جامد با سرعت واقعا^۴ خیره‌کننده‌ای پیشرفت کردند.

در سال ۱۹۵۳ تولید انبوه ترانزیستورهای پیوندی در ایالات متحده آمریکا آغاز شد. در آغاز، در درایوهای موتور پله‌ای، اتصالات مکانیکی یا رله‌ها بکار می‌رفتند. سپس، لامپهای خلاء یا لامپهای گازی نشان داده شده در شکل ۱.۱۵ بکار گرفته شدند، اما بتدریج با ادوات حالت جامدی چون ترانزیستورها و تریتورها جایگزین شدند. با اینکه سیستم درایو، سال به سال کاربرد آسانتری را فراهم می‌کرد هنوز دارای مدار منطقی پرهزینه‌ای بود. از اینرو، با انتظارت بالایی که مشاهده می‌شد، تنها اندکی از موتورهای پله‌ای در دهه ۱۹۶۰ بکار گرفته شدند. ترانزیستورهای MOS مفید در کاربرد عملی در سال ۱۹۶۴ عرضه شدند. سال بعد مدارات مجتمع دیجیتال ظاهر شدند. در سالهای بعد، توسعه تا حد مدارات مجتمع متوسط^۴، و بعدتا مدارات مجتمع زیاد^۵ پیشرفت کرد. در نتیجه، بخش مدارات منطقی در یک سیستم درایو موتور پله‌ای کوچک شد، البته با تضمین افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها. تا آن زمان، کاربردهای بیشتری از موتورهای پله‌ای از نظر اقتصادی میسر شد. همانطور

1- daisy wheel

2- capstans

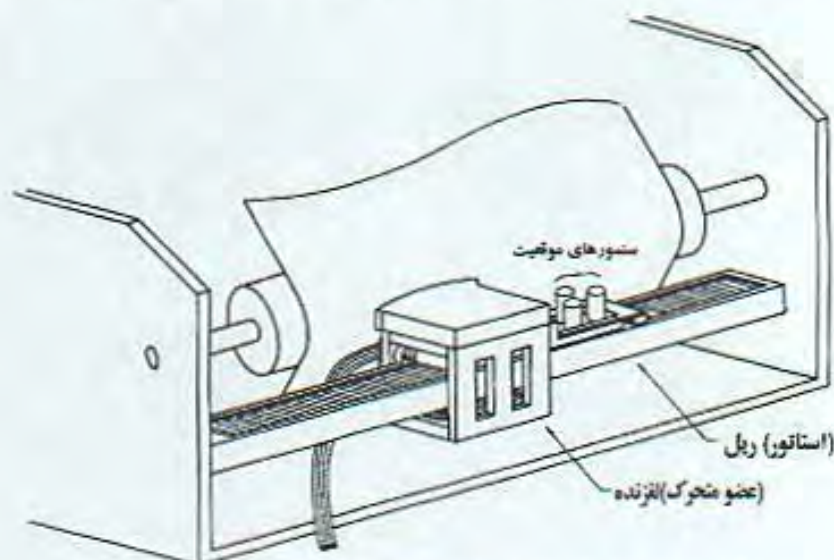
3- point - contact

4- middle-scale

5- large-scale

که در بالا اشاره شد. در طول دهه ۱۹۷۰ بود که رشد انفجاری در تعداد موتورهای پله‌ای مورد استفاده مشاهده شد.

پیشرفت تکنولوژی نیمه‌هادی به نظر می‌رسد که هیچ پایانی ندارد. در سال ۱۹۷۱، شرکت Intel ساخت ریزپردازنده چهار بیتی را اعلام کرد. سپس ریزپردازنده هشت بیتی با محدوده کاربرد وسیع،



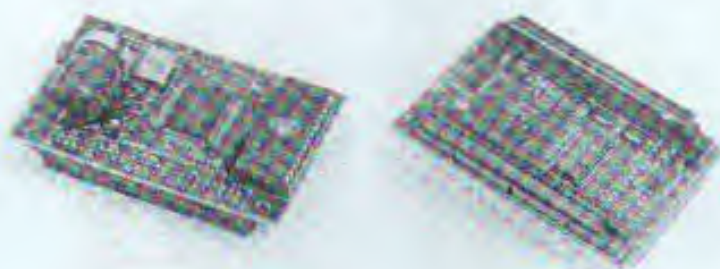
شکل ۱.۱۴ اصول یک موتور پله‌ای خطی بکار رفته در یک چاپگر سریال.
(مطابق مرجع [۱۴].)



شکل ۱.۱۵ لامپ گازی نیراترون که در دهه ۱۹۶۰ در رایو موتورهای پله‌ای بکار رفته است،
و مدار مجتمع حالت جامد جدید.

توسط شرکت Intel (۱۹۷۲) و Motorola (۱۹۷۴) به بازار عرضه شد. همانطور که در ابتدای این فصل ذکر شد، موتور پله‌ای هنگامی که بعنوان محرک در سیستم‌های کنترل دیجیتال اعمال شود ماشینی عالی است. با در دسترس قرار گرفتن ریزپردازنده‌ها به عنوان واحدهای پردازش مرکزی، در عملی

ساختن کاربرد آنها در سیستمهای کنترل موتورهای پله‌ای به نظر تنها مساله زمان مطرح بود. در واقع، در اواخر دهه ۱۹۷۰، ریزپردازنده‌ها کاربردهای فراوانی در درایوهای موتور پله‌ای پیدا کردند. در دهه ۱۹۸۰ ریزپردازنده‌ها شاهد ترقی بیشتری بودند. اکنون در یک تراشه تنها، ذخیره وسیع



شکل ۱.۱۶. کنترلر تک بردی با پردازنده Z80، طراحی شده برای کنترل حرکت.
(محصول Showa Dengyo - Sha Co.Ltd.)

حافظه و اعمال جانبی می‌توانستند همراه شوند. شکل ۱.۱۶ یک کنترلر تک بردی^۱ را نشان می‌دهد که از پردازنده هشت بیتی با اعمال جانبی بهره می‌برد. ROM (= حافظه فقط خواندنی) انواع مختلفی از نرم‌افزار کنترل حرکت در موتورهای پله‌ای و دیگر موتورها را در کنار هم داراست. سرعت اجرا افزایش پیدا کرد و پردازنده‌های ۱۶ و ۳۲ بیتی ساخته شدند و توسعه در مدارات قدرت صورت گرفت. بجای ترکیب ادوات مجزا و گسسته، مدارات درایو مجتمع^۲ که در شکل ۱.۱۵ نشان داده شده بسیار رایج شدند.

۱.۶ مینیاتوری شدن به علت پیشرفت در مغناطیس و تکنولوژی کاربردی آن

تولید موفقیت آمیز آهنربای از نوع کمیاب در زمین^۳ طراحی مینیاتوری موتور پله‌ای را به پیش برد. هنگامی که آلنیکو^۴ در آهنربای اصلی موتورهای پله‌ای هیبرید بکار می‌رفت، کوتاهترین طول آهنربا می‌بایست ۱۰mm باشد. در موتورهای بکار رفته در تعیین موقعیت هد مغناطیسی یک درایو دیسک سخت، آهنربا دیسکی به ضخامت تنها ۱mm یا در حدود آن می‌باشد. بعلاوه، روش عناصر محدود^۵

1- One-board

2- modular

3- rare-earth magnet

۳- یک نوع آهنربای دائمی که از ترکیب کبالت و یک یا دو نوع از عناصر ذیل بوجود آمده است:

سربوم، لانتانوم، آلیاژمیش متال، پراسئودیمیم، ساماریوم یا تیریموم.

4- Alnico

5- finite element

در آنالیز مدارهای مغناطیسی منجر به کاهش اندازه ماشین شد. شکل ۱.۱۷ موتورهای پله‌ای مدرن را نشان می‌دهد.

۱.۷ فعالیتهای دانشگاهی

در اواخر دهه ۱۹۵۰ تحقیقات بسیاری روی موتورهای پله‌ای در دانشگاهها و آزمایشگاههای شورهای پیشرفته صنعتی آغاز شد. نتایج تحقیقات در مجلات و ژورنالهای فنی منتشر شدند. در دهه



شکل ۱.۱۷. موتورهای پله‌ای هیبرید ساخته شده در دهه ۱۹۷۰. دو موتور سمت چپ از یک آهنربای rare-earth استفاده می‌کنند.

۱۹۷۰، دو گردهمایی بین المللی برگزار شد که متخصصین گروههای صنعتی و دانشگاهی از سراسر جهان برای تبادل گزارشات گرد هم آمدند و بحثهایی را انجام دادند. یکی از آنها 'سمپوزیوم سیستمها و ادوات کنترل حرکت پیشرفته' بود که سالانه تا سال ۱۹۷۲ با ریاست پرفسور B.C.kuo از دانشگاه Illinois در Urbana-Champaign برگزار شد. و گردهمایی دیگر 'کنفرانس بین المللی ادوات و موتورهای پله‌ای' با ریاست پرفسور P.J.Lawrenson از دانشگاه Leeds انگلستان که تاکنون سه بار (در سالهای ۱۹۷۴، ۱۹۷۶، ۱۹۷۹) برگزار شده است. موتور پله‌ای همچنین به عنوان موضوعی در 'کنفرانس بین المللی ماشینهای الکتریکی کوچک' که توسط انستیتوی مهندسين برق در لندن به سال ۱۹۷۶ برگزار شد، انتخاب گردید.

۱.۸ ژاپن به تولیدکننده اصلی موتورهای پله‌ای تبدیل می‌شود

از آنجا که Sanyo Denki تأمین کننده اصلی موتورهای پله‌ای بکار رفته در محصولات IBM در دهه ۱۹۷۰ شد، شرکتهای ژاپنی بسیاری به تولید موتورهای پله‌ای مشغول شدند. انتشار کتابی که

ویرایش اول این کتاب بر اساس آن بود، کاربردهای فراوان و چاپ انبوه را در پی داشت. بیش از ۱۰۰۰۰ نسخه نه تنها توسط مهندسين و تكنسين‌ها بلکه توسط فروشندگانی که در کار ساخت و فروش مشغول بودند، خوانده شد. فاکتور دیگر در تحرک صنعت ژاپن در این زمینه کنفرانس و نمایشگاه Motortech Japan بود، که از طرف انجمن مدیریت ژاپن حمایت مالی می‌شد و توسط یکی از مؤلفین (T.K.)^۱ اداره می‌شد. این نمایشگاه سالانه موتورهای کوچک دقیق در سال ۱۹۸۳ آغاز شد و به سرعت در حدود ۲۰۰۰۰ بازدیدکننده را به خود جلب کرد. در نمایشگاه سال ۱۹۹۳، تعداد ۱۹ سازنده موتورهای پله‌ای را به نمایش گذاشتند و ۱۲ درصد از کل ۲۳۰۰۰ بازدیدکننده به آخرین اطلاعات در مورد این موتور علاقه‌مند بودند.

گفته می‌شود که (شکل ۱.۱۸)، چهار فاکتور اقتصادی وجود دارند که برای حیات صنعت دقیق لازم می‌باشند:

- (۱) نیاز به بازار مصرف با تکنولوژی پیشرفته؛
- (۲) تجربه در ساخت مواد و قطعات؛
- (۳) دسترسی به ماشینهای با عملکرد بسیار خوب و ماشینهای تولید مخصوص^۲؛
- (۴) تأمین منابع انسانی.

ژاپن این چهار فاکتور را در تولید موتور پله‌ای رعایت می‌کند. اینکه این صنعت در مناطق دیگر آسیا موفقیت آمیز باشد به این بستگی خواهد داشت که این موارد در آنجا چگونه رعایت می‌شوند.



شکل ۱.۱۸. عواملی که صنعت موتور پله‌ای را حمایت می‌کنند. (از کتاب موتورهای الکتریکی و کنترل آنها نوشته Kenjo و Kaneko)

مراجع فصل ۱

- [1] McClelland, W. (1927). The application of electricity in warships. *JIEE* 65, 829-71. (Related part: pp. 850-2.)
- [2] Kieburz, R. B. (1964). The step motor – The next advance in control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. January, pp. 98-104.
- [3] Byrne, J. V. and Lacy, J. C. (1976). *Characteristics of saturated stepper and reluctance motors*. IEE Conf. Pub. 136 (Small Electrical Machines), pp. 93-6.
- [4] Walker, C. L. (1919). Improvements in and connected with electro-magnetic step-by-step signalling and synchronous rotation. UK Patent 137,150.
- [5] Chicken, C. B. and Thain, J. H. (1920). Electrical signaling apparatus. US Patent 1,353,025.
- [6] Thomas, A. G. and Fleischauer, F. J. (1957). The power stepping motor – A new digital actuator. *Control Engineering* 4, (Jan.), 74-81.
- [7] Bailey, S. J. (1960). Incremental servos, Part I – Stepping vs. stepless control. *Control Engineering* 7, (Nov.), 123-7.
- [8] Bailey, S. J. (1960). Incremental servos, Part II – Operation and analysis. *Ibid.* 7, (Dec.) 97-102.
- [9] Bailey, S. J. (1961). Incremental servos, Part III – How they've been used. *Ibid.* 8, (Jan.), 85-8.
- [10] Bailey, S. J. (1961). Incremental servos, Part IV – Today's hardware. *Ibid.* 8, (March), 133-5.
- [11] Proctor, J. (1963). Stepping motors move in. *Product Engineering* 4, (Feb.), 74-88.
- [12] Feiertag, K. M. and Donahoo, J. T. (1952). Dynamoelectric machine. US Patent 2,589,999.
- [13] Hinds, W. E. (1974). The Sawyer linear motor. *Proc. Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. University of Illinois. pp. W1-W10.
- [14] Chai, H. D. and Pawletko, J. P. Serial printer with linear motor drive. US Patent 4,044,881.
- [15] Singh, G., Gerner, M., and Itzkowitz, H. (1979). Motion control aspects in the Qyx intelligent typewriter. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds. pp. 6-12.

طرح کلی موتورهای پله‌ای مدرن



در فصل پیش پیشرفت‌های تاریخی موتورهای پله‌ای را در رابطه با تکنولوژی کنترل عددی دنبال کردیم. در این فصل، نگاهی کلی به انواع گوناگون موتورهای پله‌ای که در حال حاضر بکار می‌روند خواهد شد، و ساختار و اصول اساسی آنها بدون استفاده از روابط ریاضی بررسی خواهند شد. اصطلاحات فنی که در رابطه با موتورهای پله‌ای بکار می‌روند تعریف و معانی آنها بررسی خواهد شد.

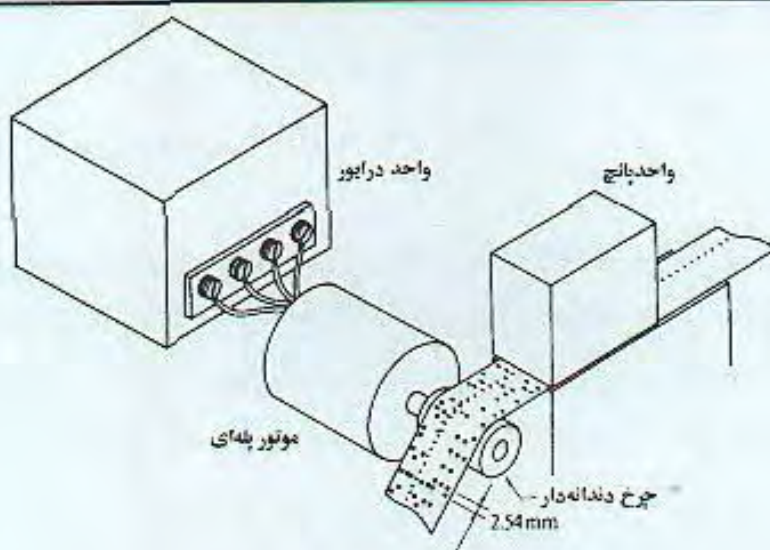
۲.۱ سیستم‌های کنترل حلقه - باز

بطور کلی، موتورهای پله‌ای توسط مدارات الکترونیک، اکثراً با منبع تغذیه DC، کار می‌کنند. موتور پله‌ای در مقایسه با موتورهای معمولی AC یا DC، که اکثراً بطور مستقیم از یک منبع تغذیه درایو می‌شوند، یک موتور منحصراً بفرست می‌باشد. به علاوه، موتورهای پله‌ای در کنترل سرعت و موقعیت بدون حلقه‌های فیدبک پرهزینه کاربرد پیدا می‌کنند. این روش درایو به نام درایو حلقه - باز خوانده می‌شود. این بخش به اصول کنترل حلقه - باز موتورهای پله‌ای خواهد پرداخت. جزئیات مدارات الکترونیک عملکرد حلقه - باز در فصل ۵ مورد بحث قرار گرفته‌اند.

با اینکه کنترل حلقه - باز از نظر اقتصادی روش درایو با صرفه‌ای است، از محدودیت رها نیست. بطور مثال، چرخش موتور در محدوده‌های سرعت مشخصی بشکل نوسانی و ناپایدار در می‌آید، و بخاطر این مشخصه رفتاری، سرعت و شتاب یک موتور پله‌ای کنترل شده توسط یک طرح حلقه - باز نمی‌تواند به سرعت یک موتور DC درایو شده توسط یک طرح کنترل - فیدبک باشد. از اینرو، در تلاش برای گسترش محدوده‌های کاربردی، توقف نوسان مسأله‌ای اساسی است که بایستی حل شود. کنترل حلقه - بسته که روش درایو موثر بدور از ناپایداری بوده و قادر به افزایش سرعت سریع می‌باشد در فصل ۷ بررسی خواهد شد.

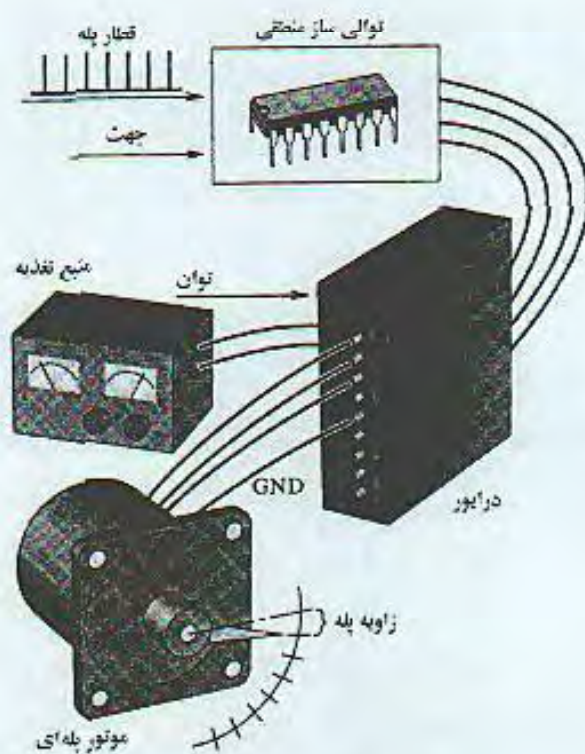
۲.۱.۱ ترکیب سیستم

برای درک ترکیب اساسی سیستم درایو موتور پله‌ای، درایو یک نوار پانچ را که در ماشینهای کنترل عددی بکار رفته بررسی می‌کنیم. یک پانچ کننده نوار از یک موتور پله‌ای برای فرستادن نوار کاغذ استفاده می‌کند (شکل ۲.۱) دستورالعمل‌های کاری ماشینهای کنترل عددی به شکل سوراخهای ایجاد شده توسط این وسیله ذخیره شده‌اند. سیستم درایو نوار را می‌توان بشکل ۲.۲ نشان داد.

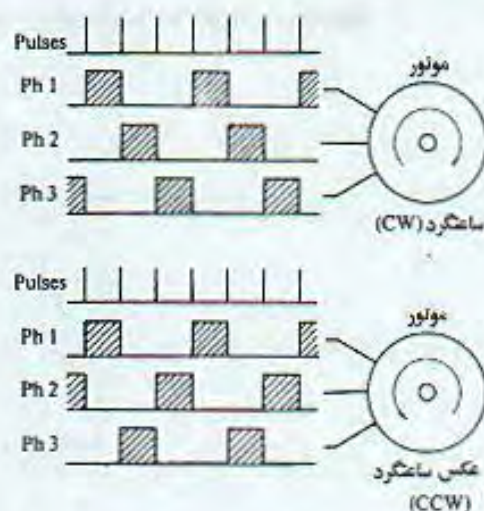


شکل ۲.۱. نوار پانچ.

همانطور که بعداً شرح داده خواهد شد، موتور پله‌ای بکار رفته برای این منظور معمولاً یک موتور دو - سه یا چهار فاز می‌باشد. در اینجا یک موتور سه فاز شامل سه دسته سیم پیچی را بررسی می‌کنیم.



شکل ۲.۲. سیستم درایو موتور پله‌ای. توالی ساز منطقی در واقع روی درایور نصب می‌شود.



شکل ۲.۳. سری پالسهای ورودی و ترتیب تحریک.

مهمترین ویژگی موتور پله‌ای این است که با یک زاویه ثابت به ازای هر پالس اعمال شده به توالی ساز منطقی^۱ می‌چرخد. مقدار نامی این زاویه (درجه) زاویه پله خوانده می‌شود. با دریافت یک پالس دستور پله، توالی ساز منطقی فاز را که باید تحریک (یا انرژی دار) شود و فاز را که بایستی تخلیه انرژی شود تعیین می‌کند، و سیگنالهایی به درایور موتور که طبقه کنترل کننده جریان تحویلی به موتور می‌باشد، می‌فرستد. توالی ساز منطقی معمولاً با تراشه‌های مدار مجتمع TTL یا CMOS ساخته می‌شود. هنگامیکه پتانسیل یک کانال خروجی توالی ساز منطقی در سطح H (= بالا) می‌باشد، درایور قدرت برای تحریک فاز متناظر سیم پیچی عمل می‌کند. بطور مشابه، اگر خروجی در سطح L باشد، فاز هم‌شماره تحریک نمی‌شود، یا خاموش می‌شود. همانطور که در شکل ۲.۳ نشان داده شده، اگر موتور با ترتیب تحریک $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \dots$ در جهت ساعتگرد (CW) حرکت کند، جهت چرخش با ترتیب عکس $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \dots$ در جهت عکس ساعتگرد (CCW) خواهد بود. در سیستم پانچ نوار، ترتیب معمولاً برای فرستادن نوار در یک جهت ثابت است. بطور کلی، هیچ قاعده مشخصی برای تعیین اینکه کدام جهت ساعتگرد یا عکس آن است وجود ندارد، موتوری که از یک سردرجهت ساعتگرد می‌چرخد اگر از سر دیگر دیده شود بنظر می‌رسد که در جهت عکس ساعتگرد حرکت می‌کند. جهت چرخش معمولاً با تطبیق بخشهای مورد نظر معین می‌شود.

در این کتاب فازها با Ph1، Ph2، Ph3 و غیره نشان داده شده‌اند. یا PhA، PhB برای برخی

موتورهای دو فاز. تحریک بکار رفته در شکل ۲.۳ تحریک تکفاز یا یکفاز^۱ خوانده می‌شود، و به این معنی است که به یک فاز از سه فاز (یا از چهار فاز در یک موتور چهار فاز) در هر لحظه توان تحویل داده می‌شود. تحریک تکفاز اغلب به منظور تشریح اصول اساسی موتورهای پله‌ای ذکر می‌شود. اما همیشه بهترین روش درایو کردن نیست. جزئیات این مساله در بخش ۲.۴ بحث خواهد شد.

۲.۱.۲ پله و نمو^۲

داده‌ها در هشت ردیف روی یک نوار ضبط شده‌اند؛ به این معنی که، در هر خط هشت سوراخ سیگنال می‌تواند موجود باشد. بعلاوه، بین ردیف‌های سوم و چهارم سوراخهای سیگنال، قطاری از سوراخهای راهنما^۳ وجود دارند که دندانه‌های چرخ دنده به آنها وارد می‌شوند. خطوط در فواصل ۱/۱ اینچی (۲/۴۵mm) قرار داده شده‌اند. هنگام ذخیره داده‌ها روی یک نوار بوسیله نوار پانچ‌کن دستی یا کامپیوتر، نوار ۲/۴۵mm جلو رانده می‌شود، برای پانچ یک خط متوقف می‌شود، و سپس به اندازه ۲/۴۵mm دیگر جلو برده می‌شود و دوباره متوقف می‌شود، و همینطور. ساده‌ترین راه برای پیش راندن نوار به اندازه گام یک خط اعمال یک پالس واحد به توالی ساز منطقی می‌باشد، به این ترتیب موتور به اندازه یک پله درایو شده، چرخ دنده با زاویه‌ای معادل یک پله چرخانده می‌شود، و از اینرو نوار به اندازه ۲/۴۵mm رانده می‌شود. اما روش دیگر درایو موتور پله‌ای به اندازه چندین زاویه پله برای پیش راندن نوار به اندازه یک خط است. بعنوان مثال، یک موتور چهار فاز با زاویه پله ۱/۸° را می‌توان برای پیش راندن نوار به اندازه گام یک خط با چهار پله بکار برد. قطر چرخ دنده به اندازه یک چهارم کاهش می‌یابد، و در نتیجه، اینرسی چرخ دنده به اندازه $1/256 = (1/4)^2$ برابر از چرخ دنده بکار رفته در روش حرکت تک پله‌ای کمتر خواهد بود.

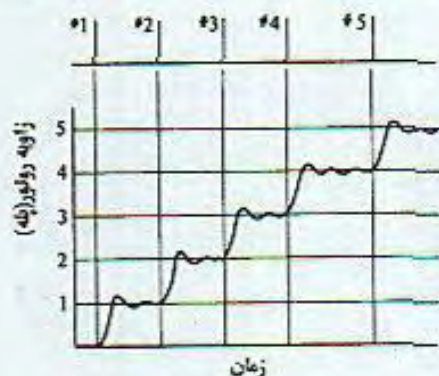
حرکت واحدی که نوار کاغذی را به اندازه یک گام خط، در مورد بالا ۲/۴۵mm، پیش می‌رانند، اغلب یک نمو نامیده می‌شود. یک نمو توسط یک پله واحد در مثال اول، و با چهار پله در مثال پیش تحقق می‌یابد. در سیستم نشان داده شده در شکل ۲.۲، موتور مدت زمان مشخصی بعد از تکمیل حرکت یک نمو توقف می‌کند، تا نوار پانچ شود، و این چرخه خود را تکرار می‌کند. این نوع از حرکت تکراری شروع و توقف 'حرکت نموی'^۴ نامیده می‌شود، و کنترل مربوط به این نوع عملکرد 'کنترل حرکت نموی' خوانده می‌شود. شکل‌های ۲.۴ و ۲.۵ رابطه کلی بین پله‌ها و عملیات نموی را نشان می‌دهند. شکل ۲.۴ رابطه بین زاویه روتور و پالس‌های اعمال شده به توالی ساز منطقی را نشان می‌دهد، با این فرض که فرکانس پالس نسبتاً پایین است، و این حالتی است که افزایش حرکت

1- single - phase or one-phase excitation

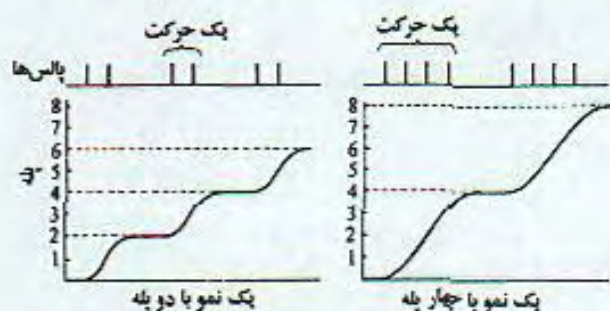
2- increment

3- guide holes

4- incremental motion



شکل ۲.۴. زاویه روتور و سری پالس‌ها در حالت فرکانس پایین.



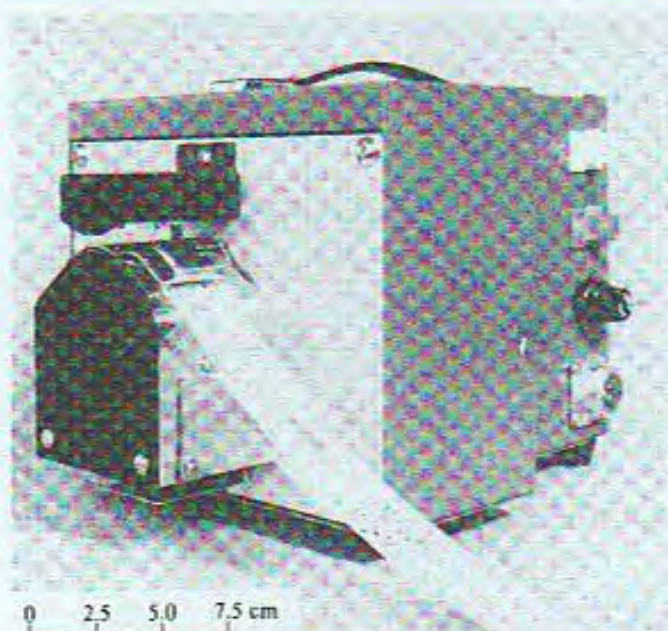
شکل ۲.۵. حرکت‌های نموی بدون نوسان با بیش از یک پالس.

به اندازه یک پله واحد انجام می‌شود. شکل ۲.۵ حالت‌هایی را نشان می‌دهد که در آنها یک پله با دو یا چهار پله انجام می‌شود. پاسخ پله واحد معمولاً همانطور که در شکل ۲.۴ نشان داده شده نوسانی است. هنگامیکه حرکتی بنا چندین پالس در فواصل مناسب انجام می‌گیرد، پاسخ می‌تواند غیر نوسانی باشد. همچنین امکان میرا کردن نوسان در روش تک پله‌ای از طریق تکیکی توسط مدار الکتریکی وجود دارد. این موارد در بخش ۵.۴ بررسی خواهند شد.

تعداد پله‌ها در هر پله اغلب بیش از چهار می‌باشد، بطور مثال در نوارخوان^۱ (شکل ۲.۶). هنگامیکه داده روی نوار به کنترلر ماشین کنترل عددی منتقل می‌شود، عملیات بلوک به بلوک انجام می‌گیرد. یک بلوک از داده‌ها متشکل از تعدادی خط یا بایت بطور مثال ۳۲، ۴۸، یا ۶۸ خط، می‌باشد، و این تعداد بر حسب سیستم یا مورد متفاوت است. قبل از اینکه ابزاری حرکت کند، یک بلوک از داده‌ها به حافظه حالت - جامد کنترلر منتقل می‌شود، و ابزار بنحویکه در اولین بلوک داده‌ها دستور داده شده حرکت می‌کند. بعد از اینکه آن دستورات کامل شدند، بلوک بعدی داده‌ها توسط هد خواندن^۲ نوار خوان خوانده می‌شود. اگر سیستم برای درایو به اندازه یک گام خط در

1- tape - reader

2- read head



شکل ۲۶. نوار خوان.

یک پله واحد طراحی شده باشد، و بلوک متشکل از ۳۲ خط با بایت باشد، هر حرکت از ۳۲ پله تشکیل شده است. اگر یک گام خط با چهار پله دراپو شود، یک نمو حرکت با ۱۲۸ پله برای انتقال ۳۲ بیت داده انجام می‌گیرد. اگر یک حرکت با نمو شامل پله‌های چندگانه باشد بایستی یک طبقه دیگر قبل از توالی ساز منطقی قرار داده شود. طبقه مربوط به این کار در این کتاب «کنترلر ورودی» نامیده می‌شود. کنترلر ورودی قطاری از تعدادی پالس مشخص در فواصل مناسب را پس از دریافت یک سیگنال ورودی ارسال می‌کند.

۲.۲ ویژگی‌های موتورهای پله‌ای از نقطه نظر کاربرد

نگاهی به ویژگی‌های کنترل حلقه - باز موتورهای پله‌ای می‌اندازیم، و چند اصطلاح فنی را تشریح می‌کنیم.

۲.۲.۱ زاویه پله کوچک و چگونگی دستیابی به آن

یک موتور پله‌ای با یک زاویه ثابت به ازای هر پالس می‌چرخد. همانطور که پیش تر توضیح داده شد، مقدار نامی آن 'زاویه پله' یا در بعضی کتابها^{۱/۱} طول پله نامیده می‌شود و برحسب درجه بیان می‌شود. کاهش زاویه پله دقت تعیین موقعیت^۱ را افزایش می‌دهد. یک ویژگی موتورهای پله‌ای این است که می‌توانند یک زاویه پله کوچک را تحقق بخشند. مهندسین به تعداد پله بر دور توجه دارند،

1- resolution of positioning

که در این کتاب با S نشان داده شده است و به روشی زاویه پله θ_r با S طبق رابطه زیر مرتبط است:

$$\theta_r = 360/S. \quad (2.1)$$

S به تعداد دندانه‌های روی روتور (N_r) و تعداد فازها m طبق روابط زیر مرتبط است، برای موتورهای رلوکتانس متغیر

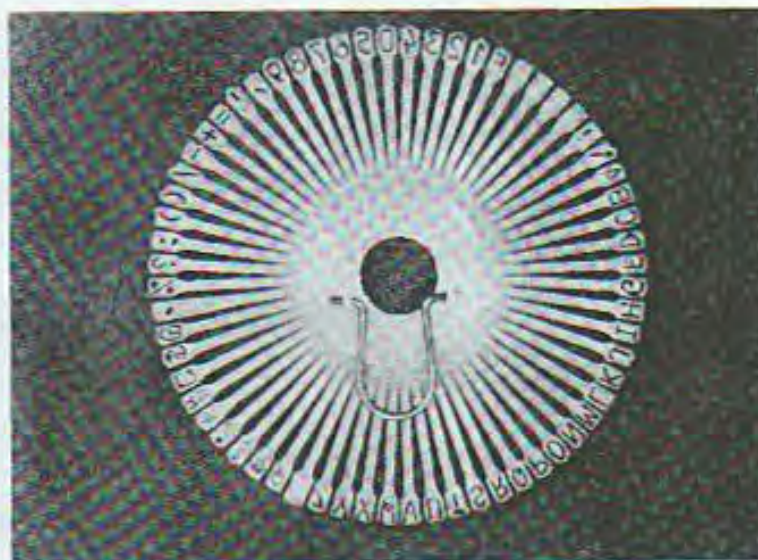
$$S = mN_r \quad (2.2a)$$

یا برای موتورهای آهنربای دائمی و موتورهای هیبرید که بعداً بررسی خواهند شد

$$S = 2mN_r \quad (2.2b)$$

تعداد معمول فازهای موتورهای رلوکتانس متغیر ۳، ۴ و ۵ می‌باشد، و معمول‌ترین موتور هیبرید دو فاز دارد ولی انواع سه و پنج فاز هم موجودند. بطور مثال تعداد زیاد دندانه‌های روتور، N_r ، ۵۰ یا ۱۰۰ می‌باشد.

موتورهای طراحی شده به منظور استفاده در درایو گردونه‌های کاراکتر (شکل ۲.۷) در یک چاپگر یا ماشین تایپ دارای ۹۶، ۱۲۸، یا ۱۳۲ پله بردور می‌باشند. یک موتور دو یا چهار فاز استاندارد ۲۰۰ پله دارد. برخی موتورهای دقیق برای دستیابی به یک دور با ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ پله طراحی شده‌اند. بهرحال، زوایای پله در برخی موتورهای ساده به بزرگی $7/5^\circ$ ، 15° هستند، و یک موتور مخصوص بکار رفته در ساعت مچی دارای یک زاویه پله 18° می‌باشد.



شکل ۲.۷. گردونه کاراکتر.

۲.۲.۲ گشتاور بازیابی و نگهدارنده^۱ بالا

موتورهای پله‌ای طوری طراحی شده‌اند که گشتاور استاتیک بزرگی دارای تولید می‌شود. این امر موتور را قادر به راه‌اندازی و توقف سریع و نشان دادن یک گشتاور بازیابی قوی به هنگام جابجایی از موقعیت سکون ناشی از گشتاور بار می‌کند. همانطور که بعداً^۲ بحث خواهد شد، فاصله هوایی بین دندانه‌های روتور و استاتور تا حد امکان برای این منظور کوچک طراحی شده است. ما اغلب از اصطلاحات گشتاور نگهدارنده، و گشتاور^۳ گیره^۴ در رابطه با گشتاور استاتیک استفاده می‌کنیم. تعریف آنها بصورت زیر است:

۱. گشتاور نگهدارنده. بعنوان گشتاور استاتیک ماکزیمم اعمال شده به محور یک موتور تحریک شده با جریان نامی در یک حالت مشخص بدون بروز چرخش پیوسته تعریف می‌شود.

۲. گشتاور گیره. بعنوان گشتاور استاتیک ماکزیمم اعمال شده به محور یک موتور تحریک نشده بدون بروز چرخش پیوسته تعریف می‌شود.

بطور کلی، هرچه گشتاور نگهدارنده بزرگتر باشد، خطای موقعیت ناشی از بار کوچکتر است (بخش ۲.۶.۱). در حالت ایده‌آل، گشتاور نگهدارنده از فاز یا فازهایی که تحریک شده‌اند مستقل است. هنگامیکه تغییرات قابل توجهی دیده می‌شود، گشتاور نگهدارنده یک موتور حداقل مقدار گشتاورهای استاتیک مینیمم اندازه‌گیری شده در تمامی حالات ممکن، بطور مثال در سه حالت یک موتور سه فاز (شکل ۶.۳)، می‌باشد.

گشتاور گیره تنها در موتور حاوی یک آهنربای دائمی ظاهر می‌شود.

۲.۲.۳ خطای تعیین موقعیت جمع ناپذیر

دقت در تعیین موقعیت عامل مهمی است که کیفیت یک موتور پله‌ای را مشخص می‌کند. موتورهای پله‌ای طوری طراحی شده‌اند که با یک زاویه پله از پیش تعیین شده در پاسخ به یک سیگنال پالس (یا فرمان پله) می‌چرخند و در یک موقعیت مشخص توقف می‌کنند. چون دقت در حالت بی‌باری به دقت فیزیکی روتور و استاتور بستگی دارد، خطای تعیین موقعیت جمع پذیر نیست.

با توجه به موقعیت‌هایی که در آنها روتور از حرکت باز می‌ایستد دو مفهوم را در نظر داریم:

۱. موقعیت سکون^۳ یا موقعیت تعادل^۴. بعنوان موقعیتی که در آن یک موتور تحریک شده در حالت بی‌باری از حرکت باز می‌ایستد تعریف شده است.

1- restoring and holding torque

2- detent

3- rest

4- equilibrium

۲. موقعیت گیره. بعنوان موقعیتی که در آن یک موتور دارای آهنربای دائمی در روتور خود بدون تحریک در حالت بی‌باری از حرکت باز می‌ایستد تعریف شده است.

موقعیت‌های سکون و گیره همواره یکسان نیستند. در برخی کاربردها بدون تحریک سیم پیچی‌ها بمنظور صرفه جویی در توان از موقعیت‌های گیره در تعیین موقعیت استفاده می‌شود.

ما دو مفهوم از خطای تعیین موقعیت به صورت زیر داریم:

۱. خطای موقعیت پله. بعنوان بزرگترین خطای موقعیت زاویه‌ای استاتیک منفی یا مثبت (در مقایسه با زاویه پله نامی) که هنگام حرکت روتور از یک موقعیت سکون به موقعیت سکون دیگر اتفاق می‌افتد، تعریف شده است.

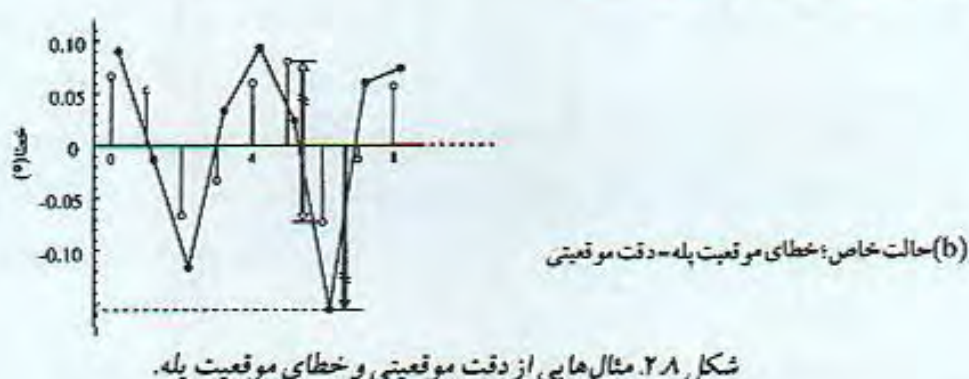
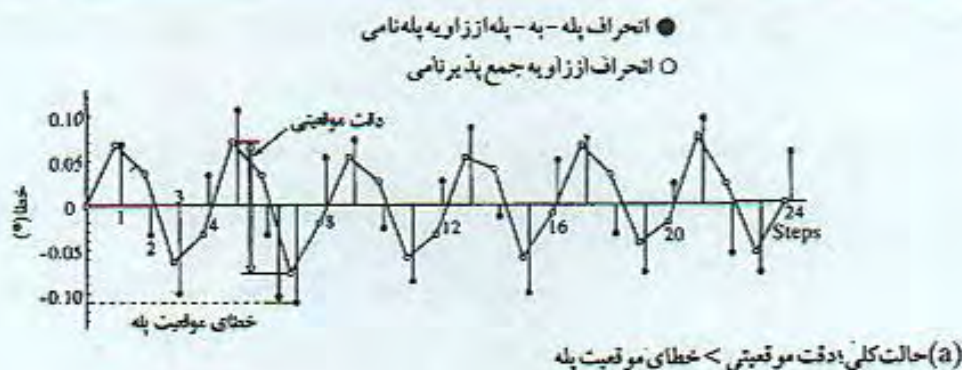
۲. دقت موقعیتی^۱. بعنوان بزرگترین خطای موقعیت زاویه‌ای در موقعیت سکون با توجه به زاویه پله جمع پذیر نامی تعریف شده است، که می‌تواند در یک دور کامل روتور به‌هنگام حرکت از یک موقعیت سکون مرجع واقع شود.

رابطه بین این دو نوع خطای تعیین موقعیت را با مدلی نمونه از یک موتور ۲۴ پله دوفاز بررسی می‌کنیم. موقعیت‌های تعادل ابتدا با موقعیت شروع بعنوان مرجع اندازه‌گیری می‌شوند، و همانطور که در شکل ۲۸(a) نشان داده شده است، انحراف از زوایای پله جمع پذیر نامی، که با ۰ رسم شده‌اند، توسط خطوط مستقیم متصل شده‌اند تا گرافی مقطع ترسیم شود. پراکندگی دقت موقعیتی به نام اختلاف نوک تا نوک^۲ خوانده می‌شود، که در این نمونه ۰/۱۵° می‌باشد. دقت موقعیتی را هم می‌توان در این حالت ۰/۷۵° ± تعریف کرد.

اختلاف‌های پله به پله از زاویه پله نامی با ۰ رسم شده‌اند. اینها اختلافات بین مقادیر دو همسایگی نقاط می‌باشند. نقطه نوک مثبت یا منفی خطای موقعیت پله می‌باشد، و در این مورد همانطور که در شکل نشان داده شده ۰/۱۱° می‌باشد.

در این مورد هم پراکندگی دقت موقعیتی معمولاً بزرگتر از خطای موقعیت پله می‌باشد. به‌رحال، همانطور که در شکل ۲۸(b) نشان داده شده است، هنگامی مشابه هم می‌باشند که انحراف ماکزیمم مثبت و انحراف ماکزیمم منفی در موقعیت‌های مجاور واقع می‌شوند.

همانطور که در مثال دیده شد، خطاهای موقعیتی در هر چهار پله دارای مقادیری نزدیک به هم بودند. بطور نظری، اگر روتور با توجه به مرکز کاملاً متقارن باشد و گام دندانه هیچ تغییراتی نداشته باشد، آنگاه الگوی خطای موقعیتی در هر چهار پله تکرار خواهد شد.



۲.۲.۴ رفتار دینامیک بسیار خوب ناشی از نسبت های گشتاور به اینرسی بالا

مطلوبست که موتورهای پله‌ای تا حد ممکن در پاسخ به یک پالس ورودی یا قطار پالس سریع حرکت کنند. برای یک موتور پله‌ای نه تنها راه اندازی سریع بلکه توقف سریع نیز ضروری می باشد. اگر در قطار پالس به هنگام کار موتور وقفه‌ای ایجاد شود، موتور بایستی قادر به توقف در موقعیتی که توسط آخرین پالس مشخص شده باشد. این مشخصه های دینامیک بسیار خوب ناشی از نسبت گشتاور به اینرسی بالا در یک موتور پله‌ای در مقایسه با موتورهای AC معمول می باشند.

سرعت چرخش یک موتور پله‌ای بر حسب تعداد پله‌ها در هر ثانیه داده می شود، و اصطلاح نرخ پله^۱، اغلب برای اشاره به سرعت استفاده می شود. به علت اینکه که در اکثر موارد تعداد پالس های اعمال شده به توالی ساز منطقی با تعداد پله‌ها برابر است، سرعت ممکن است بر حسب فرکانس پالس بیان شود. در این کتاب، هرتز (HZ) برای واحد نرخ پله بکار برده می شود، در حالیکه P.P.S. (یا پالس در ثانیه) و پله در ثانیه بطور گسترده بکار برده می شوند.

نرخ پله سرعت مطلق را مشخص نمی کند. سرعت گردش موتورهای AC یا DC مرسوم معمولاً بر حسب دور بر دقیقه (یا r.p.m.) بیان می شود. استفاده از ۶۰s برای اندازه گیری سرعت موتوری

که لازم است افزایش و کاهش سرعت سریع داشته باشد غیر معقول است، اما اینجا سرعت بر حسب r.p.m.، نرخ پله، و پله بر دور داده خواهد شد:

$$n = 60f/S \quad (۲.۳)$$

که n = سرعت چرخش (r.p.m.)

f = نرخ پله (Hz)

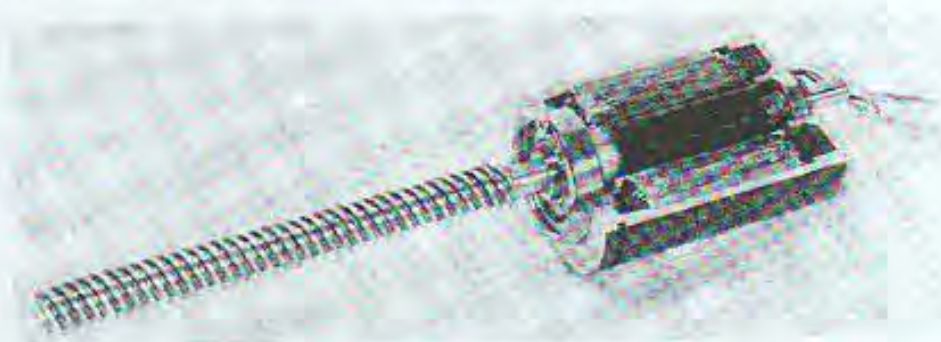
S = پله بر دور

۲.۳ طبقه‌بندی موتورهای پله‌ای

انواع مختلفی از موتورهای الکتریکی بکار برده می‌شوند، و موتور پله‌ای را می‌توان بر اساس ساختار ماشین و اساس عملکرد به چندین نوع طبقه‌بندی کرد.

۲.۳.۱ موتور VR

موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر^۱، یا به اختصار موتور VR، ممکن است بعنوان ابتدایی‌ترین نوع موتور پله‌ای مطرح شود. ساختار داخلی یک موتور VR در شکل ۲.۹ نشان داده شده است. دیاگرام مقطع عرضی یک موتور ساده در این طبقه‌بندی برای راحتی تشریح اصول اساسی موتور در شکل ۲.۱۰ نشان داده شده است. این موتور سه فاز دارای شش دندانه استاتور است. هر دو دندانه متقابل استاتور، که از یکدیگر ۱۸۰° فاصله دارند، دارای یک فاز می‌باشند؛ به این معنی که، کلاف‌های هر دندانه متقابل بصورت سری یا موازی متصل شده‌اند. (در شکل بصورت سری متصل شده‌اند). روتور دارای چهار دندانه است. هسته روتور و استاتور معمولاً از فولاد سیلکون مستورق^۲ ساخته شده‌اند، اما از روتورهای فولاد سیلکون توپر^۳ بسیار زیاد استفاده می‌شود. هر دو مواد استاتور و

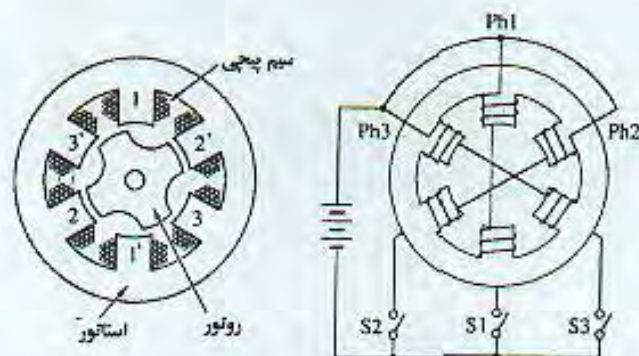


شکل ۲.۹. مقطع عرضی یک موتور VR تک پشته‌ای. (محصول MINEBEA Co. Ltd.)

1- variable - reluctance

2- laminated silicon steel

3- solid



شکل ۲.۱۰. مقطع عرضی مدل موتور پله‌ای VR سه فاز و ترتیب سیم پیچی.

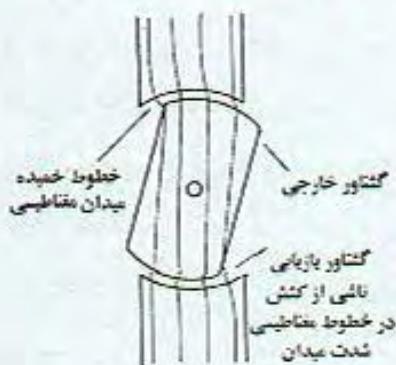
روتور بایستی قابلیت نفوذپذیری بالایی داشته باشند و قادر به عبور شار مغناطیسی زیادی حتی در صورت اعمال نیروی محرکه مغناطیسی کم باشند.

باید ببینیم که آیا دو دندانه استاتور در یک فاز باید دارای پلاریته مغناطیسی یکسان باشند یا پلاریته‌های مخالف هم. در حالیکه این موضوع بر مسائل دیگر اثر می‌گذارد، مادر این مثال فرض می‌کنیم که دو دندانه پلاریته‌های مخالف دارند. از اینرو، در شکل ۲.۱۰، دندانه‌های ۱، ۲، ۳ و قطب شمالی و دندانه‌های ۱'، ۲' و ۳' قطب جنوبی را به هنگام تحریک تشکیل می‌دهند.

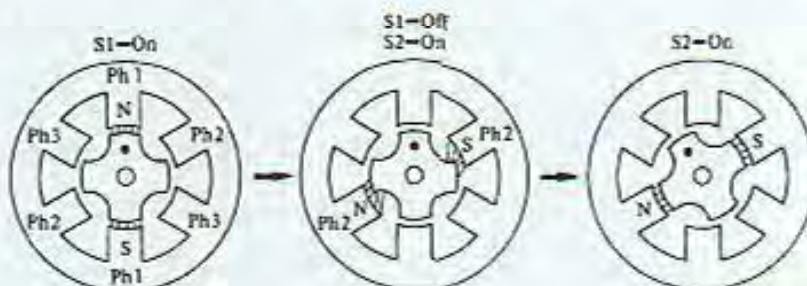
جریان هر فاز در مد ON/OFF توسط کلیدهای متناظر آن کنترل می‌شود. اگر جریانی به کلافهای Ph1 اعمال شود، یا بعبارت دیگر اگر Ph1 تحریک شود، شار مغناطیسی همانطور که در شکل ۲.۱۱ نشان داده شده می‌باشد. روتور طوری استقرار خواهد یافت که دندانه استاتور ۱ و ۱' و دو دندانه از روتور هم‌ردیف شوند. از اینرو هنگامیکه دندانه‌های روتور و دندانه‌های استاتور هم‌ردیف هستند، رلوکتانس مغناطیسی به حداقل می‌رسد، و این حالت یک موقعیت تعادل یا سکون را ایجاد می‌کند. اگر روتور بخاطر برخی گشتاورهای خارجی اعمال شده به محور روتور تمایل به خارج شدن از حالت تعادل داشته باشد، یک گشتاور بازپایی همانطور که در شکل ۲.۱۲ نشان داده شده تولید خواهد شد. در این شکل گشتاور خارجی برای چرخاندن روتور در جهت ساعتگرد (CW) اعمال شده است و روتور در جهت مشابه جابجا خواهد شد. این امر منجر به انحنا دار شدن خطوط شار مغناطیسی در سر دندانه‌های روتور و استاتور خواهد شد. در پدیده موسوم به استرس ماکسول، خطوط مغناطیسی شدت میدان قدرت کشش زیادی دارند، یا بعبارت دیگر، تا حد امکان تمایل به کوتاه و مستقیم شدن (مانند فنرهای الاستیک) دارند. در شکل ۲.۱۲ این اثر در سر دندانه‌ها مشاهده می‌شود، که باعث ایجاد گشتاور در جهت عکس ساعتگرد برای بازگرداندن روتور به هم‌ردیفی با دندانه‌های استاتور می‌شود.



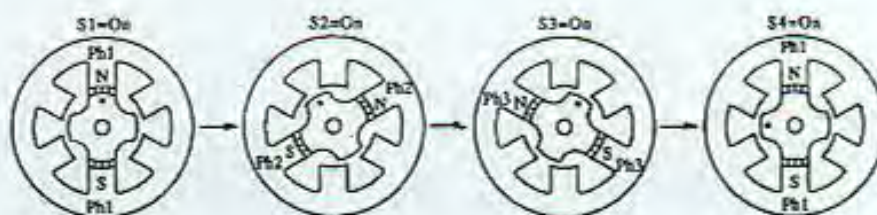
شکل ۲.۱۱. موقعیت تعادل با فاز ۱ تحریک شده.



شکل ۲.۱۲. خطوط دارای انحنای میدان مغناطیسی گشتاور ایجاد می‌کنند.



شکل ۲.۱۳. چگونه یک حرکت پله‌ای به هنگام سوئیچینگ تحریک از Ph1 به Ph2 انجام می‌گیرد.



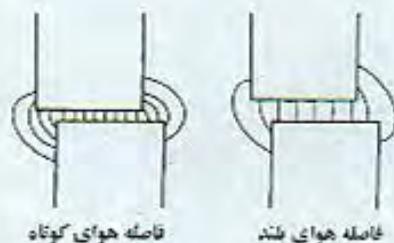
شکل ۲.۱۴. حرکات پله‌ای هنگامیکه ترتیب سوئیچینگ در یک موتور VR سه فاز انجام

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، هنگامیکه دندانه‌های روتور و استاتور در فاز تحریک شده هم‌ردیف نیستند، رلوکتانس مغناطیسی بزرگ است. موتور VR بنحوی کار می‌کند که رلوکتانس مغناطیسی به حداقل می‌رسد. حال می‌خواهیم ببینیم هنگامیکه Ph1 خاموش و Ph2 روشن می‌شود چه اتفاقی می‌افتد. رلوکتانس دیده شده موتور از منبع تغذیه DC بطور ناگهانی پس از انجام سوئیچینگ افزایش خواهد یافت. همانطور که در شکل ۲.۱۳ به روشنی پیداست روتور مشخصاً به موقعیت قبلی خود باز خواهد گشت. این مورد در شکل ۲.۱۴ نشان داده شده است.

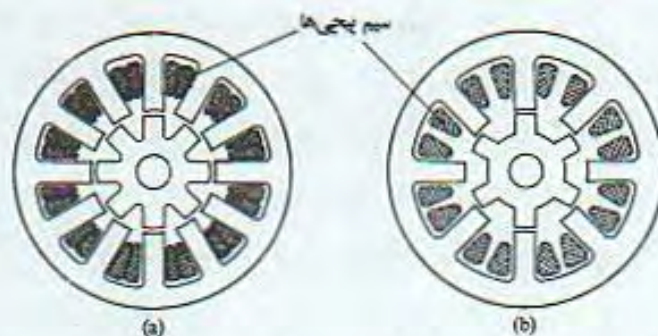
حال چندین ویژگی ساختاری و اساسی موتورهای VR را بیان خواهیم کرد.

(a) فاصله هوایی تا حد امکان باید کوچک باشد. فاصله هوایی بین دندانه‌های روتور و دندانه‌های استاتور در یک موتور پله‌ای باید تا حد امکان کوچک باشد تا گشتاور بزرگی از یک حجم کوچک روتور تولید کند و به دقت بالایی در تعیین موقعیت دست یابد. مقایسه بین فاصله‌های بلند و کوتاه در شکل ۲.۱۵ آورده شده است. با نیروی محرکه مغناطیسی یکسان یک فاصله کوچک شار مغناطیسی بیشتری خواهد داد که گشتاور بزرگتری تولید می‌کند. روشن است که جابجایی از موقعیت تعادل به هنگام اعمال یک گشتاور خارجی به روتور با کوچک بودن فاصله کمتر است. در موتورهای مدرن اندازه فاصله هوایی از ۳۰ تا ۱۰۰ μm است.

(b) دندانه‌ها در یک قطب برای زاویه پله کوچکتر یکی از ویژگی‌های منحصر بفرد موتور پله‌ای امکان تحقق یک زاویه پله کوچک می‌باشد. زاویه پله ۳۰° که توسط ساختار شکل ۲.۱۰ محقق شده است زاویه کوچکی نیست. شکل (a) ۲.۱۶ یک موتور سه فاز با ۱۲ دندانه استاتور و ۸ دندانه روتور را نشان می‌دهد. زاویه پله در هر ساختار ۱۵° می‌باشد. شکل ۲.۱۷ یک موتور ۷/۵° چهار فاز را نشان می‌دهد که ۱۶ دندانه استاتور و ۱۲ دندانه روتور دارد. همانطور که در این تصویر دیده می‌شود، روتور یک موتور پله‌ای برای به حداقل رساندن ممتوم اینرسی آن بسیار نازک است.



شکل ۲.۱۵. مقایسه خطوط شار در یک فاصله بلند و یک فاصله کوتاه.



شکل ۲.۱۶. نمای مقطع عرضی موتورهای VR با زاویه پله 10° . (a) موتور سه فاز: تعداد دندانه‌های استاتور = ۱۲؛ تعداد دندانه‌های روتور = ۸. (b) موتور چهار فاز: تعداد دندانه‌های استاتور = ۸؛ تعداد دندانه‌های روتور = ۶.

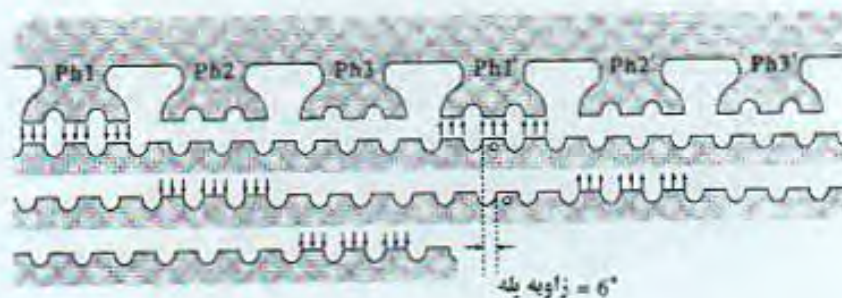


شکل ۲.۱۷. استاتور و روتور یک موتور VR چهار فاز با زاویه پله 7.5° .
(Sanyo Denki Co.Ltd. ساخت)

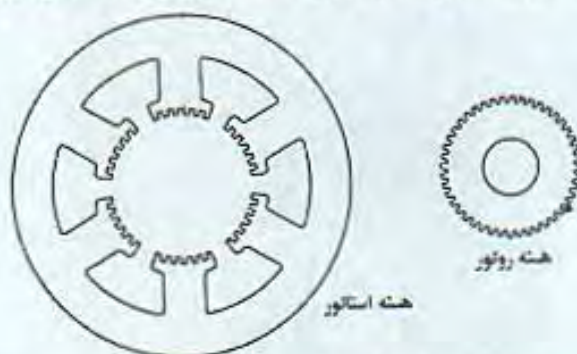


شکل ۲.۱۸. دید مقطع عرضی یک موتور VR سه فاز دارای دو دندانه در هر قطب: تعداد دندانه‌های روتور 20° و زاویه پله 6° می‌باشد.

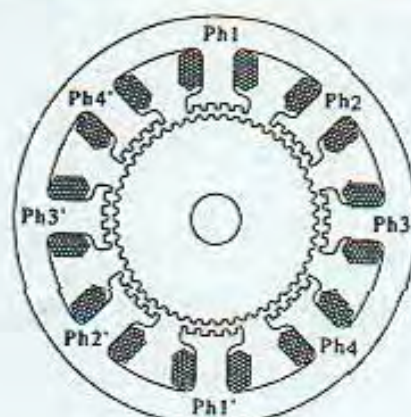
همانطور که در بخش ۲.۲.۱ بیان شد، بمنظور کاهش زاویه پله θ_p تعداد دندانه‌های روتور N_r بایستی افزایش یابد. ممکن است کسی از توضیح بالا اینطور فرض کند که تعداد دندانه‌های استاتور باید همچون تعداد دندانه‌های روتور افزایش پیدا کند، اما، تعداد دندانه‌های استاتور در رابطه‌های (۲.۲a) یا (۲.۲b) مشخص نشده‌اند. در واقع دیاگرام مقطع عرضی موتور پله‌ای VR با زاویه پله کوچک همانند شکل ۲.۱۸ می‌باشد. قسمت‌های برجسته بزرگ که سیم پیچی‌های اطراف آنها قرار دارند بطور قراردادی 'قطب' نامیده می‌شوند. باید گفته شود که، آنها از 'قطب مغناطیسی' در یک موتور جریان متناوب متفاوت هستند. در یک موتور پله‌ای، یک قطب دارای دو دندانه استاتور یا بیشتر می‌باشد و تمامی دندانه‌های یک قطب در هر لحظه پلاریته مغناطیسی یکسانی دارند. چون تعداد دندانه‌های روتور، N_r ، $2p$ می‌باشد و ضریب، m ، تعداد فازها (= در این مورد ۳) می‌باشد، موتور یک دور را با $3 \times 2p = 6p$ پله کامل می‌کند. زاویه پله در این مدل برابر $6^\circ = (360/60)$ می‌باشد و چگونگی انجام یک پله در مدل بریده و غیر مدور شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. این مثال نشان می‌دهد که تعداد دندانه‌های استاتور عامل مستقیمی در تعیین زاویه پله نمی‌باشد.



شکل ۲.۱۹. مدل بریده و غیر مدور موتور VR سه فاز مربوط به شکل قبل.



شکل ۲.۲۰. نمای مقطع عرضی یک موتور VR سه فاز؛ تعداد دندانه‌های روتور ۲۴ و تعداد پله‌ها ۱۳۲ می‌باشد. (مطابق مرجع [2])



شکل ۲.۲۱. دید مقطع عرضی یک موتور VR چهار فاز: تعداد دندانه‌های روتور ۵۰، پله بردور ۲۰۰، و زاویه پله $1/8^\circ$ می‌باشد.

مثالی که در آن تعداد دندانه‌های روتور در یک موتور سه فاز به ۴۴ افزایش داده شده در شکل ۲.۲۰ آورده شده است. تعداد پله بردور ۱۳۲ می‌باشد. مثالی از یک موتور چهار فاز با ۵۰ دندانه روتور در شکل ۲.۲۱ نشان داده شده است. زاویه پله $1/8^\circ$ است و تعداد پله بر دور در این مدل ۲۰۰ است.

(c) نوع چند پشته‌ای^۱ و نوع تک پشته‌ای^۲. موتورهای پله‌ای که در بالا توصیف شدند موتورهای نوع تک پشته‌ای می‌باشند. یک ویژگی برجسته این نوع از موتور این است که سه یا چهار فاز در یک پشته واحد قرار داده شده‌اند، یعنی در یک صفحه. نوع دیگر موتورهای پله‌ای VR نوع چند پشته‌ای می‌باشد. این نوع همچنین بعنوان نوع کاسکاد^۳ شناخته می‌شود. یک نمای مقطعی از یک موتور سه پشته‌ای در شکل ۲.۲۲ نشان داده شده است. در این مدل هر پشته متناظر با یک فاز است، و استاتور و روتور دارای گام دندانه یکسانی می‌باشند. حال فرض می‌کنیم که فاز (پشته) سوم تحریک شده است و دندانه‌های روتور و استاتور در این فاز هم‌ردیف هستند. در فازها یا پشته‌های دیگر در این لحظه، دندانه‌های هر دو عضو به اندازه $1/3$ گام دندانه ناهم‌ردیف شده‌اند، که در شکل نشان داده شده است. جهت ناهم‌ردیفی‌ها در پشته اول و دوم مخالف هم می‌باشند. اگر تحریک از فاز سوم به فاز اول سوییچ شود، روتور از دید چپ یک پله در جهت CW^۴ حرکت خواهد کرد. اما اگر تحریک به فاز دوم سوییچ شود به اندازه یک زاویه پله در جهت CCW^۵

1- multi-stack

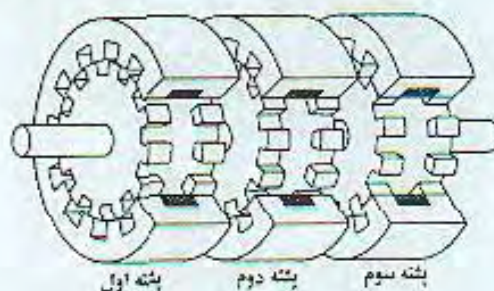
2- single-stack

3- cascade

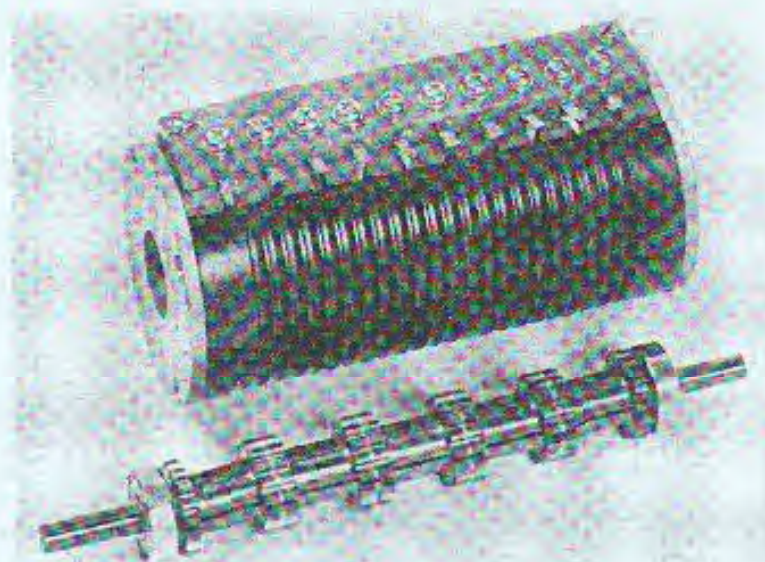
4- clockwise (ساعتگرد)

5- counter-clockwise (عکس ساعتگرد)

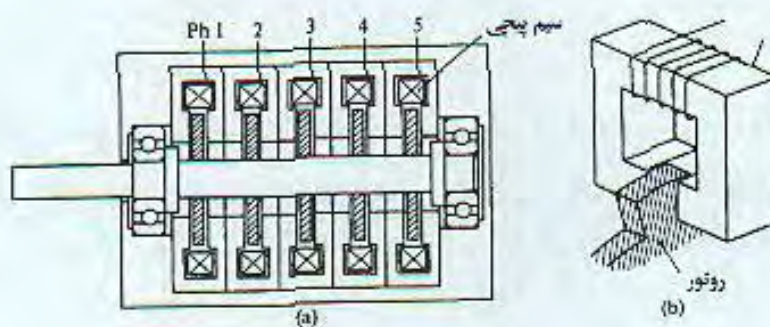
حرکت خواهد کرد. شکل ۲.۲۳ روتور و استاتور یک موتور پنج پشته‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲.۲۲. ساختار یک موتور VR چند پشته‌ای.



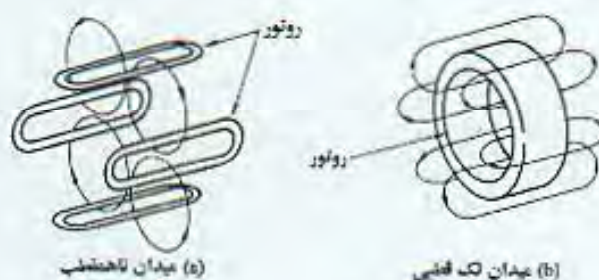
شکل ۲.۲۳. استاتور و روتور یک موتور VR پنج پشته‌ای. (محصول MINEBEA Co.Ltd.)



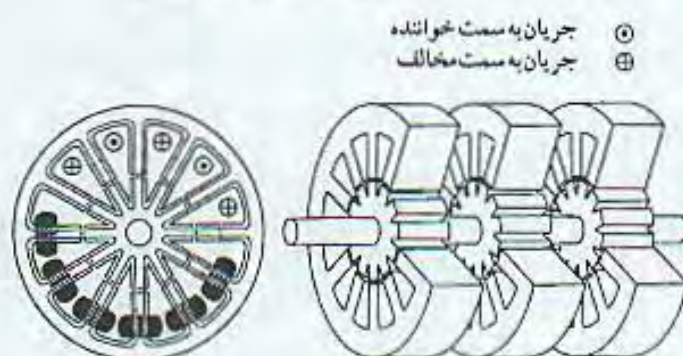
شکل ۲.۲۴. دیاگرام محوری یک موتور VR پنج پشته‌ای از نوع ساندویچ.

شکل (a) ۲.۲۴ دیاگرام محوری یک موتور VR پنج فاز منحصر بفرد از نوع چند پشته‌ای می‌باشد که توسط شرکت Fanuc Ltd برای استفاده در ماشینهای کنترل عددی ساخته می‌شود. شکل (b) ۲.۲۴ اساس این ماشین را نشان می‌دهد؛ دندانه‌های روتور توسط دندانه‌های استاتور با گام دندانه برابر احاطه شده‌اند. این ساختار به‌خاطر تولید گشتاور بزرگ از واحد حجم روتور و بهبود بسیار زیاد بازدهی ماشین شناخته شده است.

چون در موتور چند پشته‌ای نشان داده شده کلاف‌های سیم‌لوله‌ای بکار رفته‌اند، توزیع میدان مغناطیسی از مثالهایی که قبلاً در این کتاب ارائه شدند متفاوت می‌باشد. مقایسه‌ای در شکل ۲.۲۵ انجام شده است. در یک موتور تک پشته‌ای، قطبهای مغناطیسی فرد (N, S, N, S, \dots) در یک صفحه عمود بر محور موتور ظاهر خواهند شد. این نوع از میدان مغناطیسی میدان ناهم‌قطب^۱ نامیده می‌شود. از طرفی تنها یک قطب مغناطیسی (S یا N) در صفحه عمود بر محور موتور چند پشته‌ای ظاهر می‌شود. این نوع توزیع تک قطبی است. در برخی انواع موتور VR چند پشته‌ای توزیع میدان ناهم‌قطب است. مثالی در شکل ۲.۲۶ نشان داده شده است.



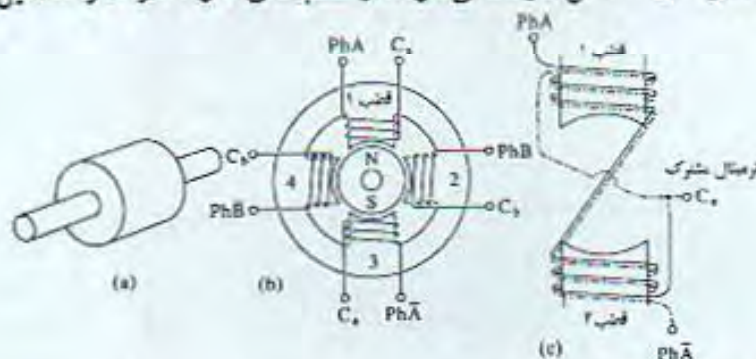
شکل ۲.۲۵. میدان مغناطیسی ناهم‌قطب و تک قطبی.



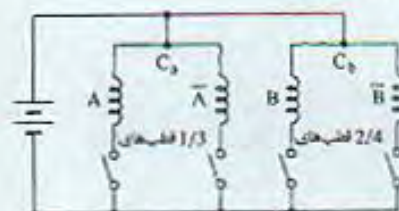
شکل ۲.۲۶. یک موتور VR چند پشته‌ای از نوع ناهم‌قطب.

۲.۳.۲ موتور پله‌ای PM ابتدایی

یک موتور پله‌ای با بهره‌گیری از آهنربای دائمی در روتور بنام موتور آهنربای دائمی^۱ (PM) خوانده می‌شود. یک موتور PM ابتدایی در شکل ۲.۲۷ نشان داده شده است، که از یک آهنربای دائمی استوانه‌ای بعنوان روتور بهره می‌گیرد، و دارای چهار دندانه یا قطب در استاتور خود می‌باشد، همانطور که بترتیب در (a) - (b) نشان داده شده است. یک آرایش کلاف^۲ نمادین در (b) نشان داده شده است، اما (c) آرایش واقعی را نشان می‌دهد، که طرح دو رشته‌ای^۳، نامیده می‌شود. دو سیم روییم بنحوی پیچیده شده‌اند که یکی از سیم‌ها در قطب‌های ۱ و ۳ می‌باشد، و این دو سیم برای حفظ استقلال در ترمینال‌ها از هم جدا شده‌اند. حالت مشابهی در قطب‌های ۲ و ۴ صادق است. ترمینال‌های با علامت C_2 و C_4 که نشانه^۴ مشترک^۴ می‌باشند باید به ترمینال مثبت منبع تغذیه همانطور که در مدار سونیچینگ ۲.۲۸ نشان داده شده متصل شوند. هنگامیکه سیم A که با خط پیوسته در (c) نشان داده شده تحریک شود، قطب ۱ یک قطب شمال و قطب ۳ یک قطب جنوب تولید می‌کند. اگر سیم \bar{A} (که با خط شکسته در (c) نشان داده شده است) تحریک شود پلاریته عکس می‌شود. این آرایش قطب - سیم یک آرایش دو فاز می‌باشد، با این حال اگر یک طرح چهارفاز در نظر گرفته شود، قطب‌های ۱ و ۳ شامل فاز A می‌شوند، و قطب‌های ۲ و ۴ فاز B را تشکیل می‌دهند.



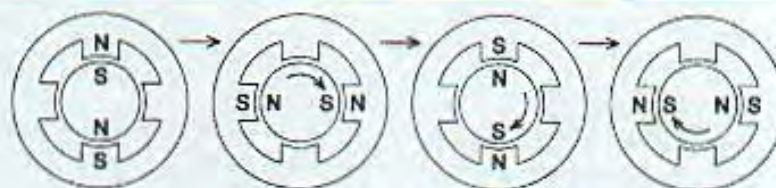
شکل ۲.۲۷. موتور PM ابتدایی. (a) روتور سیلندری؛ (b) هسته استاتور و سیم پیچی نمادین؛ (c) سیم پیچی دو رشته‌ای واقعی.



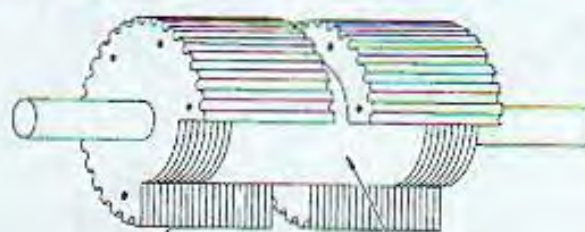
شکل ۲.۲۸. مدار اساسی درایو برای یک موتور دو فاز.

- 1- permanent magnet
- 3- bifilar

- 2- coil arrangement
- 4- common



شکل ۲.۲۹. پله‌ها در یک موتور PM



هسته متورق از جنس
فولاد سیلیکون

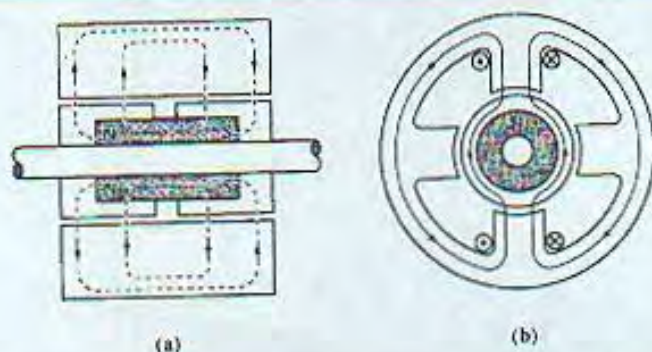
آهنربای دائمی

شکل ۲.۳۰. ساختار روتور یک موتور هیبرید.

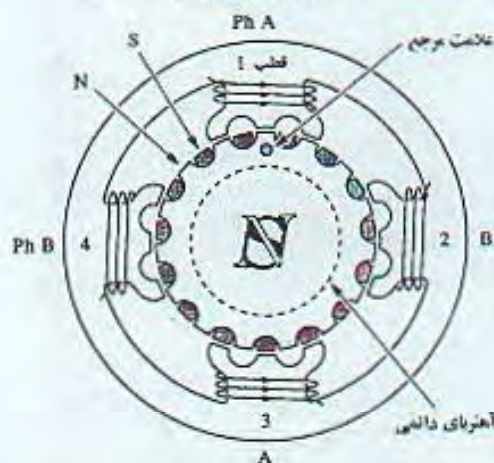
حال، اگر سیم پیچی‌ها به ترتیب $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B} \dots$ تحریک شوند روتور در جهت ساعتگرد و همانند شکل ۲.۲۹ درایو خواهد شد. زاویه پله در این ماشین بوضوح 90° می‌باشد. اگر تعداد دندانه‌های استاتور و قطب‌های مغناطیسی روی روتور دوبرابر شوند، یک موتور دو فاز با زاویه پله 45° محقق می‌شود. یک موتور PM از خود گشتاور بزرگی نسبت به اندازه کوچک موتور در مقایسه با یک موتور VR هم اندازه نشان می‌دهد.

۲.۳.۳ موتور پله‌ای هیبرید^۱

نوع دیگر موتور پله‌ای که دارای آهنربای دائمی در روتور خود می‌باشد موتور هیبرید است. اصطلاح 'هیبرید' از این موضوع که موتور با ترکیبی از اساس موتورهای آهنربای دائمی و رلوکتانس متغیر کار می‌کند گرفته شده است. ساختار هسته استاتور مشابه، یا خیلی نزدیک، به استاتور موتور VR نشان داده شده در شکل ۲.۲۱ می‌باشد. ویژگی مهم موتور هیبرید ساختار روتور آن می‌باشد. یک آهنربای استوانه‌ای یا دیسک مانند در هسته‌های روتور مطابق با شکل ۲.۳۰ قرار دارد، در



شکل ۲.۳۱. مسیرهای مغناطیسی در یک موتور هیبرید. (a) شار ناشی از آهنربای روتور که میدان تک قطبی تولید می‌کند، (b) شار توزیع شده ناممقرب ناشی از جریانهای استاتور.



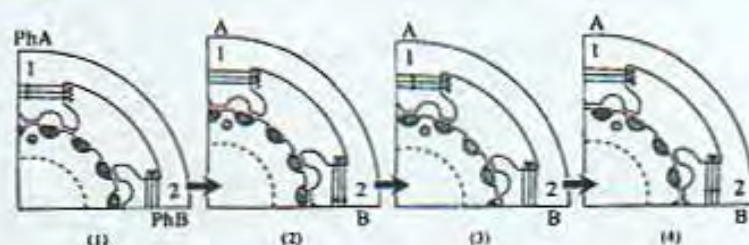
شکل ۲.۳۲. مقطع عرضی یک موتور هیبرید دوفاز.

جهت طولی مغناطیده می‌شود تا میدانی تک قطبی همانند شکل (a) ۲.۳۱ تولید نماید. هر یک از قطبهای آهنربا با سرپوش‌های دندانه‌دار متحدالشکل از جنس فولاد نرم پوشیده شده است. دندانه‌های روی دو سرپوش نسبت به یکدیگر به اندازه گام نیم دندانه نا هم‌ردیف هستند. سرپوش‌های دندانه‌دار معمولاً از فولاد سیلکون متورق ساخته می‌شود. میدان مغناطیسی ساخته شده توسط کلاف‌های استاتور مطابق با شکل (b) ۲.۳۱ یک میدان ناممقرب می‌باشد.

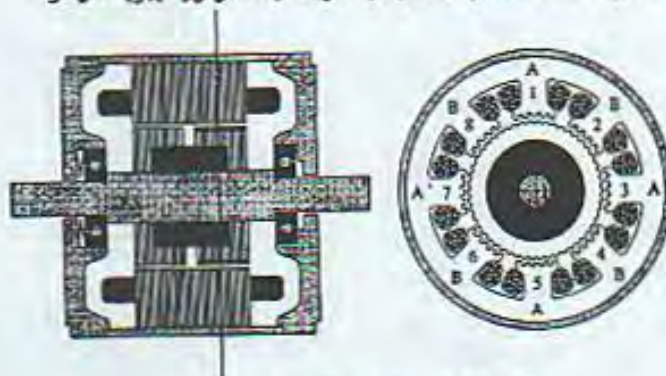
(۱) موتورهای دوفاز و چهار فاز. از آنجاکه پرکاربردترین موتور هیبرید از نوع دوفاز می‌باشد، نگاهی به اساس این ماشین با استفاده از شکل ۲.۳۲ می‌اندازیم. این مدل دارای چهار قطب است. کلاف قطب ۱ و قطب ۳ بصورت سری متصل شده‌اند و شامل فاز A می‌شوند، و در حال حاضر تحریک شده‌اند. قطب‌های ۲ و ۴ مربوط به فاز B می‌شوند. هنگامیکه مجموعه روتور از نقطه‌ای روی محور دیده شود، در پیرامون تناوب قطب‌های شمالی و جنوبی بنظر می‌آید، اگر چه در واقعیت در این مورد، قطب‌های شمالی نزدیک‌تر و قطب‌های جنوبی دورتر می‌باشند. شکل ۲.۳۳

فرایند گردش روتور را به هنگام سوئیچینگ جریانهای سیم پیچی به ترتیب موسوم به یکفاز در تحریک^۱ نشان می‌دهد. در حالت (۱)، قطب‌های فاز A تحریک شده‌اند، و دندانه‌های قطب ۱ برخی از قطب‌های شمالی روتور را جذب می‌کنند، در حالیکه دندانه‌های قطب ۳ با قطب‌های جنوبی روتور هم‌ردیف می‌شوند. سپس جریان مطابق حالت (۲) به فاز B سوئیچ می‌شود. روتور به اندازه یک ربع گام دندانه حرکت می‌کند بطوریکه هم‌ردیفی در قطب‌های ۲ و ۴ اتفاق می‌افتد. سپس، جریان دوباره به فاز A سوئیچ می‌شود اما در پلاریته‌ای مخالف با حالت قبل. روتور حرکت دیگری به اندازه ربع دندانه برای رسیدن به حالت (۳) انجام می‌دهد؛ هم‌ردیفی دندانه در پلاریته مغناطیسی مخالف با حالت (۱) اتفاق می‌افتد. هنگامیکه جریان در پلاریته مخالف به فاز B سوئیچ شود، در نتیجه حرکت دیگری به اندازه ربع دندانه حالت (۴) انجام می‌شود.

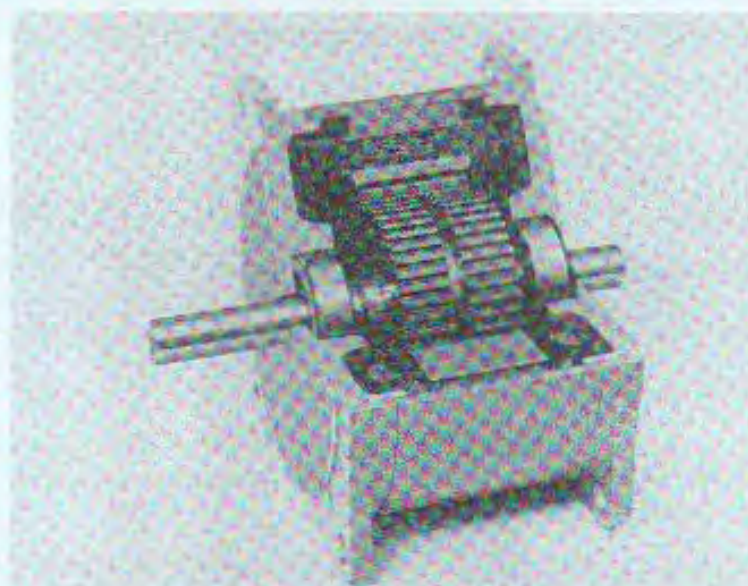
ساختار موتور دوفاز نشان داده شده در شکل ۲.۳۲ همواره مطلوب نیست زیرا نیروی بوجود آمده نسبت به محور متقارن نمی‌باشد. پرکاربردترین موتور دوفاز، با ۲۰۰ پله‌بردور، مطابق شکل ۲.۳۴ دارای هشت قطب در استاتور خود می‌باشد؛ قطب‌های فرد متعلق به فاز A هستند و قطب‌های زوج شامل فاز B می‌شوند. در این ساختار در یک موقعیتی متقارن روی صفحه روتور گشتاور ایجاد می‌شود. دید مقطعی از این نوع موتور در شکل ۲.۳۵ دیده می‌شود.



شکل ۲.۳۳. عملکرد یکفاز در تحریک یک موتور هیبرید دوفاز.



شکل ۲.۳۴. ساختار یک موتور هیبرید.



شکل ۲.۳۵. دید مقطعی از یک موتور هیبرید.

این نوع از موتور در ابتدا توسط Feiertag و Danahoo^[3] اختراع شد و برای استفاده بعنوان یک موتور سنکرون در کاربرهای با سرعت کم طراحی شده بود، و یک موتور سلفی سنکرون نامیده می‌شد. در واقع برخی از موتورهای هیبرید امروزی را می‌توان بعنوان موتورهای سنکرون تکفاز با راه‌انداز خازنی بکار گرفت. یک موتور $1/8^{\circ}$ در ۶۰ r.p.m. (یا ۷۲) با یک منبع تغذیه ۵۰ Hz (یا ۶۰) کار می‌کند.

یک موتور چهار فاز را می‌توان با استفاده از این هسته طراحی کرد، اگر که هر جفت از دو قطب مخالف شامل یکفاز باشند. بهرحال، یک طرح چهار فاز بخاطر مدار الکترونیکی پرهزینه آن مناسب نیست.

(۲) موتور هیبرید سه فاز و پنج فاز. نوع سه فاز یا پنج فاز از طرح هیبرید هم بکار می‌رود. بهرحال، موتور پله‌ای هیبرید سه فاز مانند موتور سه فاز AC یا بدون جاروبک رایج نیست، از طرفی، تولید موتورهای پله‌ای هیبرید پنج فاز در حال رشد است، در حالیکه رشد موتورهای AC یا بدون جاروبک اندک است. یک ساختار مقطعی نمونه از موتور سه فاز و مسیر شارهای مغناطیسی هنگامیکه تنها یک فاز تحریک شده است در شکل ۲.۳۶ نشان داده شده‌اند. شکل ۲.۳۷ تصویر مشابهی از یک موتور هیبرید پنج فاز شامل ۳۶ دندانه روی روتور را نشان می‌دهد. در این مثالها قطب‌ها در فواصل مساوی قرار گرفته‌اند. شکل ۲.۳۸ هسته استاتور یک موتور پنج فاز را نشان می‌دهد که یک روتور ۵۰ دندانه‌ای را درایو می‌کند. همانطور که مشخص است، شکل دندانه قطب برای ده قطب یکسان نیست، یا اینکه اگر از شکل مشابهی استفاده شود، گام قطب‌ها دارای

فاصله یکسانی نخواهد بود. مفهوم ترتیب قطب و دندانه برای موتور هیبرید پنج فاز توسط Heine مورد بحث قرار گرفت. [4,5]



شکل ۲.۳۶. برش عرضی یک موتور هیبرید سه فاز برای درایو یک روتور ۲۰ دندانه‌ای

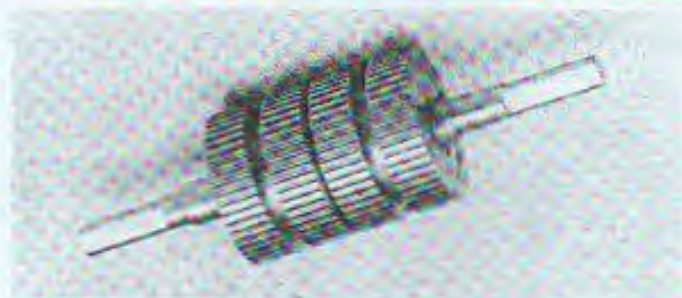


قطبهای ۱ و ۶ برای PhA با ۱ بصورت سری متصل شده‌اند
 قطبهای ۲ و ۷ برای PhC با ۳ بصورت سری متصل شده‌اند
 قطبهای ۳ و ۸ برای PhE با ۵ بصورت سری متصل شده‌اند
 قطبهای ۴ و ۹ برای PhB با ۲ بصورت سری متصل شده‌اند
 قطبهای ۵ و ۱۰ برای PhD با ۴ بصورت سری متصل شده‌اند

شکل ۲.۳۷. برش عرضی یک موتور هیبرید پنج فاز دارای ۳۶ دندانه روی روتور.



شکل ۲.۳۸. هسته استاتور یک موتور ۵۰۰ پله.



شکل ۲.۳۹. موتور هیبرید دو پشته‌ای طراحی شده برای افزایش گشتاور.

توجه کنید که هیچ تفاوت اساسی در ساختار روتور نسبت به تعداد فازها وجود ندارد. موتورهای پنج فاز از دو فازها گرانتر هستند، اما از نظر عملکرد دینامیک برتری دارند. بمنظور بالا بردن گشتاور، موتورهای هیبرید چند پشته‌ای مشابه به شکل ۲.۳۹ بکار گرفته می‌شوند. مقایسه تعداد فازها مساله فنی جالبی می‌باشد. همانطور که در فصل ۷ مشاهده می‌شود، موتورهای هیبرید سه فاز برای کنترل حلقه - بسته بجای سروموتورهای DC بدون جاروبک مناسب می‌باشند. در این درایو، تعیین موقعیت نهایی توسط طرح حلقه - بسته با استفاده از یک سنسور موقعیت انجام می‌پذیرد نه با استفاده از اثر برجستگی مضاعف^۱. برای کنترل حلقه - باز نرمال، موتورهای دوفاز و پنج فاز از نظر توانایی تقسیم یک دایره به اعداد صحیح مناسب دارای مزیت هستند. تقسیم یک دایره به ۲۰۰ قسمت در یک موتور دو فاز معمول است. تقسیم بر ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ در یک موتور پنج فاز ممکن می‌باشد. تقسیم بر ۳۰۰ توسط موتور دو فاز یا سه فاز قابل دستیابی است، اما موتور سه فاز با توجه به اینکه همان تعداد (۵۰) دندانه روی روتور را می‌توان بکار برد انتخاب خواهد شد: یک روتور ۷۵ دندانه‌ای به یک طرح^۲ دو فاز نیاز دارد. با اینکه استفاده از یک موتور پنج فاز در طرح حلقه - بسته اقتصادی نیست، رفتار دینامیکی بسیار خوبی در کنترل حلقه - باز نرمال از خود نشان می‌دهد.

۲.۳.۴ موتور آهنربای دائمی با دندانه‌های پنجه‌ای^۳

موتور PM دندانه پنجه‌ای نوع دیگری از موتور پله‌ای است. چون استاتور این موتور از نوعی قوطی فلزی تشکیل شده است. این موتور همچنین به نام موتور پله‌ای با پشته قوطی-شکل^۴ نیز شناخته می‌شود. دندانه‌ها از یک صفحه فلزی گرد برآمده‌اند و سپس دایره به شکل توپی درآمده است. سپس دندانه‌ها به داخل فرو برده شده‌اند تا بشکل دندانه‌های پنجه‌ای درآیند. یک پشته‌از

1- double-salient

2- scheme

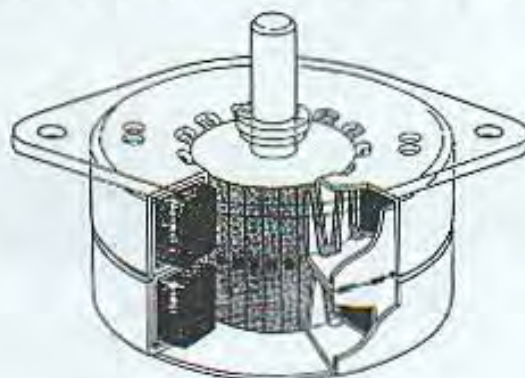
3- claw teeth

4- can-stack

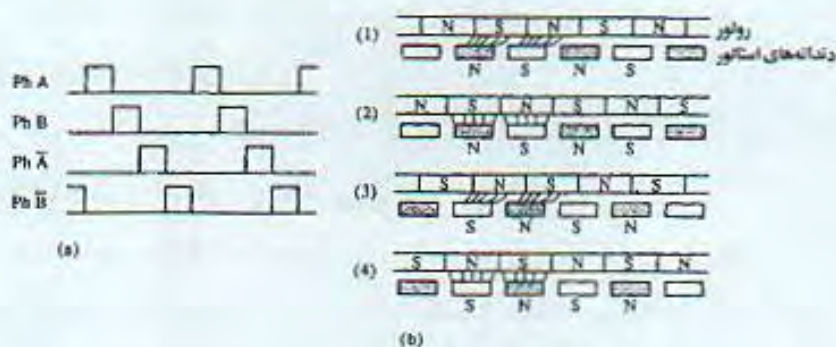
استاتور با اتصال دو قفسه توپی شکل تشکیل می‌شود بطوریکه دندانه‌های هردو درهم‌گیر می‌کنند و کلاف حلقوی^۱ درون آنها قرار دارد.

ویژگی موتور پشته قوطی-شکل این است که دندانه‌های استاتور یک میدان ناهم‌قطب را از جریان گذرنده از کلاف حلقوی استاتور بوجود می‌آورند.

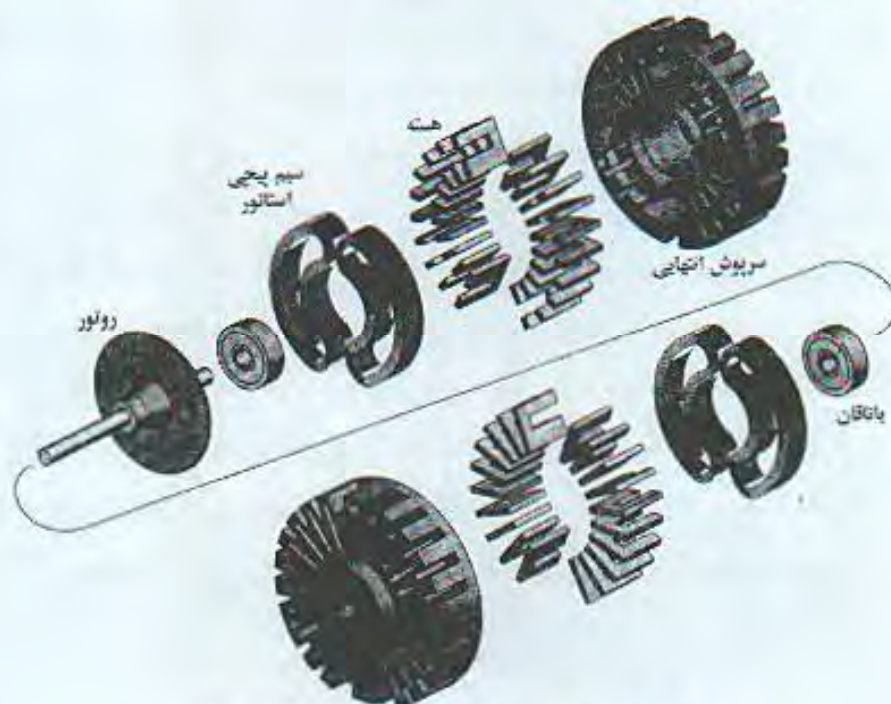
همانطور که در شکل ۲.۴۰ نشان داده شده است، آهنربای سرامیک استوانه‌ای روتور (فريت^۲) هم بمنظور تولید یک میدان ناهم‌قطب مغناطیده شده است. تعداد قطب‌های نمونه هر پشته در یک موتور پله‌ای $24, 7/5^\circ$ می‌باشد. این نوع از موتورها معمولاً دو پشته دارند. به این خاطر که روتور دارای قطب‌های مغناطیسی همدریف با محور و مشترک برای هر دو پشته استاتور می‌باشد، گام‌های دندانه استاتور به اندازه ربع گام بین دو پشته ناهم‌ریف هستند. کلاف‌های حلقوی معمولاً دو رشته‌ای می‌باشند تا با سوییچینگ جریان یک جهت بین آنها پلارینه مخالف بوجود آید. شکل ۲.۴۱ یک ترتیب نمونه از تحریک و چگونگی انجام شدن پله‌ها را نشان می‌دهد. روتور در ابتدا در موقعیت حالت (۱) قرار می‌گیرد، و فاز A برای ایجاد قطب‌های مغناطیسی مطابق الگوی سطر (۱) تحریک شده است. همانطور که مشخص است، روتور بعلت کشش خطوط مغناطیسی به چپ حرکت می‌کند. حالت (۲) به هنگام تحریک فاز A یک موقعیت تعادل می‌باشد. پس اگر جریان به فاز B سوییچ شود، روتور در همان جهت بیشتر رانده خواهد شد، بخاطر اینکه دندانه‌های استاتور در پشته B به اندازه ربع گام دندانه از سمت چپ نسبت به پشته A ناهم‌ریف می‌باشند. حالت (۳) نتیجه ناشی از این تحریک را نشان می‌دهد. برای پیش راندن بیشتر روتور به چپ و قرار گرفتن در حالت (۴)، فاز B تخلیه انرژی و فاز A تحریک می‌شود. سپس، جریان به فاز B سوییچ خواهد شد. موتور دندانه پنجه‌ای هزینه‌های تولید پایینی دارد، اما قادر به تحقق یک زاویه پله بسیار کوچک نیست.



شکل ۲.۴۰. دیاگرام مقطعی یک موتور PM دندانه پنجه‌ای.



شکل ۲.۴۱. (a) شکل موج جریان تغذیه شده به یک موتور PM دندانه پنجه‌ای و (b) چگونگی انجام شدن پله‌ها.



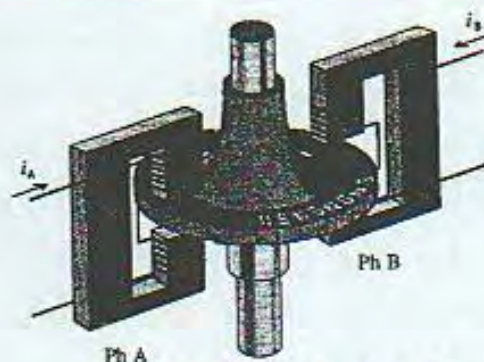
شکل ۲.۴۲. دیاگرام متلاشی یک موتور آهنربای دیسکی.

۲.۳.۵ موتور آهنربای دیسکی^۱

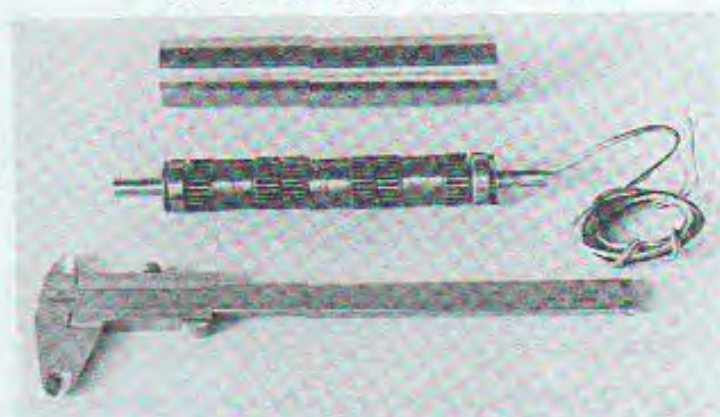
موتور آهنربای دیسکی در شکل ۲.۴۲ یک موتور پله‌ای منحصر بفرد است، که توسط Stcherbatcheff و Qudet^[۹,۷] از روی یک ریزموتور^۲ بکار رفته در ساعت مجی اختراع شد. قسمت اصلی روتور یک دیسک نازک از جنس آهنربای کمیاب مغناطیده با ۲۵ جفت قطب می‌باشد. استاتور دارای دو قطب شامل گروهی از دندانه‌ها می‌شود. مدل نشان داده شده در شکل ۲.۴۳ اساس

1- disk-magnet motor

2- micromotor



شکل ۲.۴۳. اساس یک موتور آهنربای دیسکی.



شکل ۲.۴۴. یک موتور VR با روتور بیرونی. (ساخت Sanyo Denki Co.Ltd.)

عملکرد این موتور را نشان می‌دهد. ویژگی‌های این موتور اینرسی روتور اندک و گشتاور بزرگ ناشی از ساختار ساندویچی می‌باشند، در حالیکه ساخت آن با فاصله هوایی محوری الزاماً کوچک آسان نمی‌باشد.

۲.۳.۶ موتور پله‌ای با روتور بیرونی^۱

موتورهای چرخان را می‌توان به دو نوع با روتور بیرونی و با روتور درونی^۲ طبقه‌بندی کرد. تمامی موتورهای پله‌ای که تا کنون توصیف شده‌اند از نوع با روتور درونی می‌باشند، که در آنها استاتور روتور را در میان می‌گیرد. در موتور با روتور بیرونی، روتور در خارج از استاتور قرار دارد. موتورهای پله‌ای با روتور بیرونی بسیار کم هستند، ولی وجود دارند.^[۸] موتور شکل ۲.۴۴ یک موتور VR با روتور بیرونی ۸۱ پله می‌باشد که برای یک سیستم کاغذگردان طراحی شده است، خود روتور بعنوان غلتک کاغذگردان می‌باشد. استاتور از نوع سه پشته‌ای می‌باشد و هسته آنها به محور که محکم به ابزار متصل است محکم شده‌اند. روتور بیرونی از طریق دو مسیر توپی به محور متصل است و براحتی می‌چرخد.

۲.۳.۷ موتورهای پله‌ای خطی^۱

تمامی موتورهایی که تاکنون تشریح شده‌اند ماشینهای چرخان^۲ می‌باشند و طوری طراحی شده‌اند که روتور می‌تواند در دو جهت CW و CCW نسبت به استاتور بچرخد.

برخی موتورها هم وجود دارند که برای انجام حرکت خطی طراحی شده‌اند و موتورهای خطی نامیده می‌شوند. به اندازه موتورهای چرخان انواع موتور خطی موجود می‌باشد؛ آنها شامل موتورهای DC، موتورهای سنکرون، موتورهای القایی، و موتورهای بدون جاروبک می‌شوند. اما موتور پله‌ای خطی مهمترین موتور از میان موتورهای خطی کوچک بکار رفته در کاربردهای کنترلی می‌باشد. موتورهای پله‌ای خطی را می‌توان به موتورهای VR یا موتورهای PM طبقه‌بندی کرد، مورد آخر متناظر با موتور هیبرید از نوع چرخان می‌باشد.

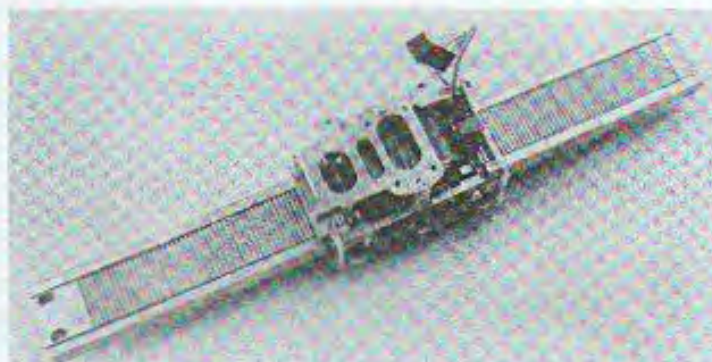
(۱) موتور خطی VR. یک نمونه از ساختار موتور VR سه فاز در شکل ۲.۴۵ نشان داده شده است، و موتوری است که ابتدا توسط IBM طراحی و توسط Sanyo Denki بمنظور انتقال حامل^۳ در یک چاپگر سریال ساخته شد. دندانها در سطح مقابل استاتور ایجاد شده‌اند. جزئیات این ماشین در مرجع^[۹] بحث شده است.

(۲) موتورهای خطی PM. اساس یک موتور PM موسوم به موتور خطی Sawyer^[۱۰] در شکل ۲.۴۶ نشان داده شده است. موتور که در اینجا به اصطلاح 'لغزنده'^۴ خوانده می‌شود شامل یک آهنربای دائمی و دو آهنربای الکتریکی A و B می‌شود. شار ناشی از آهنربای دائمی مسیر بسته‌ای را از میان هسته آهنربای الکتریکی، فاصله هوایی بین هسته و استاتور و استاتور و هسته تشکیل می‌دهد. در غیاب جریان در کلاف، شار آهنربا از هر دو دندان هسته همانطور که در آهنربای الکتریکی B در حالت (a) و (c) نشان داده شده است، می‌گذرد. هنگامیکه کلاف تحریک می‌شود، بنحوی، شار در یک دندان همانطور که در آهنربای الکتریکی A در حالت (a) نشان داده شده است، متمرکز می‌شود. این امر باعث ماکزیمم شدن چگالی شار در این دندان می‌شود، در حالیکه در دندان دیگر به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد.

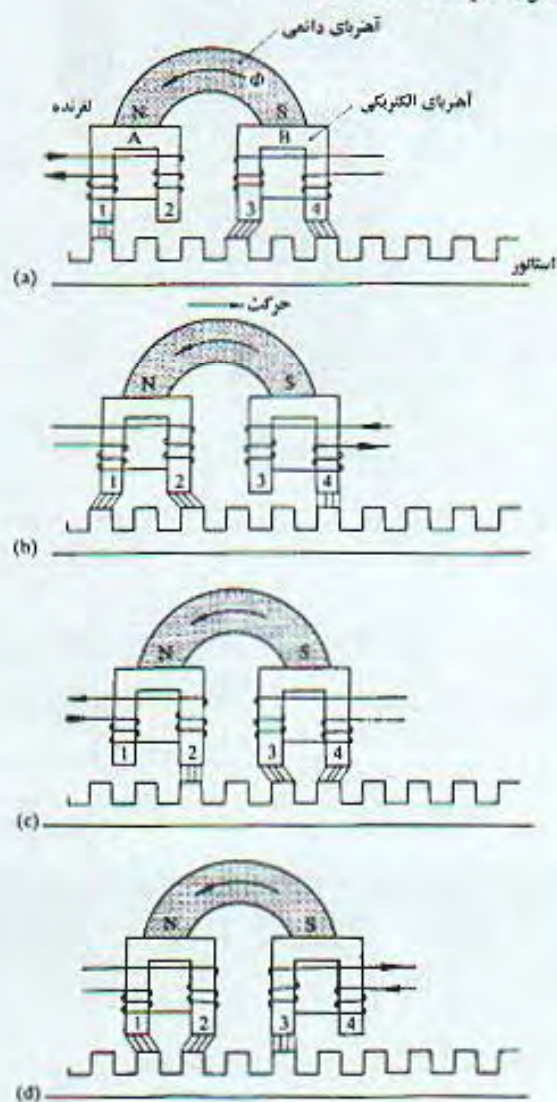
حال در شکل (a) ۲.۴۶ دندان ۱ از آهنربای الکتریکی A با یک دندان استاتور هم‌ردیف است. هنگامیکه جریان به کلاف B در جهت نشان داده شده در (b) سوییچ می‌شود، لغزنده به اندازه ربع گام دندان به راست رانده خواهد شد تا دندان ۴ با دندان مجاور استاتور هم‌ردیف شود. سپس، آهنربای الکتریکی B تخلیه انرژی می‌شود و A در پلاریته مخالف حالت قبل تحریک می‌شود. این امر باعث بوجود آمدن نیرویی برای هم‌ردیف کردن دندان ۲ در A با دندان استاتور مجاور آن همانطور که در (C) نشان داده شده می‌شود. برای حرکت بیشتر لغزنده در همان جهت، کلاف A تخلیه انرژی و کلاف B در پلاریته مخالف حالت قبل تحریک می‌شود. این حالت (d) می‌باشد.

1- linear
3- carriage

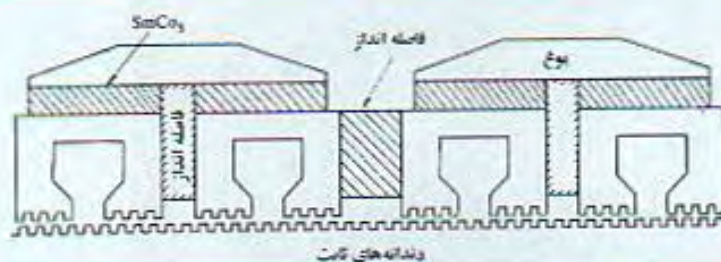
2- rotating
4- slider



شکل ۲.۴۵. موتور خطی VR طراحی شده برای انتقال حامل در یک چاپگر سریال.
(محصول IBM Corp.)



شکل ۲.۴۶. اساس موتور خطی Sawyer



شکل ۲.۴۷. ساختار یک موتور خطی PM بکار رفته در یک ماشین طراحی خودکار.



شکل ۲.۴۸. هد طراحی Xynetics (محصول Daini Seikosha Co.Ltd.)

ساختار یک موتور هیبرید خطی که از اساس Sawyer بمنظور استفاده در درایو هد طراحی در رسام گرافیکی حاصل شده در شکل ۲.۴۷ نشان داده شده است. برای درایو هد طراحی روی یک صفحه، دو موتور خطی مطابق شکل ۲.۴۸ ترکیب شده‌اند.

در کنفرانس بین‌المللی موتورهای و سیستم‌های پله‌ای در سال ۱۹۷۹، یک موتور خطی^[۱] ارائه شد که روی یک استاتور میله‌ای حرکت می‌کرد. اساس اولیه ماشین مشابه موتور Sawyer می‌باشد.

۲.۳.۸ سیم پیچی‌های تک رشته‌ای^۱ و دو رشته‌ای^۲

حال انواع سیم پیچی‌های بکار رفته در موتورهای پله‌ای را بررسی خواهیم کرد. کلاف‌های سیملوله‌ای یا حلقوی در موتورهای VR چند پشته‌ای و موتورهای PM دندانه پنجه‌ای بکار

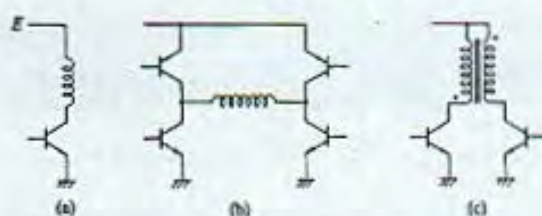
رفته‌اند. از طرف دیگر، در موتورهای هیبرید و موتورهای VR تک پشته‌ای، کلاف‌های 'متمرکز' پیچیده بدور یک قطب استاتور بکار گرفته شده‌اند. در هر دو نوع، سیم‌پیچی‌های تک رشته‌ای و دورشته‌ای قابل استفاده می‌باشند. شکل ۲.۴۹ تفاوت بین سیم‌پیچی‌های تک رشته‌ای و دو رشته‌ای را نشان می‌دهد. یکی از دو سیم پیچیده در طرح دورشته‌ای به هنگام تحریک از نظر مغناطیسی تزویج می‌شود.

تحریک یک قطب یا یک فاز ممکن است توسط سه طرح نشان داده شده در شکل ۲.۵۰ انجام شود. اگر سیم‌پیچی تک رشته‌ای در طرح (a) بکار رفته باشد، پلاریته مغناطیسی در تحریک همواره شمال یا جنوب می‌باشد: پلاریته نمی‌تواند سوئیچ شود. روش تحریک تک قطبی نامیده می‌شود و در موتورهای VR بطور گسترده اعمال می‌شود. در مدار (b)، که یک مدار پل نامیده می‌شود، می‌توان جهت جریان در کلاف را سوئیچ کرد. به‌رحال، برای هر فاز چهار ترانزیستور لازم است. این روش بنام تحریک دو قطبی خوانده می‌شود. مدار (c) یک مدار درایو از قطب‌های پیچیده بصورت دو رشته‌ای را نشان می‌دهد: دو نقطه کوچک نشان می‌دهند که یک کلاف قطب شمالی را تحریک می‌کند و دیگری قطب جنوبی را. از اینرو هدف از سیم‌پیچی‌های دو رشته‌ای انجام تحریک دو قطبی با تعداد کمتری المانهای سوئیچینگ می‌باشد.

یک مزیت تحریک دو قطبی در موتور VR تک پشته‌ای در بخش ۲.۴.۴ بررسی شده است.



شکل ۲.۴۹. سیم‌پیچی دو رشته‌ای.



شکل ۲.۵۰ - مدار تحریک اساسی. (a) سیم‌پیچی تک رشته‌ای، تحریک تک قطبی؛ (b) سیم‌پیچی تک رشته‌ای، تحریک دو قطبی؛ (c) سیم‌پیچی دورشته‌ای، تحریک دو قطبی.

جدول ۲.۱. ترتیب تحریک در عملکرد تکفاز در تحریک.

(۱) موتور VR سه فاز

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									

(۲) موتور VR چهار فاز

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									
Phase 4									

Pulses

توجه: حرف R نشانگر 'reset' می‌باشد.

جدول ۲.۲. ترتیب تحریک در عملکرد دو فاز در تحریک.

(۱) موتور VR سه فاز

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									

(۲) موتور VR چهار فاز

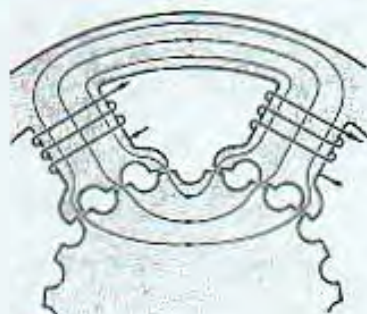
Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									
Phase 4									

۲.۴ روش‌های تحریک

در مباحثی که تاکنون ارائه شد اساس موتور پله‌ای در قالب تحریک تکفاز تشریح شد. این روش یکی از اساسی‌ترین روش‌های تحریک می‌باشد و اغلب برای تحلیل مسائل نظری پایه بکار می‌رود. بهر حال، امروزه چندین روش مختلف تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲.۴.۱ تحریک تکفاز

جدول ۲.۱ ترتیب روش تحریک تکفاز را برای موتورهای VR سه و چهار فاز نشان می‌دهد. قسمتهای هاشورزده جدول حالت تحریک شده را نشان می‌دهند، و خانه‌های سفید فازهایی که جریان به آنها تغذیه نشده و از اینرو تحریک نشده‌اند را نشان می‌دهند. هنگامیکه یک موتور در جهت ساعتگرد با ترتیب تحریک ... $Ph1 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph3$ می‌چرخد، بسادگی با عکس کردن ترتیب به ... $Ph3 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph1$ در جهت عکس ساعتگرد می‌چرخد. عملکرد با تحریک تکفاز 'درایو تکفاز در تحریک' نیز نامیده می‌شود.



شکل ۲.۵۱. رابطه موقعیت دندانه‌های روتور و استاتور در عملکرد دوفاز.



شکل ۲.۵۲. تغییر در الگوی میدان با انجام یک پله در روش دوفاز در تحریک در یک موتور VR سه فاز تک

رشته‌ای.

۲.۴.۲ عملکرد تحریک دوفاز

عملکرد یک موتور که در آن دوفاز همواره تحریک شده است 'عملکرد دوفاز در تحریک' نامیده می‌شود. قبل از بحث درباره مزایای این روش، ترتیب تحریک و رابطه بین دندانه‌های روتور و استاتور را در موقعیت تعادل بررسی می‌کنیم. ترتیب‌ها در جدول ۲.۲ داده شده‌اند. در این جدول‌ها دیده می‌شود هنگامیکه جریان تحریکی از یک فاز به فاز دیگر سوییچ می‌شود (بطور مثال مطابق با جدول ۲.۴(۱) Ph2 خاموش و Ph1 روشن می‌شود) فاز سوم (Ph3 در مثال بالا) تحریک شده باقی می‌ماند.

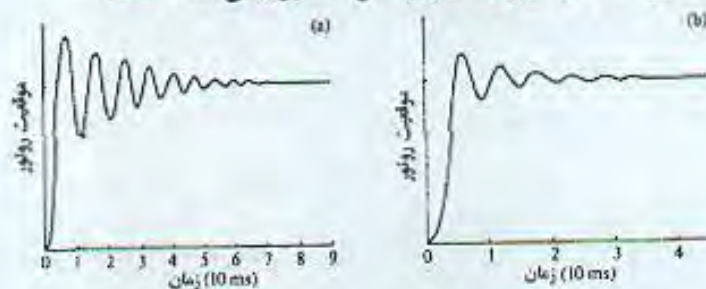
رابطه موقعیتی^۱ بین دندانه‌های روتور و استاتور در یک حالت تعادل همانند شکل ۲.۵۱ می‌باشد. دندانه‌ها در هر دو عضو همانند حالت روش یکفاز در تحریک نشان داده شده در شکل ۲.۱۱ و شکل ۲.۳۳ هم‌ردیف نیستند. توزیع میدان و عملکرد پله برای موتور سه فاز شش قطبی در مقطع عرضی شکل ۲.۵۲ نشان داده شده‌اند.

یک تفاوت بزرگ بین مشخصه عملکرد یکفاز در تحریک و دوفاز در تحریک در پاسخ‌گذاری مطابق با شکل ۲.۵۳ مشاهده می‌شود. در درایو دوفاز در تحریک نوسان خیلی سریع‌تر از حالت روش یکفاز در تحریک میرا می‌شود. این مورد را می‌توان از نظر کیفی با استفاده از شکل‌های

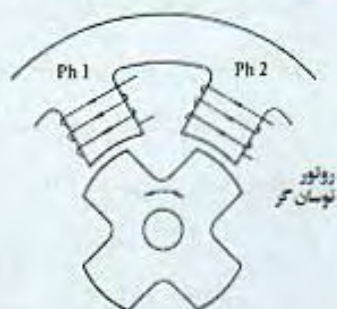
1- positional relation

۲.۵۴ و ۲.۵۵ بصورتی که در پی می‌آید توضیح داد. دو فاز همواره در این روش عملکرد تحریک شده‌اند، و مدار دو فاز یک حلقه بسته ناشی از القای الکترومغناطیسی به هنگام وقوع نوسان را تشکیل می‌دهد که مربوط به مولفه نوسانی جریان می‌شود، نه به مولفه پایدار تولیدکننده گشتاور نگهدارنده. از اینرو، حرکت نوسانی روتور باعث جریان نوسانی اضافه شده به جریان پایدار در هر فاز می‌شود. باید توجه کرد که فازهای مولفه نوسانی جریان در $Ph1$ ، $Ph2$ مخالف هم هستند. به این خاطر که گشتاور ایجاد شده توسط مولفه نوسانی جریان در جهت مخالف حرکت نوسانی عمل می‌کند، نوسان میرا می‌شود. یا ممکن است اینطور گفته شود که انرژی جنبشی مربوط به نوسان روتور در طی این فرایند به گرمای ژول تبدیل می‌شود.

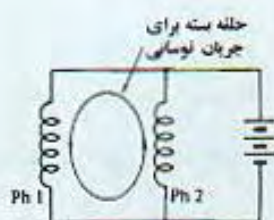
چون این نوع از مدار بسته در روش تحریک تکفاز تشکیل نمی‌شود، نوسان تنها بوسیله اصطکاک مکانیکی میرا می‌شود. این مسأله با جزئیات در بخش ۴.۳ بررسی شده است.



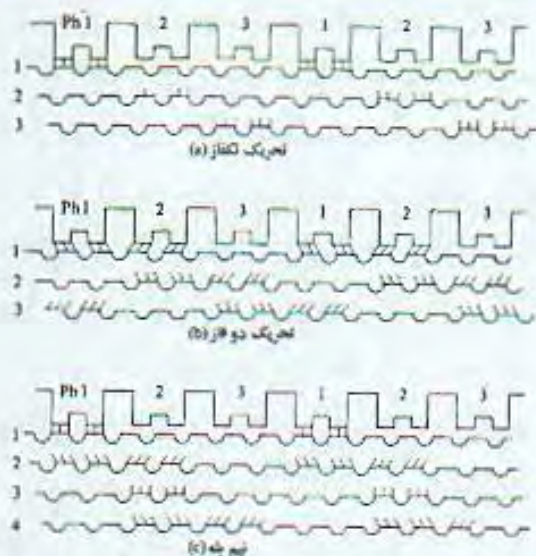
شکل ۲.۵۳. اختلاف در پاسخ پله واحد بین تحریک تکفاز (a) و دوفاز (b).



شکل ۲.۵۴. نوسان روتور در تحریک دوفاز.



شکل ۲.۵۵. حلقه بسته برای جریان نوسان کننده.



شکل ۲.۵۶. مقایسه درایوهای تکفاز در تحریک، دو فاز در تحریک، و نیم پله.

جدول ۲.۳. ترتیب تحریک در عملکرد نیم پله (برای یک موتور VR سه فاز)

Clock state(A)	R	1	2	3	4	5
Clock state(B)	R	1	2	3	4	5
Phase 1						
Phase 2						
Phase 3						

۲.۴.۳ روش نیم پله^۱

طرح تحریکی که ترکیبی از تحریک تکفاز و دو فاز است عملکرد به اصطلاح نیم پله می‌باشد. ترتیب تحریک برای موتورهای VR سه فاز در جدول ۲.۳ داده شده است. تعداد حالت‌های ساعت به دو طریق در نظر گرفته شده‌اند، (A) و (B). در روش (A)، تعیین موقعیتها تنها از طریق تحریک تکفاز انجام می‌گیرد، و دو فاز به هنگام حرکت از یک نقطه تعادل به نقطه تعادل دیگر تحریک شده‌اند. تحریک دو فاز در اینجا برای متوقف کردن نوسان بکار رفته است. در روش دیگر، موقعیت‌های تعادل هر دو تحریک تکفاز و دو فاز بمنظور تعیین موقعیت بکار گرفته شده‌اند. حالت‌های ساعت در (B) هم مانند این روش بایستی شمارش شوند. این طرح زاویه پله را به نصف کاهش می‌دهد.

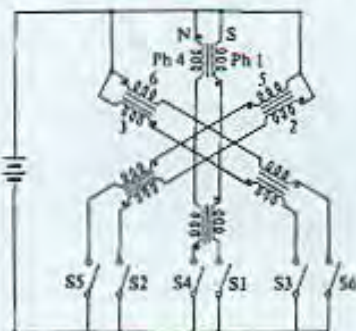
۲.۴.۴ درایو دو فاز در تحریک موتور VR سه فاز با سیم پیچی دورشته‌ای

یکی از مهمترین ملزومات در طراحی موتور کوچک کردن اندازه ماشین تا حد ممکن برای مشخصات کاری خواسته شده است. Pawletko و Chai^[2] ادعا می‌کنند که موتور VR سه فاز

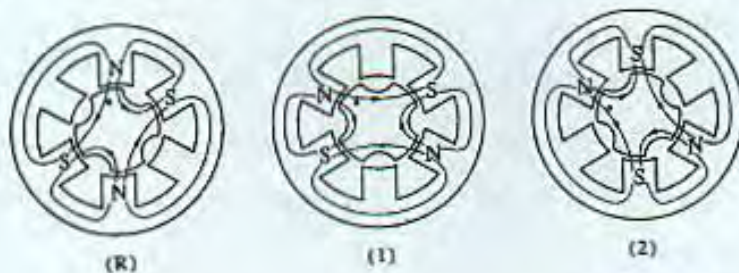
سیم‌پیچی شده دورشته‌ای با تحریک دوفاز این لازمه را بر آورده می‌کند. دیاگرام شماتیک اتصالات سیم‌پیچی در شکل ۲.۵۷ آورده شده است. باید توجه کرد که کلاف‌های قطب‌های مخالف طوری متصل شده‌اند که شارها در دو قطب در زمان واحد هم به سمت بیرون و هم به سمت داخل جهت‌دار شده‌اند. (مشابه شکل ۲.۱۱ که دو قطب مخالف قطب‌های مغناطیسی متفاوت با یکدیگر ایجاد می‌کنند). شکل ۲.۵۸ توزیع شار ناشی از ترتیب تحریک دوفاز را نشان می‌دهد. چهار حلقه شار وجود دارند که بشکل واحدی در هسته‌ها توزیع شده‌اند. این موضوع در تقابل با طرح تحریک در موتور با سیم‌پیچی تک‌رشته‌ای است که تنها دارای دو حلقه شار در هر دو روش یکفاز در تحریک و دو فاز در تحریک مطابق شکل‌های ۲.۱۱ و ۲.۵۲ می‌باشد. در واقع یک موتور VR سه فاز با سیم‌پیچی دورشته‌ای از نظر نسبت گشتاور به حجم ماشین و میرایی در مقایسه با موتورهای با سیم‌پیچی تک رشته‌ای متناظر برتر می‌باشد.

۲.۴.۵ تحریک موتور هیبرید دوفاز

در درایو کردن یک موتور VR همیشه لازم نیست تا پلاریته مغناطیسی تغییر کند. برای یک موتور آهنربای دائمی یا یک موتور هیبرید، معکوس کردن قطب مغناطیسی ضروری است، و اساساً دو روش وجود دارد. ابتدا نگاهی به این دو روش در یک موتور دو فاز می‌اندازیم. اگر سیم‌پیچی‌ها به شکل دورشته‌ای باشند، شرایط مشابه یک موتور VR چهارفاز است. فازهای A ، B ، \bar{A} و \bar{B} متناظر با فازهای ۱، ۲، ۳ و ۴ می‌باشند، و سه روش تحریک قبلی اعمال شده‌اند.



شکل ۲.۵۷. دیاگرام شماتیک کلاف‌های با سیم‌پیچی دورشته‌ای در موتور VR سه فاز.



شکل ۲.۵۸. الگوی میدان در موتور سه فاز با سیم‌پیچی دورشته‌ای.

اگر هر یک از فازهای A و B دارای یک کلاف تک رشته‌ای در هر قطب مطابق شکل ۲.۵۹ باشد، مدار پل نشان داده شده در شکل ۲.۶۰ یک طرح درایو مناسب برای روش دو قطبی می‌باشد. انجام روش یکفاز در تحریک، دو فاز در تحریک، و نیم‌پله با مدار پل امکان‌پذیر است، و ترتیب سوییچینگ‌ها در جدول ۲.۴ نشان داده شده است. شکل موجهای ولتاژ اعمال شده به هر یک از فازها در شکل ۲.۶۱ مقایسه شده‌اند.

مشخص است که ۳۰-۲۵ درصد بهبود در مصرف توان با بکارگیری درایو تک قطبی ممکن است. تنها عیب درایو پل این است که به اندازه دو برابر عملکرد دو رشته‌ای به ترانزیستور نیاز دارد. هنگامیکه یک موتور با سیم‌پیچی دورشته‌ای سر وسط دار با طرح دو قطبی درایو می‌شود، سیم‌ها باید مطابق شکل ۲.۶۲ متصل شوند تا سیم‌پیچی‌های \bar{A} ، A در هر قطب استاتور پلاریته مغناطیسی را با علامتی یکسان بوجود آورند.

جدول ۲.۴. ترتیب تحریک در عملکرد پل برای یک موتور دو فاز.

(a) یکفاز در تحریک

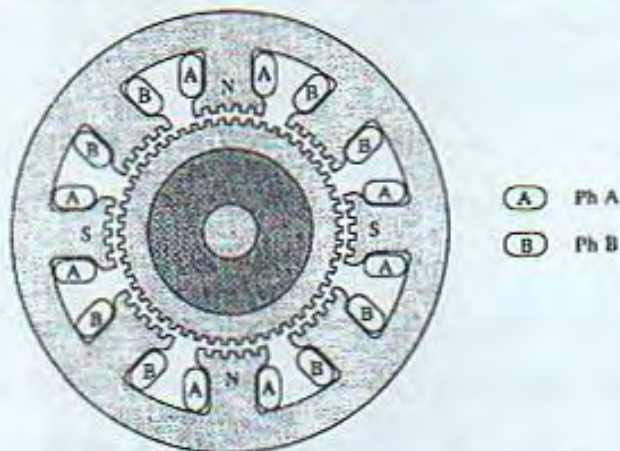
Clock state	R	1	2	3	4	5
S1						
S2						
S3						
S4						
S5						
S6						
S7						
S8						

(b) دو فاز در تحریک

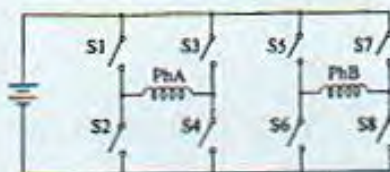
	R	1	2	3	4	5
S1						
S2						
S3						
S4						
S5						
S6						
S7						
S8						

(c) نیم‌پله

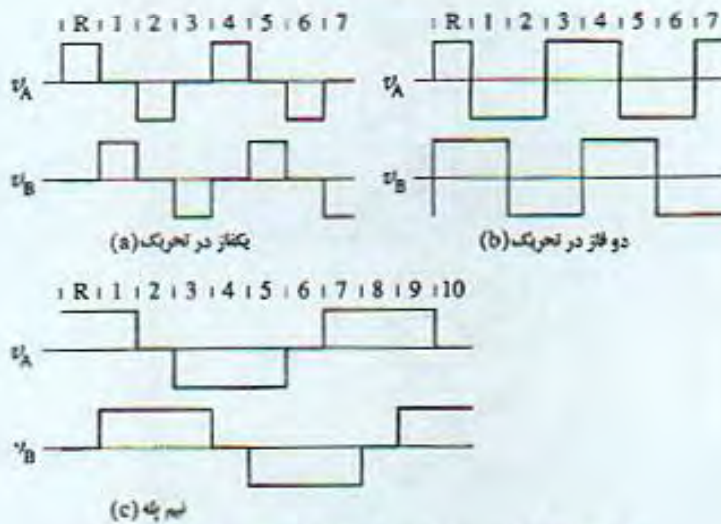
Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1											
S2											
S3											
S4											
S5											
S6											
S7											
S8											



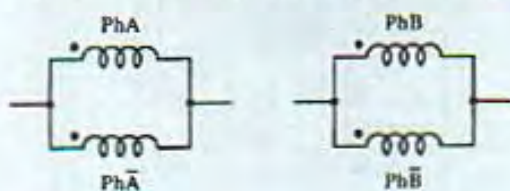
شکل ۲.۵۹. آرایش کلاف در یک موتور هیبرید با سیم‌پیچی تک رشته‌ای.



شکل ۲.۶۰. طرح درایور پل برای یک موتور پله‌ای دو فاز.



شکل ۲.۶۱. شکل موجهای ولتاژ اعمال شده به هر فاز.



شکل ۲.۶۲. یک موتور هیبرید با سیم‌پیچی دو رشته‌ای با درایو پل دو قطبی.

۲.۴.۶ تحریک یک موتور هیبرید سه یا پنج فاز

اساساً سه روش مختلف برای اتصالات سیم‌پیچی این موتورها وجود دارد.

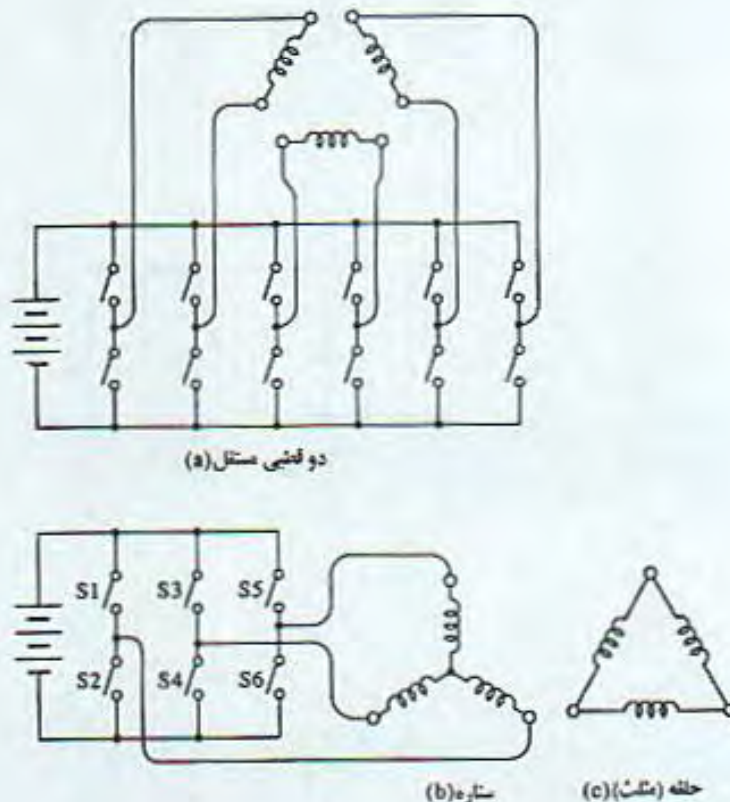
۱. مستقل برای عملکرد پل دو قطبی؛

۲. اتصالات ستاره؛

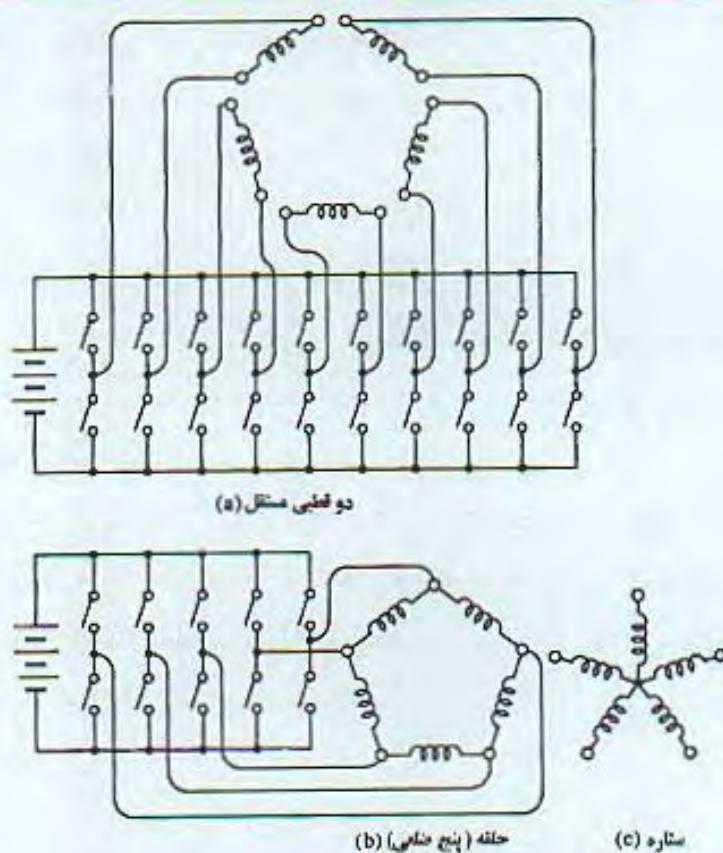
۳. اتصالات حلقوی (مثلث برای سه فاز و پنج ضلعی برای پنج فاز).

این اتصالات بترتیب در شکل‌های ۲.۶۳ و ۲.۶۴ نشان داده شده‌اند. جالب است که اتصال ستاره به اتصال مثلث در موتورهای سه فاز ترجیح داده می‌شود در حالیکه اتصال پنج ضلعی بیشتر از اتصال ستاره در موتورهای پنج فاز استفاده می‌شود.

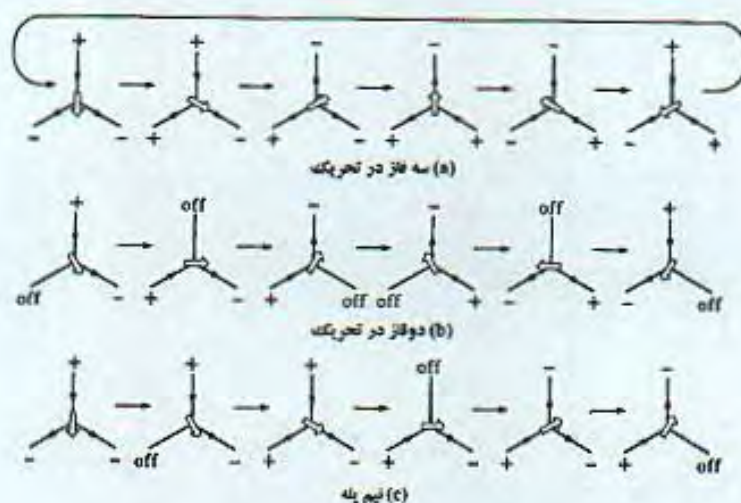
برای یک موتور سه فاز با اتصالات ستاره یا مثلث، دو انتخاب برای عملکرد تمام پله وجود دارد؛ یکی تحریک تمامی فازها در هر زمان در حالیکه پلاریته‌ها به ترتیب تغییر می‌کنند، و دیگری تحریک همواره دو فاز است. عملکرد نیم‌پله عملکرد متناوب این دو به ترتیب مناسب می‌باشد. تفاوت بین این سه در شکل ۲.۶۵ نشان داده شده است.



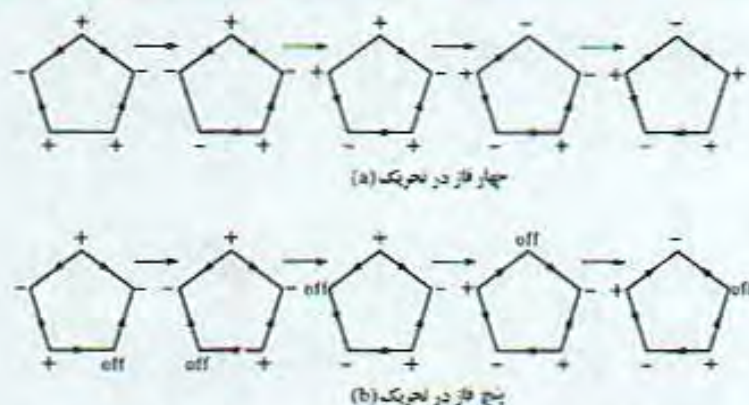
شکل ۲.۶۳. شکل درایو برای یک موتور هیبرید سه فاز.



شکل ۲۶۴. شکل درایو برای یک موتور هیبرید پنج فاز.



شکل ۲۶۵. چگونگی تغییر جهت جریان در سیم پیچی‌های سه فاز با اتصال ستاره به ترتیب با پله‌ها. (a) سه فاز در تحریک (b) دو فاز در تحریک، و (c) نیم پله.



شکل ۲.۶۶. تغییر در جهت جریان در سیم‌پیچی‌های پنج فاز با اتصال پنج ضلعی به ترتیب. (a) چهار فاز در تحریک و (b) پنج فاز در تحریک.

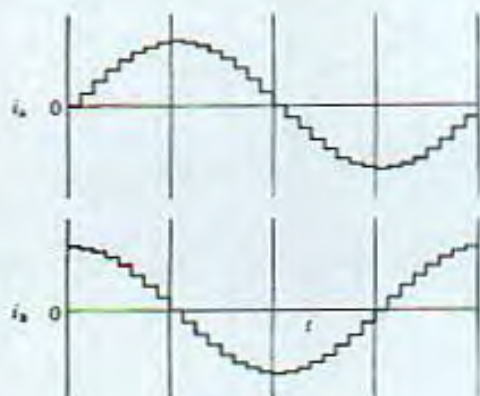
مورد مشابهی برای موتور پنج فاز مطابق شکل ۲.۶۶ صادق است. حالت سونیچینگ پایه برای روش چهار فاز در تحریک در یک موتور با اتصال پنج ضلعی در (a) آورده شده است، و این روش با روش پنج فاز در تحریک برای یک موتور با اتصال ستاره متناظر است. در این حالت، هرگره در پتانسیل تغذیه (که با '+' نشان داده می‌شود) یا GND (که با '-' نشان داده می‌شود) می‌باشد. برای رسیدن به یک درایو پنج فاز در تحریک در موتوری با اتصال پنج ضلعی، روش نشان داده شده در (b) موجود است، و در این حالت یک پریود خاموش بین حالت‌های + و - ظاهر می‌شود. جدول درستی برای ترتیب سونیچینگ در روش دو فاز در تحریک با اتصال مثلث یا سه فاز در تحریک با اتصال ستاره در جدول (a) ۲.۵ داده شده است. از اینرو حالت سونیچینگ reset (R) به اندازه شش بیت گردش می‌کند. همانطور که در شکل (b) ۲.۵ دیده می‌شود ترتیب مشابهی را می‌توان برای سه فاز در تحریک با اتصال مثلث یا دو فاز در تحریک ستاره تنها با جابجایی حالت ON یا OFF مربوط به S2 در حالت reset (R) بکار برد. این مورد در برنامه میکرو کامپیوتری نوشته شده در بخش ۵.۲.۶ بکار گرفته شده است.

جدول ۲.۵. ترتیب تحریک برای یک موتور هیبرید سه فاز

(b) سه فاز در تحریک با اتصال مثلث (a) دو فاز در تحریک با اتصال مثلث
دو فاز در تحریک با اتصال ستاره یا سه فاز در تحریک با اتصال ستاره

Clock state	R	1	2	3	4	5	6
S1							
S6							
S3							
S2							
S5							
S4							

Clock state	R	1	2	3	4	5	6
S1							
S6							
S3							
S2							
S5							
S4							



شکل ۲.۶۷. جریان موج - پله‌ای برای درایو ریزپله.

۲.۴.۷ درایو ریزپله^۱

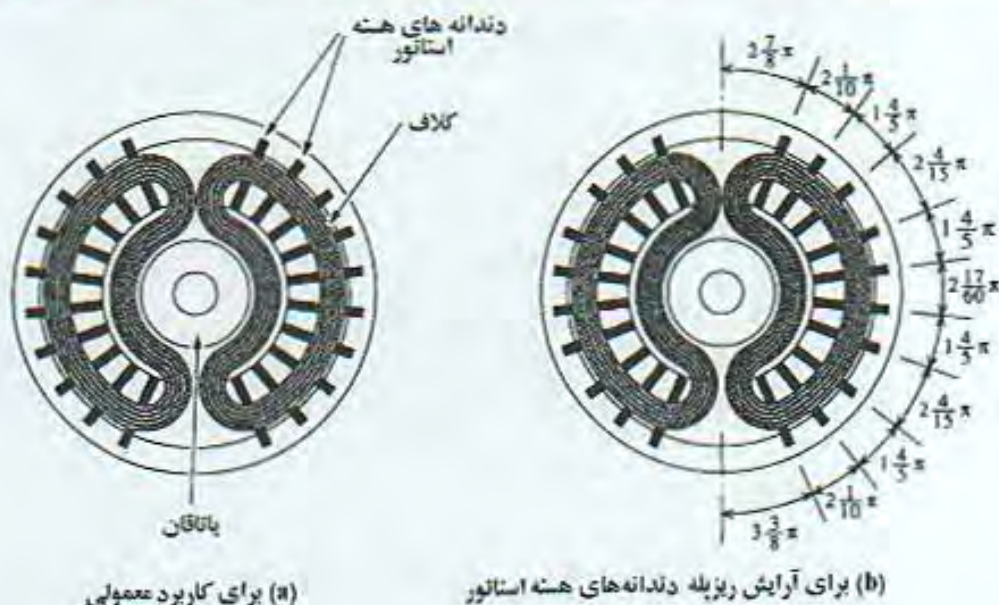
تقسیم یک پله طبیعی به پله‌های بسیار کوچک با بهره‌گیری از الکترونیک امکان‌پذیر می‌باشد. این روش بنام درایو ریزپله یا ministep شناخته می‌شود و اغلب در موتورهای پله‌ای هیبرید بکار می‌رود. ایده ریزپله کردن از درایو دو قطبی سینوسی یک موتور هیبرید بعنوان یک موتور سنکرون که با سرعت کم با فرکانس اصلی $50/60$ Hz کار می‌کند، ناشی می‌شود. اگر یک موتور هیبرید توسط یک منبع موج سینوسی دوفاز، بجای موج مربعی یا پله، درایو شود، انتظار می‌رود که حرکت روتور بدون پله و بسیار روان باشد. این امر در مورد برخی موتورها در شرایط خاصی صحیح می‌باشد^[12] اما در موارد بسیاری یک حرکت کاملاً روان بخاطر اثر گیره‌ای، اثر رلوکتانس متغیر، و هارمونیکهای القایی در ولتاژ توسط آهنربا محقق نمی‌شود.

برای تقسیم یک پله طبیعی، جریان منبع مطابق شکل ۲.۶۷ به شکل موج پله‌ای در می‌آید، و برخی روشهای جبران سازی هارمونیکهای گشتاور بکار گرفته می‌شود. در این مثال، یک پله طبیعی به هشت خرده^۲ پله تقسیم می‌شود. در درایو موتور پله‌ای نشان داده شده در شکل ۲.۴۸ یک پله کامل به ۲۴ خرده پله تقسیم شده بود تا هدا طراحی با تحقق حداقل تقسیم به $10/1\text{mm}$ از یک گام دندانه $0/96\text{mm}$ را درایو کند.

در یک موتور با روتور دیسکی طراحی شده برای عملکرد ریز پله، آرایش دندانه‌های استاتور مطابق با شکل ۲.۶۸ بنحوی تنظیم شده است تا مولفه هارمونیک چهارم در گشتاور گیره، و همچنین مولفه‌های هارمونیک سوم و پنجم ناشی از تعامل بین جریانهای سیم‌پیچی و میدان مغناطیسی را حذف کند.^[13] باید توجه کرد که مولفه هارمونیک دوم با آرایش مناسب دو فاز از بین می‌رود.

1- microstep drive

2- substep



شکل ۲.۶۸. آرایش دندانه در یک موتور با آهنربای دیسکی. (a) برای نوع نرمال و (b) برای کاربرد ریز پله.

Patterson^[14,15] تصحیح هارمونیکهای گشتاور در یک موتور هیبرید با تنظیم شکل موجهای

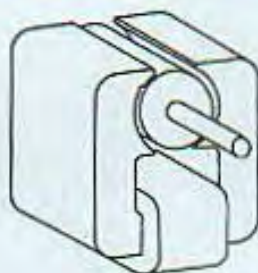
جریان را مورد بررسی قرار داد.

هدف دیگر درایو ریز پله کاهش نوسانات یا نویز ناشی از ارتعاش در تقسیم فرعی می‌باشد.

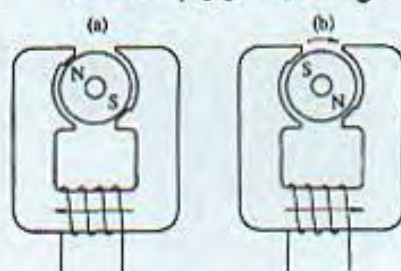
۲.۵ موتورهای پله‌ای تکفاز

تمام موتورهایی که تاکنون تشریح شده‌اند موتورهای پله‌ای چند فازه می‌باشند. بهرحال، برخی موتورهای پله‌ای وجود دارند که برای کار با یک منبع تکفاز طراحی شده‌اند و بطور گسترده در ساعت‌های مچی و رومیزی، تایمرها و شمارنده‌ها بکار می‌روند. موتورهای پله‌ای تکفاز موجود همه از یک یا دو آهنربای دائمی استفاده می‌کنند، چون آهنرباهای دائمی واقعا برای بالا بردن نسبت گشتاور به توان ورودی در یک موتور کوچک ضروری می‌باشند. در بحث موتورهای پله‌ای تکفاز، باید دو چیز را مورد توجه قرار دهیم: (۱) چگونه روتور را در موقعیت ثابتی به هنگام عدم تحریک کلاف متوقف کنیم؟ (۲) چگونه روتور را در جهتی مطلوب با سوئیچینگ پلاریته مغناطیسی تنها یک کلاف بچرخانیم. یکی از این نوع موتورها، موتور پله‌ای تاریخی 'Cyclonome' نشان داده شده در شکل ۱.۱۱ می‌باشد. این موتور دارای یک قطب گیره^۱ و دو قطب درایو کننده برای دستیابی به یک زاویه پله کوچک می‌باشد، اما با موتورهای چند فازه جایگزین شده است. در اینجا نگاهی به

1- detent pole



شکل ۲.۶۹. یک موتور پله‌ای تک‌فاز.

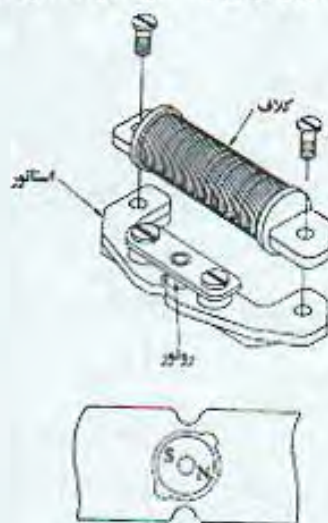


شکل ۲.۷۰. موقعیت‌های گیره و پلاریته کلاف برای چرخاندن موتور

نوعی موتور که امروزه در ابزارهای زمان‌سنجی بکار می‌رود می‌اندازیم. موتور نشان داده شده در شکل (a) ۲.۷۰ دارای یک آهنربای استوانه‌ای بعنوان روتور می‌باشد و این در حالی است که فاصله‌های هوایی در یک جهت باریکتر می‌شوند. روتور چه در شکل (a) یا (b) ۲.۷۰ به حالت سکون یا گیره می‌رسد. موقعیت‌های ثابت از نظر مغناطیسی می‌باشند هستند که قطب‌های مغناطیسی روتور به باریکترین قسمت فاصله‌های هوایی می‌رسند. برای متوقف کردن روتور در موقعیت (a) برای چرخش با زاویه 180° ، کلاف بایستی تحریک شود تا شاری در جهت نشان داده شده در (a) تولید کند، به این علت که پلاریته‌های مغناطیسی آهنربای الکتریکی و آهنربای دائمی در این حالت یکدیگر را دفع می‌کنند. همانطور که در این شکل مشخص است جهت طبیعی چرخش بعلا فاصله‌های هوایی منحصر بفرد ساعتگرد (CW) می‌باشد. اگر کلاف در جهت مخالف با جهت نشان داده شده در (a) تحریک شود، روتور در جهت عکس ساعتگرد با یک زاویه پله کوچک با یک گشتاوری جاذب بین آهنربای دائمی و آهنربای الکتریکی درآید خواهد شد. هنگامیکه تحریک قطع شود روتور به موقعیت گیره قبلی باز خواهد گشت. برای درآید روتور از موقعیت (b) به (a)، تحریک باید بصورت نشان داده شده در (b) داده شود. جهت چرخش در این حالت هم ساعتگرد می‌باشد.

یک موتور پله‌ای بکار رفته در یک ساعت مچی که از این اصل بهره گرفته است در شکل ۲.۷۱ نشان داده شده است. روتور یک دیسک آهنربایی از جنس کمیاب در زمین با قطر حدوداً ۱/۵mm

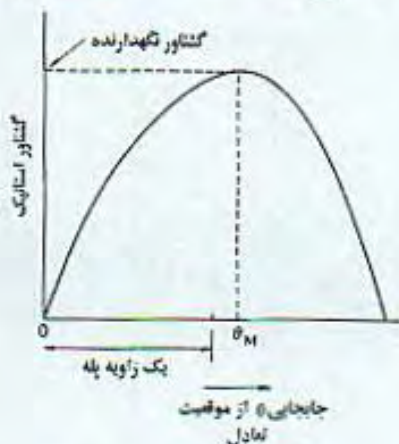
می‌باشد. هسته استاتور در این نمونه در هر دو سر برش داده نشده است. چون دو قسمت باریک به هنگام تحریک کلاف از نظر مغناطیسی اشباع هستند، قسمت بزرگی از شار کلاف تحریک شده از میان روتور عبور خواهد کرد. پتانسیل اعمال شده به کلاف مطابق شکل ۲.۷۲ می‌باشد؛ پهنای پالس به اندازه کوچک هشت میلی ثانیه می‌باشد تا انرژی الکتریکی باتری کوچک داخل ساعت حفظ شود. به منظور تحریک پلاریته صحیح برای از دست ندادن اولین پله به هنگام شروع بکار ساعت بعد از همزمان‌سازی با زمان استاندارد، مداری برای بخاطر سپردن موقعیت روتور و تحریک در پلاریته مناسب بکارگرفته شده است.



شکل ۲.۷۱. یک موتور پله‌ای تکفاز بکار رفته در یک ساعت مچی.



شکل ۲.۷۲. شکل موج ولتاژ اعمال شده به یک موتور پله‌ای ساعت.



شکل ۲.۷۳. مشخصه‌های T/θ .

۲.۶ ویژگی مشخصه‌های موتور پله‌ای

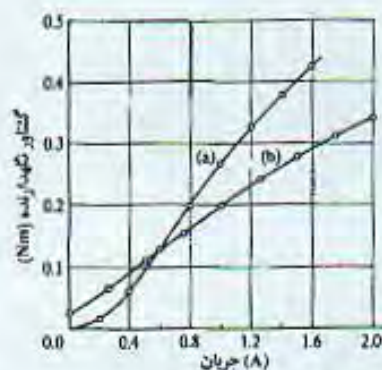
در این بخش، اصطلاحات فنی بکار رفته در تعیین مشخصه‌های یک موتور پله‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۲.۶.۱ مشخصه‌های استاتیک

مشخصه‌های مربوط به موتورهای ساکن مشخصه‌های استاتیک خوانده می‌شوند.

(۱) مشخصه‌های T/θ : موتور پله‌ای ابتدا با تغذیه جریان در یک روش تحریک مشخص، مثلاً، تحریک تک‌فاز یا دو فاز در یک موقعیت سکون (تعادل) باقی می‌ماند. اگر گشتاوری خارجی به محور اعمال شود، یک جابجایی زاویه‌ای انجام می‌گیرد. رابطه بین گشتاور خارجی و جابجایی را می‌توان بشکل ۲.۷۳ رسم کرد. این منحنی معمولاً منحنی مشخصه T/θ نامیده می‌شود، و ماکزیمم گشتاور استاتیکی بصورت 'گشتاور نگهدارنده' خوانده می‌شود که در شکل ۲.۷۳ در $\theta = \theta_M$ واقع می‌شود. در جابجایی‌های بزرگتر از θ_M ، گشتاور استاتیک در جهت مایل به موقعیت تعادل اولیه عمل نمی‌کند، بلکه در جهت مخالف به سمت موقعیت تعادل بعدی عمل می‌کند. گشتاور نگهدارنده بندرت بصورت 'گشتاور استاتیک ماکزیممی' که می‌توان به محور یک موتور تحریک شده بدون بروز حرکت پیوسته اعمال کرد تعریف می‌شود. زاویه‌ای که در آن گشتاور نگهدارنده تولید می‌شود همیشه از نقطه تعادل بیش از یک زاویه پله دورتر نیست.

(۲) مشخصه‌های T/I : گشتاور نگهدارنده جریان را افزایش می‌دهد، و این رابطه معمولاً مشخصه‌های T/I خوانده می‌شود. شکل ۲.۷۴ مشخصه‌های T/I یک موتور هیبرید نمونه را با یک موتور VR مقایسه می‌کند، زاویه پله هر دو $1/8^\circ$ می‌باشد. گشتاور استاتیک ماکزیمم ظاهر شده در موتور هیبرید بدون جریان، همانطور که در بخش ۲.۲.۲ تعریف شد گشتاور گیره می‌باشد.



شکل ۲.۷۴. مثال‌هایی از مشخصه‌های T/I : (a) موتور VR چهار فاز $1/8^\circ$ و (b) موتور هیبرید دو فاز $1/8^\circ$.

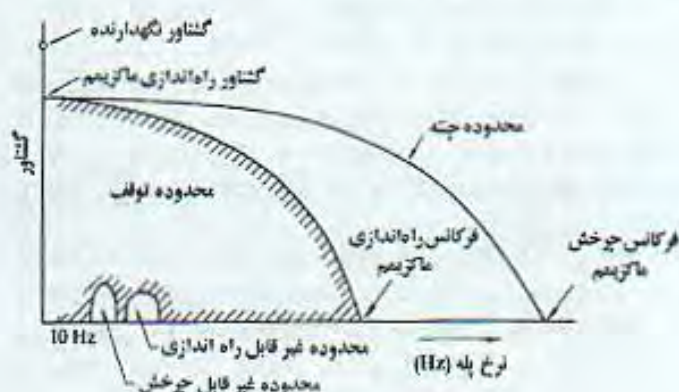
در مورد جزئیات اندازه‌گیری گشتاورها و جابجایی‌ها به مرجع [16] مراجعه کنید.

۲.۶.۲ مشخصه‌های دینامیک

مشخصه‌های مربوط به موتورهایی که در حال حرکت یا در آستانه حرکت می‌باشند مشخصه‌های دینامیک خوانده می‌شوند.

(۱) مشخصه‌های گشتاور توقف^۱: این مشخصه‌ها به نام مشخصه‌های راه‌اندازی نیز خوانده می‌شوند و به محدوده‌ای از گشتاور بار اصطکاکی اشاره دارند که در آن موتور می‌تواند بدون از دست دادن پله‌ها به ازای فرکانس‌های مختلف در یک قطار پله راه‌اندازی و متوقف شود. تعداد پالس‌ها در قطار پله مورد استفاده در آزمایش ۱۰۰ یا بیشتر است. دلیل اینکه چرا کلمه 'محدوده' در اینجا بجای 'ماکزیمم' بکار رفته این است که موتور قادر به شروع یا حفظ یک چرخش نرمال در بارهای اصطکاکی کوچک در محدوده‌های فرکانس خاصی نمی‌باشد، همانطور که در شکل ۲.۷۵ نشان داده شده است. هنگامیکه گشتاور توقف اندازه‌گیری و یا مطالعه می‌شود، همچنین لازم است مدار درایو، روش اندازه‌گیری، روش تزویج، و اینرسی تزویج شونده با محور بدقت مشخص شوند.

(۲) مشخصه‌های گشتاور چنته^۲: این مشخصه‌ها به نام مشخصه‌های چرخشی نیز خوانده می‌شوند. بعد از اینکه موتور تست توسط یک درایو مشخص با روش تحریک مشخص در محدوده خود راه‌اندازی به راه‌انداخته شد، فرکانس پالس بتدریج افزایش می‌یابد؛ موتور نهایتاً از حالت سنکرون در می‌آید. رابطه بین گشتاور بار اصطکاکی و فرکانس پالس ماکزیمم که موتور می‌تواند با آن سنکرون شود و مشخصه چنته نامیده می‌شود (شکل ۲.۷۵). منحنی چنته تأثیر زیادی از مدار درایو، تزویج، ابزارهای اندازه‌گیری، و دیگر شرایط می‌پذیرد.



شکل ۲.۷۵ مشخصه‌های دینامیک

- (۳) فرکانس راه‌اندازی ماکزیمم. این فرکانس بصورت فرکانس کنترل ماکزیمم که در آن موتور بدون بار می‌تواند بدون از دست دادن پله‌ها راه‌اندازی و متوقف شود تعریف می‌شود.
- (۴) نرخ چنته ماکزیمم. این نرخ بصورت فرکانس ماکزیمم (نرخ پله) که در آن موتور بدون بار می‌تواند بدون از دست دادن پله‌ها کار کند تعریف می‌شود، و 'فرکانس چرخشی' ماکزیمم هم خوانده می‌شود.
- (۵) گشتاور راه‌اندازی ماکزیمم. 'گشتاور توقف ماکزیمم' هم نامیده می‌شود و بصورت گشتاور بار اصطلاحاً ماکزیمم که در آن موتور می‌تواند شروع بکار کرده و با یک قطار پله با فرکانس پایین 10 Hz سنکرون شود تعریف می‌شود.
- برای مطالعه بیشتر موتورهای پله‌ای از دیدگاههای متفاوت، مراجع [1]، [17] توصیه می‌شوند.

مراجع فصل ۲

- [1] Acarnley, P. P. (1992). *Stepping motors: a guide to modern theory and practice* (revised 3rd edn), p. 11. Peter Peregrinus, London.
- [2] Pawletko, J. P. and Chai, H. D. (1976). Three-phase variable-reluctance step motor with bifilar winding. *Proc. Fifth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. F1-F8.
- [3] Feiertag, K. M. and Donahoo, J. T. (1952). Dynamoelectric machine. United States Patent No. 2,589,999.
- [4] Heine, G. (1975). Five-phase stepping motor. United States Patent No. 3,866,104.
- [5] Heine, G. (1977). Control methodology of 5-phase PM stepping motors. *Proc. Sixth Annual Symposium on Increment Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. 313-30.
- [6] Oudet, C. and Stcherbatcheff, G. (1969). Utilisation d'aimants minces dans des micromoteurs. *Compte-rendus à l'Academie des Sciences* 269, (4), 256-9.
- [7] Oudet, C. (1981). A new family of multipolar P.M. stepper motors. *Proc. Tenth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Incremental Motion Control Systems Society, Champaign, Illinois. pp. 337-51.
- [8] Niimura, Y. (1974). Outer-rotor-type stepping motor. *Proc. Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. H1-H10.
- [9] Pawletko, J. P. (1976). Dynamic responses and control aspects of linear stepping motors. *Proc. Fifth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. P1-P17.

- [10] Hinds, W. E. and Nocito, B. (1974). The Sawyer linear motor. *Proc. Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. W1-10.
- [11] Langley, L. W. and Kidd, H. K. (1979). Closed-loop operation of a linear stepping motor under microprocessor control. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds, England. pp. 32-6.
- [12] Kenjo, T. and Takahashi, H. (1979). Speed ripple characteristics of hybrid stepping motors driven in the ministepped mode. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds, England. pp. 87-93.
- [13] Oudet, C. (1979). Synchronous motor structure with plurality of stator pole members coupled to each coil and forming separate elementary magnetic circuits in radial direction. United States Patent No. 4,330,727.
- [14] Patterson, M. L. and Haselby, R. D. (1977). A microstepped XY controller with adjustable phase current waveforms. *Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois. pp. 163-8.
- [15] Patterson, M. L. (1977). Analysis and correction of torque harmonics in permanent-magnet step motors. *Ibid.* pp. 25-37.
- [16] Kuo, B. C. (1979). *Step motors and control systems*, Chapter 6. SRL Publishing Co., Champaign, Illinois.
- [17] Leenhouts, A. C. (1987). *The art and practice of step motor control*. Intertech Communications, Ventura, California.

تئوری الکترومغناطیس و ساختار موتورهای پله‌ای

در فصل ۲ از دیدی کیفی برای توضیح چگونگی تولید گشتاور در یک موتور پله‌ای بهره گرفته شد؛ توضیحاتی با استفاده از کشش خطوط میدان مغناطیسی. در این فصل مکانیزم تولید گشتاور از نظر کمی با استفاده از دید الکترودینامیک تحلیل خواهد شد. بدنبال آن بحث در مورد مسائل ساختار دندانه در موتورهای پله‌ای مطرح می‌شود.

نمادهای اصلی بکار رفته در این فصل و فصل بعدی در جدول ۳.۱ نشان داده شده‌اند.

۳.۱ مکانیزم تولید گشتاور استاتیک در یک موتور پله‌ای VR

راههای مختلفی برای بیان گشتاور ایجاد شده در موتور الکتریکی وجود دارد. توضیحات کیفی داده شده در فصل ۲ با صورتی از تئوری استرس کششی ماکسول^۱ همراه می‌باشد. اما این دید، که اساساً یک تئوری میدانی است، همواره برای بحث در مورد موتورهای پله‌ای بر حسب پارامترهای مدار مناسب نمی‌باشد. در این فصل، در عوض، یک تئوری بر حسب انرژی و کوانرژی^۲ مغناطیسی ارائه می‌شود. با حالت ایده‌آل که هسته‌های روتور و استاتور قابلیت گذردهی بینهایت دارند شروع خواهیم کرد، و قدم به قدم تا حالتی که هسته‌ها در معرض اشباع مغناطیسی هستند پیش خواهیم رفت.

۳.۱.۱ حالت هسته‌های با قابلیت گذردهی بینهایت

برای تحلیل اشباع یک قطعه آهن رانده شده به درون یک میدان مغناطیسی حاصل از یک آهنربای الکتریکی مطابق با شکل ۳.۱، از مدل شکل ۳.۲ استفاده می‌کنیم. یک جریان I از کلاف n دوری می‌گذرد تا شار مغناطیسی حاصل شود، و یک نیرو f در قطعه آهنی در جهت x اعمال شود. قطعه آهنی را می‌توان بعنوان دندانه روتور یک موتور پله‌ای در نظر گرفت، و آهنربای الکتریکی متناظر با یک جفت دندانه استاتور در یک موتور VR می‌باشد. ابتدا چگالی شار مغناطیسی B_g در فاصله‌های هوایی را تعیین می‌کنیم (که فضاهای نشان داده شده با $g/2$ در شکل می‌باشند). قانون مداری آمپر در حلقه بسته نقطه چین اینطور بیان می‌شود

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = nI. \quad (3.1)$$

1- Maxwell stress tensor

2- coenergy

جدول ۳.۱. نمادهای اصلی بکار رفته در فصل ۳ و ۴

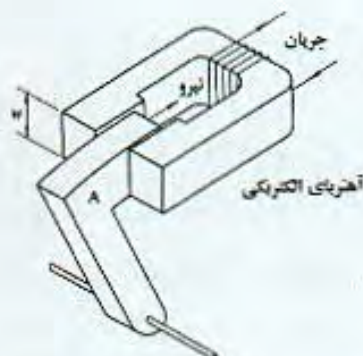
B	چگالی شار مغناطیسی: B چگالی شار در فاصله هوایی؛ B_s سطح اشباع چگالی شار (T)
C	ثابتی که از روی ابعاد موتور و تعداد دورها تعیین می‌شود ($V \cdot s \cdot rad^{-1}$, $N \cdot m \cdot A^{-1} \cdot rad^{-1}$)
D	ضریب اصطکاک چسبندگی ($N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$)
d	عمق دندانه (m)
E_m	$K_T I_a N_r$ به رابطه (۴.۹۲) مراجعه کنید
e	نیروی محرکه الکتریکی (V)
f	نیروی (N)
g	طول فاصله هوایی (m)
H	شدت میدان مغناطیسی: H_g شدت میدان در فاصله هوایی ($A \cdot m^{-1}$)
iJ	جریان (A)
J	ممان اینرسی ($kg \cdot m^2$) نسبت اینرسی بدون دیمانسیون، به رابطه (۴.۹۹) مراجعه کنید
k_p, k_v	ثابت‌های موتور، برتریب رابطه‌های (۴.۲۳) و (۴.۳۹) نگاه کنید
K_T	ثابت گشتاور ($N \cdot m \cdot A^{-1} \cdot rad^{-1}$)
L	خود القایی (H)
m	تعداد فازها
M	اندوکتانس متقابل (H)
n	تعداد دورها
N_r	تعداد دندانه‌های روتور
N_s	تعداد دندانه‌های استاتور
P	تعداد جفت قطب‌ها
q	تعداد دندانه‌های استاتور در فاز
r, R	مقاومت (Ω)
s	اپراتور لاپلاس d/dt (s^{-1})
S	تعداد پله بر دور (rad^{-1})
T	گشتاور: T_m گشتاور چنته T_{af} گشتاور استاتیک، ماکزیمم
t	زمان
v, V	ولتاژ (V)
w	عرض دندانه (m)
W_m	انرژی مغناطیسی (J)
x	جابجایی در جهت $-x$ ، طول ناحیه همپوشانی (m)
α	ثابت زمانی (s)
β	ثابت زمانی (s)
δ, Δ	انحراف (بدون دیمانسیون)
ξ	نسبت میرایی (بدون دیمانسیون)
θ, Θ	زاویه دندانه (rad)
λ	گام دندانه (rad)
μ	قابلیت گذر دهی: μ قابلیت گذر دهی در فاصله هوایی (H/m)
ξ	زاویه چرخشی بر حسب زاویه الکتریکی (rad)
r	زاویه گشتاور (rad)
t	گشتاور (N m)
ϕ, Φ	شار مغناطیسی ($T \cdot m^2$)

ادامه جدول ۳.۱

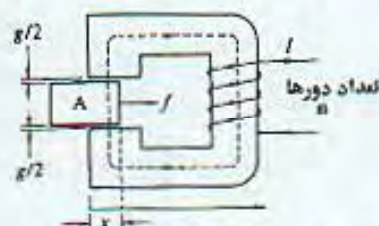
ψ, Ψ	شارشنی ($T \cdot m^2$)
ω, Ω	سرعت زاویه‌ای (s^{-1}) (rad)
ω_n	فرکانس طبیعی (s^{-1})
$d/dt (s^{-1})$.

توجه (۱) متغیرهای با حروف کوچک توابع زمان هستند.

(۲) متغیرهای تابع کلاً حروف بزرگ نشان داده شده‌اند.

 (۳) T و τ برای گشتاور یک‌بار رفته‌اند.


شکل ۳.۱. قطعه آهنی جذب شده توسط یک آهنربای الکتریکی.



شکل ۳.۲. مدلی برای یک موتور پله‌ای.

سمت راست این معادله را باز می‌توان اینطور نوشت

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_g \left(\frac{g}{2} \right) + H_g \left(\frac{g}{2} \right) + H_i l = H_g g + H_i l \quad (3.2)$$

 که در آن H_g = شدت میدان مغناطیسی در فاصله‌های هوایی،

 H_i = شدت میدان مغناطیسی در هسته‌ها،

 l = مجموع مسیر مغناطیسی در هسته‌ها،

می‌باشد.

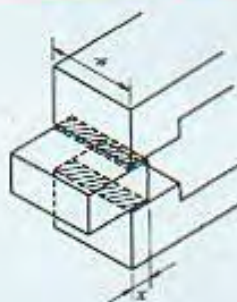
 وقتی که قابلیت گذردهی هسته خیلی بزرگ باشد، H_i چنان کوچک است که اجازه داریم

 $H_i = 0$ قرار دهیم. اگر $H_i = 0$ و قابلیت گذردهی هسته μ بینهایت باشد، یک خلاء فیزیکی حاصل

 می‌شود. یعنی در هسته‌ها $B = \mu H_i = \infty$ از اینرو H_g از این رابطه بدست می‌آید

$$H_g = nI/g. \quad (3.3)$$

چگالی شار فاصله هوایی برابر است با



شکل ۳.۳. ناحیه همپوشانی.

$$B_g = \mu_o n I / g. \quad (3.4)$$

که μ_o قابلیت گذردگی در طول فاصله هوایی می‌باشد. عرض قطعه آهنی را w و فاصله‌ای که دندانه روتور و قطعه آهنی در کنار هم قرار می‌گیرند را x قرار دهید (شکل ۳.۳). اکنون مساحت همپوشانی xw می‌باشد. B_g در رابطه (۳.۴) ضربدر مساحت همپوشانی برابر با شار مغناطیسی می‌شود:

$$\phi = xw\mu_o n I / g. \quad (3.5)$$

از اینرو شار ناشی Ψ از این رابطه بدست می‌آید

$$\Psi = n\phi = xw\mu_o n^2 I / g. \quad (3.6)$$

حال فرض می‌کنیم که دندانه دارای یک جابجایی نموی Δx ، در مدت زمان Δt مطابق با شکل ۳.۴ می‌باشد. افزایش در شار ناشی، $\Delta\Psi$ ، برابر است با

$$\Delta\Psi = \frac{w\mu_o n^2 I}{g} \Delta x. \quad (3.7)$$

e.m.f. القایی در کلاف‌ها بر حسب تغییر در شار ناشی برابر است با

$$e = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = - \frac{w\mu_o n^2 I}{g} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.8)$$

علامت منفی در این رابطه نشان می‌دهد که جهت e.m.f. در خلاف جهت جریان می‌باشد. چون جریان I توسط منبع تغذیه بمدت Δt برای غلبه بر e.m.f. در خلاف جهت تامین می‌شود، کار انجام شده توسط منبع ΔP_i برابر است با

$$\Delta P_i = I |e| \Delta t = \frac{w\mu_o n^2 I^2}{g} \Delta x. \quad (3.9)$$

مقاومت کلاف در اینجا برای سهولت تحلیل صفر فرض می‌شود. با استفاده از رابطه (۳.۴)، ΔP_i بر حسب B_g اینطور بیان می‌شود:

$$\Delta P_i = \frac{Bg}{\mu_o} gw \Delta x. \quad (3.10)$$

کار انجام شده توسط منبع تا اندازه‌ای به کار مکانیکی تبدیل می‌شود، و مابقی برای افزایش انرژی میدان مغناطیسی در فاصله‌های هوایی مصرف می‌شود. افزایش در انرژی میدانی فاصله هوایی برابر است با

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_o} \times (\text{میزان افزایش در فاصله هوایی}) \quad (3.11) \\ &= \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_o} gw \Delta x. \end{aligned}$$

از مشاهده رابطه‌های (۳.۱۰) و (۳.۱۱) می‌توان دریافت که نیمی از ΔP_i به انرژی میدان مغناطیسی در فاصله‌های هوایی تبدیل می‌شود. در نتیجه اجازه داریم بگوییم که نیم دیگر ΔP_i به کار مکانیکی تبدیل می‌شود. چون کار مکانیکی برابر با نیرو f ضربدر جابجایی Δx می‌باشد، بدست می‌آوریم

$$f \Delta x = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_o} gw \Delta x. \quad (3.12)$$

با حذف Δx از هر دو طرف

$$f = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_o} gw, \quad (3.13)$$

که، با استفاده از رابطه (۳.۴)، بشکل زیر در می‌آید

$$f = \frac{1}{2} \frac{w \mu_o n^2 I^2}{g}. \quad (3.14)$$

از طرف دیگر، انرژی مغناطیسی W_m در فاصله هوایی برابر است با

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_o} gxw. \quad (3.15)$$

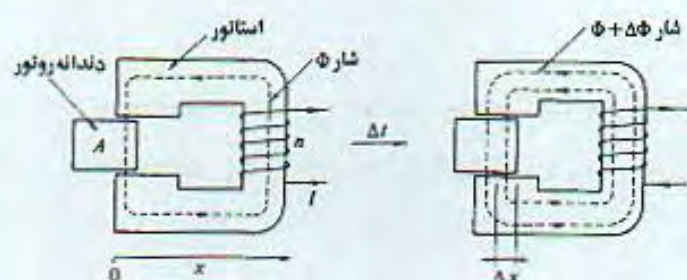
از رابطه‌های (۳.۱۳) و (۳.۱۵) رابطه زیر استخراج می‌شود

$$f = \frac{dW_m}{dx}. \quad (3.16)$$

بهرحال، باید به این فرض توجه کرد که جریان I در طول جابجایی ثابت نگه داشته می‌شود. از اینرو رابطه (۳.۱۶) باید به شکل پیچیده‌تری توصیف شود

$$f = \left[\frac{\partial W_m}{\partial x} \right]_{I=\text{const}} \quad (3.17)$$

این رابطه برای حالت کلی که مقاومت کلاف صفر نیست صادق است. از طرف دیگر، اگر از مدلی که شار آن در طول جابجایی ثابت است استفاده کنیم،^[۱] به این رابطه می‌رسیم



شکل ۳.۴. یک دندانه روتور توسط یک میدان مغناطیسی کشیده شده است و به اندازه Δx در بازه زمانی Δt جابجا می‌شود.

$$f = - \left[\frac{\partial W_m}{\partial x} \right]_{\Phi = \text{const}} \quad (3.18)$$

در رابطه با موتورهای پله‌ای، رابطه (۳.۱۷) مفیدتر از رابطه (۳.۱۸) می‌باشد.

۳.۱.۲ حالت با قابلیت گذردهی ثابت

در مدل با هسته‌های با قابلیت گذردهی بینهایت، میدان مغناطیسی تنها در فاصله‌های هوایی مشاهده می‌شود، و بحث ریاضی آن ساده است. از طرف دیگر، وقتی هسته‌ها دارای قابلیت گذردهی محدود باشند، انرژی مغناطیسی نه تنها در فاصله‌های هوایی، بلکه در هسته‌ها و فضاها غیر از فاصله‌های هوایی نیز ظاهر می‌شود. تحلیل چنان شرایطی از طریق نظریه میدان الکترومغناطیسی آسان نیست. در عوض رابطه‌ای برای نیرو بر حسب پارامترهای مدار بدست خواهیم آورد با این فرض که قابلیت‌های گذردهی توابعی از میدان مغناطیسی نیستند. اگر اندوکتانس کلاف در مدل شکل ۳.۳، L باشد، شار ناشی Ψ از رابطه زیر بدست می‌آید

$$\Psi = LI. \quad (3.19)$$

انرژی مغناطیسی W_m در سیستم اینطور بیان می‌شود

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2. \quad (3.20)$$

اگر قطعه آهنی به اندازه Δx در بازه زمانی Δt جابجا شود، اندوکتانس L به اندازه ΔL افزایش خواهد یافت. e.m.f. القا شده در کلاف برابر است با

$$e = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} = - \frac{\Delta (LI)}{\Delta t}. \quad (3.21)$$

اگر منبع تغذیه یک منبع جریان باشد و جریان I را در مدت جابجایی تأمین کند، رابطه (۳.۲۱) اینطور ساده می‌شود

$$e = - \frac{\Delta L}{\Delta t}. \quad (3.22)$$

چون ولتاژ منبع با عکس - e.m.f. رابطه (۳.۲۲) برابر ولی با علامت عکس می‌باشد، کار ΔP_i انجام شده توسط منبع در مدار برابر است با

$$\Delta P_i = I |e| \Delta t = I^2 \Delta L. \quad (3.23)$$

از طرف دیگر، افزایش در انرژی مغناطیسی ΔW_m برابر است با

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} I^2 \Delta L. \quad (3.24)$$

از مقایسه رابطه‌های (۳.۲۳) و (۳.۲۴)، معلوم می‌شود که نیمی از کار انجام شده در مدار توسط منبع به انرژی مغناطیسی تبدیل می‌شود. از اینرو معلوم است که نیم دیگر به کار مکانیکی ΔP_o تبدیل می‌شود:

$$\Delta P_o = f \Delta x = \frac{1}{2} I^2 \Delta L. \quad (3.25)$$

پس نیرو برابر است با

$$f = \frac{1}{2} I^2 \frac{\Delta L}{\Delta x}. \quad (3.26)$$

در مراحل بالا فرض بر این بود که مقاومت کلاف صفر است و منبع تغذیه یک منبع جریان می‌باشد. اما رابطه (۳.۲۶) را می‌توان برای حالات کلی اعمال کرد. از اینرو نیروی بوجود آمده در قطعه آهنی در جهتی است که اندوکتانس را افزایش یا رلوکتانس را کاهش دهد.

۳.۱.۳ بحث در مورد اشباع مغناطیسی

در اکثر موتورهای پله‌ای هسته‌ها در معرض اشباع قرار دارند. اگر موتوری برای کار در ناحیه خطی مشخصه B/H طراحی شده باشد، گشتاور تولید شده بر واحد حجم آنقدر کوچک است که موتور برای کار در کاربردهای عملی خیلی بزرگ می‌باشد. به این دلیل، تئوری که هیچ اشباعی را در

نظر نگیرد غیر عملی است. در این قسمت تئوری کلی درباره گشتاور بمنظور بررسی اشباع مغناطیسی در هسته‌ها ارائه می‌شود.

دوباره با استفاده از مدل شکل ۳.۳ تبدیل انرژی را تحلیل می‌کنیم. قطعه آهنی یا دندانه بوسیله نیروی ناشی از میدان مغناطیسی القا شده توسط جریان کلاف کشیده می‌شود، و از x_0 به $x_0 + \Delta x$ در مدت زمان Δt حرکت می‌کند. شار درون‌نشتی ψ^1 در این حالت تابعی از موقعیت x و جریان i می‌باشد، و با $\psi(x, i)$ نشان داده می‌شود. در تحلیل این مورد متغیرها با حروف کوچک ψ, i نشان داده می‌شوند. اگر جریان i در طی جابجایی در مقدار I نگه داشته شود، کار ΔP_i انجام شده توسط منبع تغذیه در بازه زمانی Δt برابر است با

$$\Delta P_i = I v \Delta t = I \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} \Delta t = I \Delta \Psi. \quad (3.27)$$

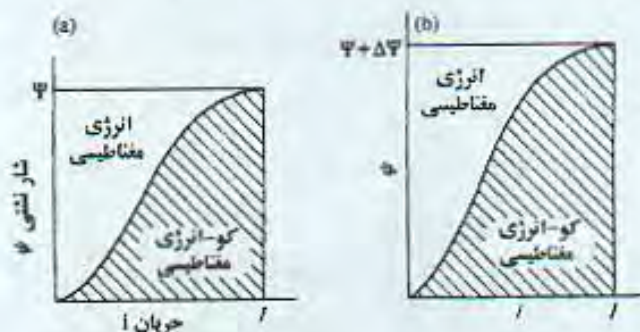
از طرف دیگر کار مکانیکی انجام شده روی قطعه آهنی در بازه زمانی Δt برابر است با

$$\Delta P_o = f \Delta x. \quad (3.28)$$

افزایش در انرژی مغناطیسی سیستم در طی جابجایی Δx اینطور بیان می‌شود

$$\Delta W_m = \int_0^{\Psi + \Delta \Psi} i d\psi(x_0 + \Delta x, i) - \int_0^{\Psi} i d\psi(x_0, i). \quad (3.29)$$

در این رابطه جریان i بعنوان متغیری که با تغییر ψ از ۰ تا مقدار نهایی $\Psi + \Delta \Psi$ با Ψ از ۰ تا I تغییر می‌کند در نظر گرفته می‌شود. تفسیر فیزیکی هر عبارت سمت راست به اینصورت می‌باشد: جمله اول: انرژی مغناطیسی سیستمی که در آن قطعه آهنی در $x = x_0 + \Delta x$ قرار گرفته است. انتگرال باید نسبت به ψ از ۰ تا $\Psi + \Delta \Psi$ ، با x ثابت در $x_0 + \Delta x$ گرفته شود. (شکل ۳.۵(b))



شکل ۳.۵. انرژی و کو-انرژی مغناطیسی در دو موقعیت متفاوت: (a) در $x = x_0 + \Delta x$ (b) در $x = x_0$

جمله دوم: انرژی مغناطیسی سیستمی که در آن قطعه آهنی در $x=x_0$ قرار گرفته است. انتگرال باید نسبت به ψ از Ψ تا $\Psi + \Delta\Psi$ با x ثابت در x_0 گرفته شود. (شکل ۳.۵(a))

جمله اول:

$$\int_0^{\Psi+\Delta\Psi} i d\psi = [i\psi]_0^{\Psi+\Delta\Psi} - \int_0^{\Psi} \psi(x_0 + \Delta x, i) di \quad (3.30)$$

$$= I(\Psi + \Delta\Psi) - \int_0^{\Psi} \psi(x_0 + \Delta x, i) di$$

جمله دوم:

$$\int_0^{\Psi} i d\psi = I\Psi - \int_0^{\Psi} \psi(x_0, i) di. \quad (3.31)$$

جملات دوم در سمت راست دو رابطه به شکل کو-انرژی مغناطیسی می‌باشند (شکل ۳.۵). با قرار دادن این عبارات در رابطه (۳.۲۹) بدست می‌آوریم

$$\Delta W_m = I\Delta\Psi - \left\{ \int_0^{\Psi} \psi(x_0 + \Delta x, i) di - \int_0^{\Psi} \psi(x_0, i) di \right\}. \quad (3.32)$$

چون عبارت دوم تغییر کو-انرژی مغناطیسی در جابجایی روتور Δx می‌باشد، رابطه (۳.۳۲) را اینطور هم می‌توان نوشت

$$\Delta W_m = I\Delta\Psi - \Delta \int_0^{\Psi} \psi(x, i) di \quad (3.33)$$

چون عبارت اول سمت راست کار انجام شده توسط منبع تغذیه مطابق با رابطه (۳.۲۷) می‌باشد، می‌توان رابطه (۳.۳۳) را اینطور بازنویسی کرد:

$$\Delta P_i = \Delta W_m + \Delta \int_0^{\Psi} \psi(x, i) di. \quad (3.34)$$

از طرف دیگر داریم

$$\Delta P_i = \Delta W_m + \Delta P_o. \quad (3.35)$$

از مقایسه روابط (۳.۳۴) و (۳.۳۵) رابطه زیر را برای کار مکانیکی ΔP_o بدست می‌آوریم

$$\Delta P_o = f\Delta x = \Delta \int_0^{\Psi} \psi(x, i) di, \quad (3.36)$$

که از روی آن به رابطه نیرو می‌رسیم

$$f = \frac{\partial \int_0^{\Psi} \psi(x, i) di}{\partial x} = \left(\frac{\partial (\text{کو-انرژی مغناطیسی})}{\partial x} \right)_{I=\text{const}}, \quad (3.37)$$

رابطه متناظر گشتاور برابر است با

$$f = \frac{\partial \int_0^i \psi(\theta, i) di}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial (\text{کو-انرژی مغناطیسی})}{\partial \theta} \right)_{f=\text{const}} \quad (3.38)$$

که در آن θ موقعیت زاویه‌ای روتور می‌باشد.

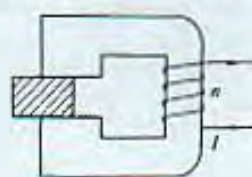
این روابط اساسی برای محاسبه نیرو و گشتاور تولید شده در موتورهای پله‌ای به هنگام تاثیر اشباع مغناطیسی روی مشخصه‌های ماشین ضروری می‌باشند. وقتی سیستمی n کلاف داشته باشد رابطه گشتاور اینطور بیان می‌شود

$$T = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{j=1}^n \int_0^{I_j} \psi(\theta, i_j) di_j \quad (3.39)$$

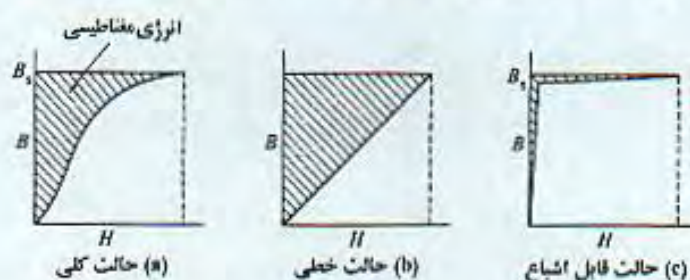
۳.۱.۴ اثر اشباع در بهبود بهره

یکی از آثار اشباع را با استفاده از مدل شکل ۳.۶ مورد بررسی قرار می‌دهیم. یکی از ویژگی‌های این مدل این است که اندازه فاصله‌های خیلی کوچک است و امکان قرار دادن $g=0$ برای تقریب در تحلیل وجود دارد. ویژگی دیگر این است که قطعه آهنی دارای مشخصه B/H مستطیلی می‌باشد: سطح اشباع با B_s نشان داده می‌شود. فرض می‌شود که متوسط قابلیت‌های گذردهی ($=B_s/H$) خیلی بزرگتر از قابلیت گذردهی فاصله هوایی μ_0 و خیلی کوچکتر از قابلیت گذردهی هسته استاتور می‌باشند:

$$\mu_0 < \frac{B_s}{H} < \text{قابلیت گذردهی هسته استاتور} \quad (3.40)$$



شکل ۳.۶. مدلی برای فاصله هوایی قابل صرف نظر و دندانهای مستطیلی شکل از مواد قابل اشباع.



شکل ۳.۷. انرژی مغناطیسی بر واحد حجم برابر با ناحیه هاشور زده می‌باشد.

تحت این شرایط انرژی مغناطیسی ذخیره شده در سیستم چنان کوچک است که کار انجام شده توسط منبع تقریباً بطور کلی به کار مکانیکی تبدیل می‌شود، که در زیر توضیح داده می‌شود.

در جایی که قابلیت گذردهی μ ثابت است انرژی مغناطیسی ذخیره شده بر واحد حجم برابر است با $B^2/2\mu$ ابتدا معلوم می‌شود که انرژی مغناطیسی در هسته استاتور اندک است، حجم فاصله هوایی چنان کم است که انرژی مغناطیسی در این ناحیه هم اندک می‌باشد. مساله بعدی تخمین انرژی مغناطیسی در قطعه آهنی کشیده شده توسط میدان مغناطیسی می‌باشد. فرض می‌شود که جنس قطعه آهنی دارای مشخصه B/H مستطیلی غیر خطی می‌باشد. انرژی مغناطیسی در واحد حجم معمولاً با $\int_0^B HdB$ بیان می‌شود، و مقدار این انتگرال برابر با ناحیه هاشور زده در نمودارهای شکل ۳.۷ می‌باشد. منحنی ۳.۷(a) رابطه عمومی B/H را نشان می‌دهد. برای یک رابطه خطی B/H مطابق با نمودار (b) ناحیه‌ها هاشور زده بوضوح برابر است با $B^2/2\mu$ یا $(1/2)HB$. اما برای مشخصه قابل اشباع نمودار (c) ناحیه هاشور زده بسیار کوچک می‌باشد، که به این معنی است که انرژی مغناطیسی کمی در فضا ذخیره شده است.

حال با توجه به مطالب بالا چگونگی تبدیل انرژی الکتریکی به کار مکانیکی را بررسی می‌کنیم. شار ϕ در ناحیه‌ای که هسته استاتور و قطعه آهنی همپوشانی دارند از رابطه زیر بدست می‌آید

$$\phi = B_s x w. \quad (3.41)$$

شار ناشی از w برابر است با

$$\psi = n B_s x w. \quad (3.42)$$

از اینرو e.m.f. القایی در حرکت روتور برابر است با

$$-e = n B_s w \frac{dx}{dt}. \quad (3.43)$$

کار انجام شده توسط منبع جریان در واحد زمان، یا توان الکتریکی، برابر است با

$$-eI = In B_s w \frac{dx}{dt}. \quad (3.44)$$

همانطور که قبلاً مشاهده شد، این کار به انرژی مغناطیسی و کار مکانیکی تبدیل می‌شود. بهر حال، چون انرژی ذخیره شده در این حالت قابل صرفنظر می‌باشد، توان الکتریکی اکثراً به توان خروجی مکانیکی تبدیل خواهد شد. کار مکانیکی انجام شده روی قطعه آهنی برابر است با نیروی f ضربدر سرعت dx/dt ؛ در نتیجه بدست می‌آید

$$f \frac{dx}{dt} = \ln B_s w \frac{dx}{dt} \quad (3.45)$$

از اینرو

$$f = \ln B_s w. \quad (3.46)$$

باید توجه کرد که هنگامیکه رابطه B/H خطی است و مقدار نهایی چگالی شار B_s می‌باشد، نیرو اینطور بیان می‌شود

$$f = \frac{1}{2} \ln B_s w. \quad (3.47)$$

همچنین می‌توانیم رابطه (۳.۴۶) را از مفهوم کو-انرژی مغناطیسی بدست آوریم، با توجه به اینکه کو-انرژی بر واحد حجم در قطعه آهنی $\int_0^B B dH = B_s H$ و کو-انرژی در مابقی قابل صرف‌نظر است.

با مقایسه روابط (۳.۴۶) و (۳.۴۷) می‌توان ادعا کرد که گشتاور بوجود آمده در یک موتور پله‌ای با روتوری از فولاد قابل اشباع دو برابر بیشتر از گشتاور تولید شده در موتوری از موادی با مشخصه B/H خطی می‌باشد. برای تحقق این گشتاور، طول فاصله هوایی باید تا حد ممکن کوتاه باشد تا انرژی مغناطیسی ذخیره شده در آن به حداقل برسد. هنگامیکه طول فاصله هوایی صفر نیست، ضریب کمتر از دو است. Byrne^[2] نتیجه مشابهی در تحلیل نیروی بوجود آمده بین دو دندانه‌ای که تا حدی همپوشانی دارند گرفت، Lawrenson و همکارانش^[3] برخی نتایج تجربی را نشان دادند که مشخص می‌کردند نیروی وارد بر قطعه آهنی بشدت اشباع شده در مدل‌های مشابه به شکل ۳۶ بیشتر از نیروی محاسبه شده برای منحنی مشخصه‌های خطی B/H می‌باشد.

بعلاوه، تلف الکتریکی در رسانا با استفاده از فولاد قابل اشباع در روتور کاهش می‌یابد، که این مورد در زیر توضیح داده می‌شود. مقاومت کلاف در تحلیل‌های قبلی برای سادگی در بدست آوردن روابط گشتاور و نیرو صفر فرض شد. هنگامیکه تلف ژول را بررسی می‌کنیم، مقاومت سیم پیچی باید مورد توجه قرار گیرد. در یک سیستم موتور پله‌ای با عملکرد نرمال، انرژی مغناطیسی در هر فاز از سیم پیچی‌ها بین موتور و منبع تغذیه ردوبدل می‌شود. در برخی درایوها، انرژی مغناطیسی در طی پریود خاموش ترانزیستور اصلی به هنگام قطع جریان تحریک بواسطه مدار حذف‌کننده به صورت تلف رسانایی از بین می‌رود. در برخی مدارات، انرژی مغناطیسی از طریق دیودهای

فیدبک^۱ به منبع تغذیه باز می‌گردد (شکل‌های ۴.۲۸ و ۴.۳۰)؛ اما قسمتی از انرژی مغناطیسی بصورت گرمای ژول در مقاومت سیم‌پیچی و دیگر قسمت‌های مدار از بین می‌رود. بنابراین، اگر هیچ انرژی مغناطیسی در سیستم ذخیره نشده باشد، تلفات غیر مفید کاهش می‌یابند و بهره موتور بهبود پیدا خواهد کرد.

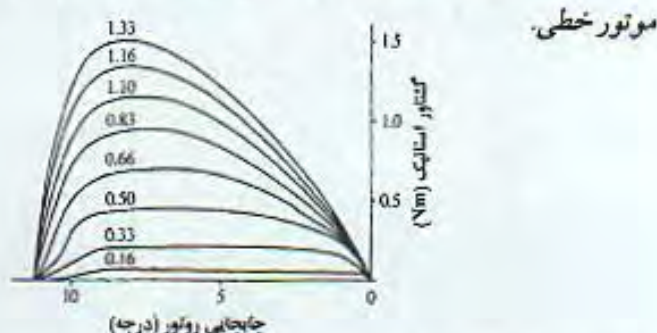
اثر اشباع توضیح داده شده در بالا برای مدل ۳.۶ صدق می‌کند. یک ماشین عملی بر اساس این مدل دارای دندانه‌های روتور چرخان در فضای محدود به دندانه‌های استاتور می‌باشد. زمانی موتورهای پله‌ای با این طراحی ساخته می‌شدند. امروزه این طرح بعزت دشواری‌های نصب آن مطلوب نیست. اما معلوم است که حتی وقتی که مواد بکار رفته در هسته‌های روتور و استاتور فولاد سیلکونی معمولی هستند، این طرح گشتاور استاتیک خوبی تولید می‌کند.

۳.۱.۵ مشخصه گشتاور بر جابجایی در ساختار برجسته دو طرفه^۲

امروزه اکثر موتورهای پله‌ای دارای هسته‌هایی با ساختار برجسته دو طرفه می‌باشند. یک طرح نمونه دندانه در شکل ۳.۸ نشان داده شده است. این طرح در پشت یک موتور VR چند پشته‌ای بکار رفته است.



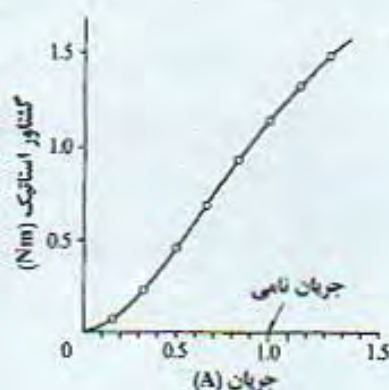
شکل ۳.۸ ساختار دندانه‌ای بکار رفته در یک موتور VR چند پشته‌ای، رسم شده بصورت مدل



شکل ۳.۹ منحنی مشخصه‌های T/θ ؛ هم‌ردیفی در 90° ؛ منحنی‌ها با جریانهای متناظر بر حسب بر واحد^۳ مقدار نامی نشان داده شده‌اند.

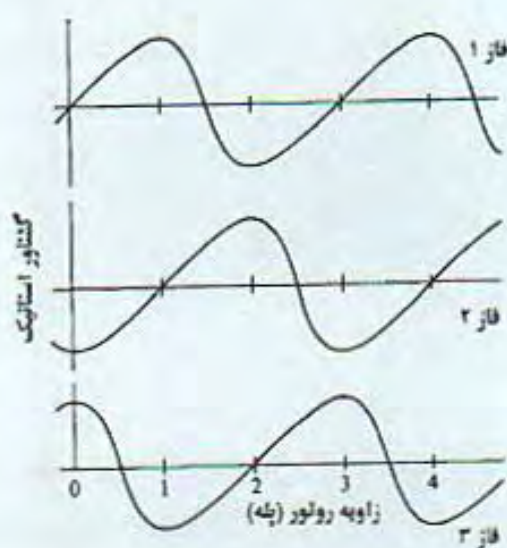
1- feedback
3- per unit

2- doubly salient

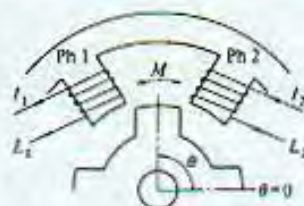


شکل ۳.۱۰. گشتاور استاتیک ماکزیمم بر جریان.

مشخصه‌های گشتاور T بر جابجایی θ (مشخصه‌های T/θ) در شکل ۳.۹ نشان داده شده‌اند. [4] منحنی مربوط به 0.16 جریان نامی تقریباً تخت می‌باشد، که بخوبی با نتیجه نظری بیان شده در رابطه (۳.۱۴) مطابقت دارد، که این رابطه با فرض دارا بودن قابلیت گذردگی بینهایت دندانه‌ها بدست آمد. در جریان نامی شکل بسیار متفاوت است، با تقریب به یک موج سینوسی نزدیکتر می‌باشد. افزایش گشتاور ماکزیمم هنگامیکه جریان به 0.5 تا $1/33$ برابر جریان نامی افزایش پیدا کرده به هیچ وجه با I^2 متناسب نیست، که این حالتی است که رابطه شار جریان خطی بود (شکل ۳.۱۰).



شکل ۳.۱۱. مثالی از منحنی‌های T/θ برای یک موتور VR سه فاز.



شکل ۳.۱۲. مدلی برای حالتی که اندوکتانس متقابل وجود ندارد.

مشخصه‌های T/θ بیش از یک زاویه پله با یکفاز تحریک شده در یک موتور سه فاز مطابق شکل ۳.۱۱ می‌باشند. نقطه‌هایی که منحنی با شیب منفی محور افقی را قطع می‌کند نقاط سکون یا تعادل می‌باشند. این نوع منحنی در تحلیل بر حسب مساله مورد بحث با یک موج سینوسی یا خط راست تقریب زده می‌شود.

۳.۱.۶ آثار القای متقابل

همانطور که در فصل ۲ بیان شد، چند طرح درایو برای موتورهای پله‌ای وجود دارد: درایو یکفاز در تحریک، درایو دوفاز در تحریک، درایو سه فاز در تحریک، درایو نیم پله، و غیره. در یک درایو، به غیر از درایو تکفاز، مینیمم بودن اندوکتانس متقابل مطلوب است، چون اندوکتانس متقابل تمایل کلی به کاهش دقت تعیین موقعیت دارد. هنگامیکه اندوکتانس متقابل غیر قابل صرف نظر باشد، گشتاور بر اساس تئوری خطی از مراحل زیر بدست می‌آید.

حالت نشان داده شده در شکل ۳.۱۲ را بررسی می‌کنیم. هنگامیکه منابع تغذیه منابع جریان باشند، ولتاژهای القا شده در هر فاز عبارتند از

$$e_1 = -I_1 \frac{\Delta L_1}{\Delta t} - I_2 \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.48)$$

$$e_2 = -I_2 \frac{\Delta L_2}{\Delta t} - I_1 \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.49)$$

که $L_1 =$ اندوکتانس فاز ۱

$L_2 =$ اندوکتانس فاز ۲

$M =$ اندوکتانس متقابل بین دو فاز

می‌باشند.

کار ΔP_i انجام شده توسط دو منبع تغذیه در طول نمو زمان Δt برابر است با

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= -(e_1 I_1 + e_2 I_2) \Delta t \\ &= I_1^2 \Delta L_1 + I_2^2 \Delta L_2 + 2 I_1 I_2 \Delta M.\end{aligned}\quad (3.50)$$

از طرف دیگر نمو انرژی مغناطیسی در سیستم عبارت است از

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} (I_1^2 \Delta L_1 + I_2^2 \Delta L_2) + I_1 I_2 \Delta M. \quad (3.51)$$

از روابط (۳.۵۰) و (۳.۵۱)، معلوم می‌شود که نیمی از کار انجام شده توسط منابع به نمو در انرژی مغناطیسی تبدیل می‌شود. نتیجتاً نیم دیگر به خروجی مکانیکی $\Delta P_o = T \Delta \theta$ تبدیل می‌شود:

$$T \Delta \theta = \frac{1}{2} (I_1^2 \Delta L_1 + I_2^2 \Delta L_2) + I_1 I_2 \Delta M.$$

از اینرو گشتاور برابر است با

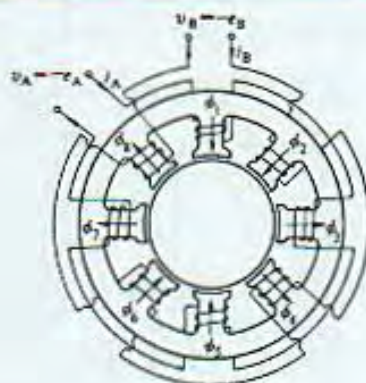
$$T = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial \theta} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial \theta} + I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial \theta}. \quad (3.52)$$

۳.۲ تئوری گشتاور تولید شده در موتورهای پله‌ای هیبرید

در اینجا گشتاور تولید شده در یک موتور پله‌ای هیبرید بررسی می‌شود. یکی از تفاوت‌های این تئوری با تئوری موتور VR در این است که اثر آهنربای مغناطیسی باید مورد توجه قرار گیرد. Patterson¹⁵ تئوری گشتاوری شامل رپله‌های گشتاوری برای موتورهای هیبرید ارائه داد. اما در اینجا تنها گشتاور پایدار مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۳.۲.۱ بررسی تحلیلی

با یک موتور دوفاز با ساختار قطب نشان داده شده در شکل ۳.۱۳ سرو کار داریم. (دندانه‌های روی روتور رسم نشده‌اند). سیم‌پیچی‌های استاتور مطابق شکل برای تشکیل آرایش دوفاز دوقطبی به هم متصل شده‌اند؛ کلاف‌ها در قطب‌های ۷،۵،۳،۱ بصورت سری متصل شده‌اند تا فاز A را تشکیل دهند، کلاف‌ها در قطب‌های ۸،۶،۴،۲ بصورت سری متصل شده‌اند تا فاز B را تشکیل دهند. برای سادگی تحلیل، آثار مقاومت سیم‌پیچی، جریانهای ادی^۱، گشتاور گیره، اندوکتانس متقابل، و هیستریزیس در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین مدارهای مغناطیسی موتور خطی فرض شده‌اند، به این معنی که شار مغناطیسی القا شده توسط جریانهای استاتور مستقل از آهنربای داخلی و متناسب با c.m.f. اعمال شده می‌باشد.



شکل ۳.۱۳. مدلی از یک موتور پله‌ای هیبرید با سیم‌پیچی‌های متصل با آرایش دو رشته‌ای دو فاز.

از قانون اساسی تبدیل انرژی شروع می‌کنیم

$$\begin{bmatrix} \text{توان الکتریکی} \\ \text{تامین شده} \\ \text{توسط منبع تغذیه} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{توان} \\ \text{مکانیکی} \\ \text{خروجی} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{نرخ افزایش} \\ \text{در انرژی} \\ \text{مغناطیسی} \end{bmatrix}$$

نمادهای بکار رفته در تئوری زیر از این قواعد پیروی می‌کنند:

- (i) حروف کوچک برای متغیرهای تغییرپذیر با زمان می‌باشند.
 - (ii) حروف بزرگ برای تبدیل لاپلاس و مقادیر بدون تغییر می‌باشند.
 - (iii) گشتاور متغیر با زمان با t نشان داده شده است، تا از اشتباه گرفتن آن با زمان τ جلوگیری شود.
- حال رابطه (۳.۵۳) اینطور نوشته می‌شود.

$$-(e_A i_A + e_B i_B) = \tau \frac{d\theta}{dt} + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} i_A^2 L_A + \frac{1}{2} i_B^2 L_B \right] \quad (3.54)$$

که $e.m.f.$ القا شده در فاز A e_A

$e.m.f.$ القا شده در فاز B e_B

جریان در فاز A i_A

جریان در فاز B i_B

اندوکتانس فاز A L_A

اندوکتانس فاز B L_B

τ = گشتاور ایجاد شده

می‌باشند.

چون فرض می‌کنیم که مدارهای مغناطیسی خطی می‌باشند و اندوکتانس متقابل بین دوفاز قابل صرف‌نظر است، گشتاور را می‌توان به مولفه‌های فاز A و B بصورت زیر تفکیک کرد

$$\tau = \tau_A + \tau_B. \quad (3.55)$$

از اینرو داریم

$$-e_A i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A, \quad (3.56)$$

$$-e_B i_B = \tau_B \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_B^2 L_B. \quad (3.57)$$

۳.۲.۲ اثر آهنربای مغناطیسی روی تولید گشتاور

ولتاژ ترمینال برای هرفاز مجموع دو مولفه می‌باشد؛ ولتاژ حاصل از شار آهنربای دائمی پیوند دهنده سیم‌پیچی‌های فاز و ولتاژ ناشی از جریان‌گذرنده از اندوکتانس فاز. بنابراین رابطه (۳.۵۶) برای فاز A اینطور بازنویسی می‌شود

$$-(e_{gA} + e_{LA}) i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A, \quad (3.58)$$

که e_{LA} ولتاژ القا شده توسط جریان فاز A و از این رابطه بدست می‌آید

$$e_{LA} = -\frac{d}{dt} (i_A L_A). \quad (3.59)$$

با جایگذاری آن در رابطه (۳.۵۸) بدست می‌آید

$$-e_{gA} i_A + i_A \frac{d}{dt} (i_A L_A) = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A. \quad (3.60)$$

از اینرو داریم

$$i_A \frac{d}{dt} (i_A L_A) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A = i_A^2 \frac{dL_A}{dt} + L_A i_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} L_A \frac{di_A^2}{dt} - \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} \quad (3.61)$$

که، چون جمله‌های دوم و سوم همدیگر را حذف می‌کنند، داریم

$$= \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}. \quad (3.62)$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه (۳.۵۸)، برای گشتاور فاز A بدست می‌آید

$$\tau_A = -e_{gA} i_A / \dot{\theta} + \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \quad (3.63)$$

که

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.64)$$

جمله دوم سمت راست رابطه (۳.۶۳) گشتاور ناشی از تغییر در اندوکتانس فاز با موقعیت روتور را نشان می‌دهد، که همانطور که در تئوری موتور VR دیده شد اساس موتورهای پله‌ای VR می‌باشد. در یک موتور پله‌ای هیبرید نمونه، تغییر اندوکتانس فاز به اندازه کوچک چند درصد است، و سهم آن در گشتاور پایدار قابل صرف نظر است. از اینرو برای گشتاور داریم

$$\tau = -(e_{gA} i_A + e_{gB} i_B) / \theta. \quad (3.65)$$

ولتاژ القایی برای هر فاز اینطور بدست می‌آید

$$e_{gA} = n(-\phi_1 + \phi_3 - \phi_5 + \phi_7), \quad (3.66)$$

$$e_{gB} = n(-\phi_2 + \phi_4 - \phi_6 + \phi_8) \quad (3.67)$$

که n = تعداد دورها در هر قطب

ϕ_K = شار آهنربایی دائمی در هر قطب

می‌باشند.

از آزمایش‌ها معلوم شده است که شکل موج e_g به یک موج سینوسی نزدیک است، که شامل برخی مولفه‌های هارمونیک می‌شود.

اگر از مولفه‌های هارمونیک صرف نظر کنیم، e_{gA} ، e_{gB} اینطور بدست می‌آیند

$$e_{gA} = \omega C \cos(\omega t - \rho), \quad (3.68)$$

$$e_{gB} = \omega C \sin(\omega t - \rho), \quad (3.69)$$

که C = ثابتی که از روی ابعاد موتور و تعداد دورها مشخص می‌شود ($Vs \text{ rad}^{-1}$)

ρ = یک زاویه فاز، 'زاویه گشتاور' (rad)

می‌باشند.

$$\omega = N_p \dot{\theta}. \quad (3.70)$$

۳.۲.۳ گشتاور پایدار^۱

فرض می‌کنیم که جریان در هرفاز یک موج سینوسی با فرکانس یکسان ω با ولتاژهای القاء شده می‌باشد:

$$i_A = -I_M \sin \omega t, \quad (3.71)$$

$$i_B = -I_M \cos \omega t. \quad (3.72)$$

با جایگذاری روابط (۳.۷۰) - (۳.۷۲) در رابطه (۳.۶۵) داریم

$$\tau = -\frac{\omega C I_M}{\dot{\theta}} \left\{ \sin(\omega - \rho) \cos \omega t - \cos(\omega t - \rho) \sin \omega t \right\}$$

$$\tau = C N_r I_M \sin \rho. \quad (3.73)$$

چون گشتاور، که با بار متعادل می‌شود، متناسب است با $\sin \rho$ زاویه ρ 'زاویه گشتاور' یا 'زاویه بار' نامیده می‌شود.

از اینرو یک موتور پله‌ای هیبرید ایده‌آل یک گشتاور بدون ریپل ایجاد می‌کند، با این نکته که ولتاژ القاء شده ناشی از آهنربای دائمی و جریان شکل موج سینوسی دارند. چون در بسیاری از کاربردهای موتورهای پله‌ای شکل موج جریان متفاوت از شکل سینوسی می‌باشد، مولفه ریپل در گشتاور نسبتاً بزرگ می‌شود. حتی اگر یک جریان سینوسی شکل اعمال شود هنوز ریپل گشتاوری بعلت اثر گیره و هارمونیک‌های c.m.f. القاء شده ناشی از آهنربای روتور مشاهده می‌شود. برای مطالعه ریپل گشتاور و درایوهای برای مینیمم کردن آن به مراجع [9]-[5] مراجعه کنید.

۳.۳ ساختار دندانه، تعداد دندانه‌ها، تعداد پله بردور، و تعداد قطب‌ها

تفاوت موتورهای پله‌ای با موتورهای معمولی در فصل ۲ بر حسب کاربرد نشان داده شد. از نظر مکانیزم تولید گشتاور، مهم‌ترین مشخصه موتور پله‌ای دندانه‌های آن می‌باشد. در اکثر موتورهای الکتریکی چرخان یا خطی دیگر، دندانه‌ها برای تولید گشتاور کاملاً ضروری نیستند اما ناگزیر برای کاهش فاصله هوایی بین روتور و استاتور، با حفظ فضای کافی برای سیم‌پیچی‌ها، بکار می‌روند. در موتورهای پله‌ای، دندانه‌ها در روتور و استاتور برای ایجاد گشتاور و قرار دادن روتور در زاویه‌ای خاص ضروری می‌باشند. در این بخش، ساختار دندانه، تعداد دندانه‌ها، و آرایش آنها مورد بحث قرار خواهد گرفت.



شکل ۳.۱۴. ساختار دندانه‌ای دارای گام دندانه یکسان در روتور و استاتور.

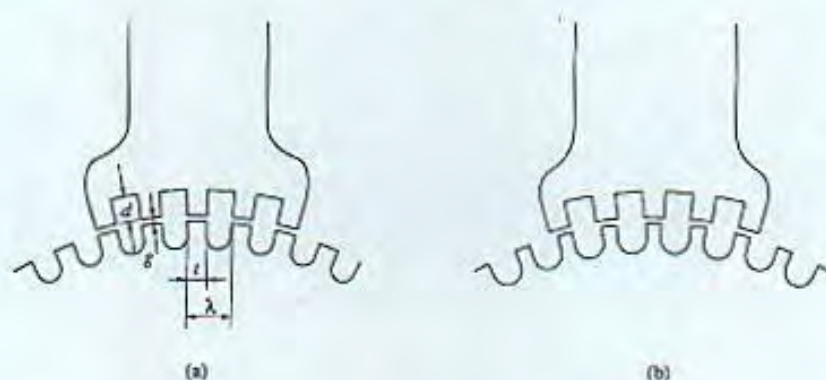


شکل ۳.۱۵. ساختار دندانه‌ای دارای گام‌های دندانه متفاوت در روتور و استاتور.

۳.۳.۱ ساختار دندانه

ساختار دندانه موتورهای پله‌ای مختلف را می‌توان به سه نوع اساسی تقسیم کرد. در نوع اول، مطابق با شکل ۳.۱۴، تعداد دندانه‌ها روی روتور و استاتور برابر می‌باشند. این نوعی است که در موتورهای VR چند پشته‌ای بکار رفته است (شکل‌های ۲.۲۲ و ۲.۲۶). در این ساختار تمام دندانه‌ها در زمان واحد تحریک و تخلیه انرژی^۱ می‌شوند. نوع دوم در شکل ۳.۱۵ نشان داده شده است که در آن تعداد دندانه‌ها در روتور و استاتور متفاوت می‌باشند. این ساختار در موتورهای VR تک پشته‌ای با زاویه پله بزرگ بکار رفته است (شکل ۲.۱۶)، و در این ماشین تمام دندانه‌های استاتور بطور گروهبی روی قطب‌ها آرایش داده شده‌اند، در حالیکه دندانه‌های روتور بطور همگن حول آن توزیع شده‌اند. این نوع ساختار در موتورهای VR تک پشته‌ای با زاویه پله کوچک و موتورهای پله‌ای هیبرید بکار رفته است. در برخی موتورهای پله‌ای هیبرید، اختلاف اندکی بین گام دندانه روتور و استاتور مطابق شکل ۳.۱۶(b) وجود دارد، بطور مثال ۵۰ گام دندانه روی روتور و ۴۸ گام دندانه روی استاتور.

در طراحی یک موتور پله‌ای تعیین نسبت شکاف/دندانه یکی از مهم‌ترین مسائل است، چون شدیداً روی مشخصه‌های گشتاور استاتیک اثر می‌گذارد. نسبت شکاف/دندانه روی مشخصه‌های دینامیک هم اثر می‌گذارد، چون یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده اندوکتانس هرفاز می‌باشد. (رابطه بین اندوکتانس و مشخصه‌های دینامیک در فصل ۴ بررسی خواهد شد.)



شکل ۳.۱۶. دو نوع ساختار دندانه‌ای در موتورهای پله‌ای هیبرید: (a) دارای گام دندانه یکسان در روتور و استاتور؛ (b) دارای گام دندانه بلندتر روی استاتور.

با وجود گوناگونی قابل توجه در طراحی ماشین‌ها، همگی گشتاور را از طریق عمل VR^1 برجسته دو طرفه تولید می‌کنند، و می‌توان آنها را به یک طرح مغناطیسی اساسی واحد مشابه به شکل ۳.۱۴ مربوط کرد. Harris و همکارانش^[4] مطالعه کاملی روی تولید گشتاور استاتیک در ساختار دندانه مشابهی را با در نظر گرفتن اشباع انجام دادند. بر اساس مطالعه آنها، بزرگترین میانگین گشتاور توسط کوچکترین فاصله هوایی ممکن تولید می‌شود، و نسبت بهینه گام دندانه / عرض دندانه $(= t/\lambda)$ در حالت نظری ۰/۴۲، مستقل از اندازه، می‌باشد و اظهار می‌دارند که نسبت t/λ در کاربردهای مدرن از ۰/۳۸ تا ۰/۴۸ تغییر می‌کند و دلایلی برای آن ارائه می‌دهند.

موتورهای هیبرید مدرن با ساختارهای دندانه‌ای مطابق شکل ۳.۱۶ دارای مشخصه‌های زیر می‌باشند.

۱. نسبت گام دندانه / عرض دندانه نزدیک به ۰/۵ است.
۲. عمق شکاف (d) در استاتور در حدود نصف گام دندانه λ است.
۳. نسبت t/λ برای روتور از ۰/۲۵ تا ۰/۴ تغییر می‌کند.
۴. شکل شکاف برای روتور نیم دایره و برای استاتور نیم دایره یا مستطیلی است.
۵. طول فاصله هوایی g تا حد ممکن باید کوچک باشد، با توجه به تکنیک‌های تولید انبوه بطور معمول ۰/۵۵mm می‌باشد، اما در برخی موارد خاص ۰/۲mm است.

۳.۳.۲ رابطه بین تعداد دندانه‌ها، پله بردور، تعداد فازها، و روش تحریک

در فصل قبل حالات مختلفی را دیدیم که نشان می‌دادند چگونه تعداد پله‌های لازم برای کامل کردن یک دور انتخاب می‌شود. رابطه بین تعداد اساسی پله بردور (S) و تعداد دندانه‌های روتور (N_r) از رابطه (۲.۲a) یا (۲.۲b)، برحسب اینکه آیا موتور دارای آهنربای دائمی نمی‌باشد (موتور رلوکتانس متغیر) یا می‌باشد (موتور آهنربای دائمی یا موتور هیبرید)، بدست می‌آید. باید توجه کرد که تعداد قطب‌ها عامل مستقیمی در تعیین زاویه پله نیست.

جدول ۳.۲ چندین حالت از (S) را برای یک روتور ۵۰ دندانه‌ای آورده است. در حالت نظری، اگر تعداد دندانه‌ها (N_r) افزایش یابد، S متناسباً افزایش پیدا خواهد کرد. بسیار نادر است که یک موتور پله‌ای مدرن با روش یکفاز در تحریک درایو شود؛ روش دوفاز در تحریک برای یک موتور هیبرید دوفاز معمول است. تعداد پله‌ها با بکارگیری عملکرد نیم‌پله همانطور که با $2S$ در جدول نشان داده شده دو برابر می‌شود. همانطور که در بخش ۲.۴.۷ بررسی شد زاویه پله پایه را می‌توان با استفاده از تکنیک ریز پله تقسیم کرد.

جدول ۳.۲. تعداد فازها، زاویه پله، تعداد پله بردور (S)، و دو برابر آن ($2S$) برای یک موتور دارای روتور ۵۰

دندانه‌ای

نوع موتور	تعداد فازها، p	زاویه پله، $\theta_p(^{\circ})$	S	$2S$
رلوکتانس متغیر	۳	۲/۴	۱۵۰	۳۰۰
	۴	۱/۸	۲۰۰	۴۰۰
موتور هیبرید	۲	۱/۸	۲۰۰	۴۰۰
	۳	۱/۲	۳۰۰	۶۰۰
	۵	۰/۷۲	۵۰۰	۱۰۰۰

$2S$ تعداد پله‌ها در عملکرد نیم‌پله می‌باشد.

مراجع فصل ۳

- [1] Seely, S. (1962). *Electromechanical energy conversion*. p. 19. McGraw-Hill, New York.
- [2] Byrne, J. V. (1972). Tangential forces in overlapped pole geometries, incorporating ideally saturable material. *Trans IEEE Mag.* 8, (1), 2-9.
- [3] Lawrenson, P. J., Hodson, D. P., and Harris, M. R. (1976). Electromagnetic forces in saturated magnetic circuits. *Proc. Conference on Small Electrical Machines*. Institution of Electrical Engineers, London, pp. 89-92.
- [4] Harris, M. R., Hughes, A., and Lawrenson, P. J. (1975). Static torque production in saturated doubly-salient machines. *Proc. IEE* 122, (10), 1121-7.

تئوری اساسی مشخصه‌های دینامیک موتورهای پله‌ای

مشخصه‌های دینامیک، مانند مشخصه‌های استاتیک، دارای اهمیت می‌باشند و باید در استفاده از موتور پله‌ای در سیستم مورد توجه قرار گیرند. تئوری‌هایی در مورد عملکرد دینامیک موتورهای پله‌ای توسط مولفین بسیاری ارائه شده‌است. در میان آنها، تئوری ارائه شده توسط Lawrenson و Hughes، از دانشگاه Leeds، انتخاب شده است، زیرا تئوری آنها نظام مند بوده و اکثر جنبه‌های اساسی رفتار دینامیک موتورهای پله‌ای مدرن را پوشش می‌دهد.

نمادهای اصلی بکار رفته در این فصل و فصل ۳ در جدول ۳.۱ نشان داده شده‌اند.

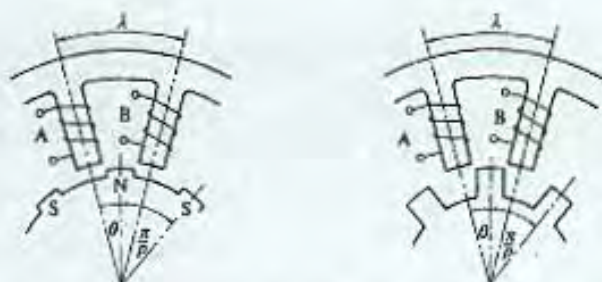
۴.۱ روابط اساسی

در اینجامدل^[۱] شکل ۴.۱ برای تحلیل پدیده نوسانی و میرایی الکترومغناطیسی در موتورهای پله‌ای بکار گرفته شده‌است. شکل ۴.۱(a) مدلی از یک موتور PM می‌باشد، اما برای موتور پله‌ای هیبرید هم بکار می‌رود؛ (b) مربوط به موتور VR تک پشته‌ای می‌شود. در آن مدل‌ها دو فاز با A و B نشان داده شده‌اند. روتور در مدل (a) دارای $2p$ قطب مغناطیسی، و در مدل (b) دارای $2p$ دندانه می‌باشد، در حالیکه استاتور دارای یک دسته قطب‌های مشابه و سیم‌پیچی‌هایی که بطور مساوی در فواصل λ آرایش یافته‌اند، می‌باشد.

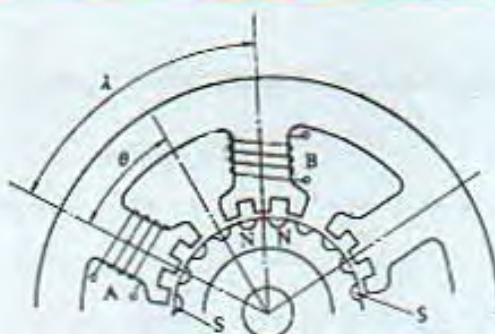
۴.۱.۱ موتورهای آهنربای دائمی و هیبرید

اگر حداکثر شار ناشی تولید شده توسط یک آهنربای دائمی $n\Phi_M$ باشد، گشتاور تولید شده توسط جریان i_A در سیم‌پیچی A از این رابطه بدست می‌آید

$$\tau_A = -pn\Phi_M i_A \sin p\theta. \quad (4.1)$$



شکل ۴.۱. مدل‌هایی برای موتورهای پله‌ای بکار رفته در تحلیل میرایی الکترومغناطیسی (مطابق مرجع [1]).



شکل ۴.۲. مدل یک موتور پله‌ای هیبرید؛ $p = N_r$

متشابهاً، گشتاور ایجاد شده توسط جریان i_B عبارت است از

$$\tau_B = -pn\Phi_M i_B \sin p(\theta - \lambda) \quad (4.2)$$

که p تعداد جفت قطب‌های مغناطیسی می‌باشد، اما در مورد موتور هیبرید با N_r (تعداد دندانه‌های روتور) مطابق مدل شکل ۴.۲ جایگزین می‌شود.

چون در آن مدلها مرکز قطب A مبدأ θ می‌باشد، شار ناشی $n\phi$ تقریباً با توزیع فضای سینوسی نشان داده شده است

$$n\phi = n\Phi_M \cos p\theta. \quad (4.3)$$

e.m.f. القاء شده در فاز A برابر است با

$$e_{sA} = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = (np\Phi_M \sin p\theta) \dot{\theta}. \quad (4.4)$$

با مقایسه روابط (۴.۱) و (۴.۴)، معلوم می‌شود

$$\tau_A = -e_{sA} i_A / \dot{\theta},$$

که بشکل جمله اول رابطه (۳.۶۳) می‌باشد. در اینجا از جمله دوم که نشان دهنده گشتاور رلوکتانس می‌باشد صرف‌نظر شده است.

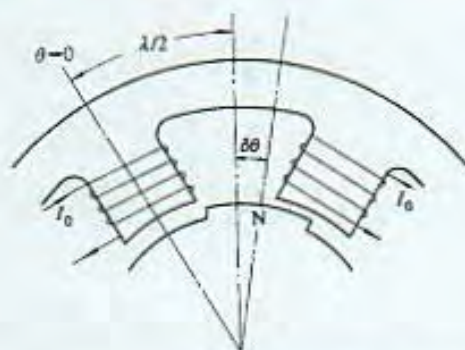
معادله حرکت روتور عبارت است از

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_M i_A \sin p\theta + pn\Phi_M i_B \sin p(\theta - \lambda) = 0. \quad (4.5)$$

در اینجا D نشان دهنده ضریب میرایی چسبندگی^۱ می‌باشد که بستگی به وجود هوا و اصطکاک، و آثار الکترومغناطیسی درجه دوم ناشی از هیستریزس و جریانهای ادی دارد. روابط و لنز برای سیم‌پیچی‌های استاتور عبارت است از

$$V - ri_A - L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} (n\Phi_M \cos p\theta) = 0, \quad (4.6)$$

1- viscous damping coefficient



شکل ۴.۳. کنترل موقعیت روتور.

$$V - ri_B - L \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} \{ n \Phi_M \cos p(\theta - \lambda) \} = 0 \quad (4.7)$$

که V = ولتاژ DC ترمینال

L = اندوکتانس خودی هر فاز

M = اندوکتانس متقابل

r = مقاومت مدار - استاتور

می‌باشند.

در این روابط فرض بر این است که L و M مستقل از θ می‌باشند. چیزی که می‌خواهیم در مورد آن بحث کنیم تفاوت در رفتار دینامیک بین تحریک تکفاز و تحریک دو فاز می‌باشد. چون روابط بالا وقتی کاربرد دارند که هر دو فاز A و B تحریک شده باشند، از آنها می‌توان برای حل مسائل تحریک دوفاز استفاده کرد. یکی از ویژگی‌های روش Hughes و Lawrenson این است که تحریک تکفاز را هم می‌توان تنها با قرار دادن $\lambda = 0$ در نتایج نهایی یا در مراحل ابتدایی تحلیل مورد بررسی قرار داد. به این معنی که تحریک تکفاز متناظر با حالتی است که هر دو قطب به یک مکان می‌رسند (منطبق هستند).

روابط (۴.۵) و (۴.۷) معادلات دیفرانسیلی غیر خطی می‌باشند. چون برای بررسی کاملاً تحلیلی کار با معادله دیفرانسیلی غیر خطی مشکل می‌باشد، با خطی سازی معادلات شروع می‌کنیم. اگر در سیم‌پیچی‌های دوفاز جریان ثابت I_0 در جهتی است تا قطب جنوبی پدید آید، موقعیت تعادل در شکل ۴.۳ در $\theta = \lambda/2$ قرار دارد. انحراف از موقعیت تعادل با $\delta\theta$ نشان داده می‌شود، که تابعی از زمان t می‌باشد اما در تحلیل‌های آتی از نظر اندازه کوچک می‌باشد. هنگامیکه روتور می‌چرخد یا نوسان می‌کند، جریانهایی هر دو سیم‌پیچی از مقدار ثابت به اندازه $\delta i_A(t)$ و $\delta i_B(t)$ منحرف خواهند شد. روابط (۴.۵) و (۴.۶) طی مراحل زیر خطی می‌شوند.

قرار می‌دهیم

$$\theta = \frac{\lambda}{2} + \delta\theta, \quad (4.8)$$

$$i_A = I_o + \delta i_A, \quad (4.9)$$

$$i_B = I_o + \delta i_B. \quad (4.10)$$

پس داریم

$$\sin p\theta = \sin \left[\frac{p\lambda}{2} + p\delta\theta \right] = \sin \frac{p\lambda}{2} \cos p\delta\theta + \cos \frac{p\lambda}{2} \sin p\delta\theta. \quad (4.11)$$

چون هنگامیکه $p\delta\theta$ زاویه‌ای کوچک است داریم

$$\cos p\delta\theta \approx 1, \quad (4.12)$$

$$\sin p\delta\theta \approx p\delta\theta. \quad (4.13)$$

رابطه (۴.۱۱) اینطور ساده می‌شود

$$\sin p\theta = \sin \frac{p\lambda}{2} + p \cos \frac{p\lambda}{2} (\delta\theta). \quad (4.14)$$

بطور مشابه،

$$\begin{aligned} \sin p(\theta - \lambda) &= \sin p \left[\frac{\lambda}{2} + \delta\theta - \lambda \right] = -\sin p(\lambda - \delta\theta) \\ &= -\sin \frac{p\lambda}{2} + p \left[\cos \frac{p\lambda}{2} \right] (\delta\theta). \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + pn \Phi_M (I_o + \delta i_A) \left\{ \sin \frac{p\lambda}{2} + p \left[\cos \frac{p\lambda}{2} \right] (\delta\theta) \right\} - \\ - pn \Phi_M (I_o + \delta i_B) \left\{ \sin \frac{p\lambda}{2} - p \left[\cos \frac{p\lambda}{2} \right] (\delta\theta) \right\} = 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_o \left[\cos \frac{p\lambda}{2} \right] (\delta\theta) + \\ + p \Phi_M n \left[\sin \frac{p\lambda}{2} \right] (\delta i_A - \delta i_B) = 0. \end{aligned} \quad (4.17)$$

با انجام مراحل مشابه، روابط (۴.۶) و (۴.۷) به اینصورت خطی می‌شوند

$$r(\delta i_A) + L \frac{d(\delta i_A)}{dt} + M \frac{d(\delta i_B)}{dt} - p \Phi_M n \sin \left[\frac{p\lambda}{2} \right] \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0, \quad (4.18)$$

$$r(\delta i_B) + L \frac{d(\delta i_B)}{dt} + M \frac{d(\delta i_A)}{dt} - p\Phi_M n \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0. \quad (4.19)$$

نوع تابعی که موقعیت رونور $\delta\theta(t)$ را بعد از رها شدن آن از سکون با زاویه θ_i از موقعیت تعادل بیان می‌کند در نظر می‌گیریم. بعلاوه، چگونگی رفتار i_A ، i_B ، مساله جالبی است. برای تعیین آنها، باید این معادلات را با شرایط اولیه $\delta\theta = \theta_i$ و $d(\delta\theta)/dt = 0$ در $t=0$ حل کنیم. ما معادلات را به روش تبدیل لاپلاس با قرار دادن $d/dt = s$ و $d^2/dt^2 = s^2$ حل می‌کنیم. تبدیلات لاپلاس با حروف بزرگ به این شکل نشان داده شده‌اند:

$$\delta\theta(t) \rightarrow \Theta(s)$$

$$\delta i_A(t) \rightarrow I_A(s)$$

$$\delta i_B(t) \rightarrow I_B(s)$$

جوابها عبارتند از

$$I_A = -I_B = \frac{p\Phi_M n \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) (s\Theta - \theta_i)}{(r + L_p s)}, \quad (4.20)$$

$$\Theta = \frac{\left\{ s^2 + \left[\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right] s + \left[\frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + k_p \omega_{np}^2 \right] \right\} \theta_i}{s^3 + \left[\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right] s^2 + \left\{ \frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + \omega_{np}^2 (1 + k_p) \right\} s + \left[\frac{r}{L_p} \right] \omega_{np}^2} \quad (4.21)$$

که

$$L_p = L - M, \quad (4.22)$$

$$k_p = \frac{n\Phi_M}{L_p I_o} \frac{\sin^2\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{\cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}, \quad (4.23)$$

$$\omega_{np}^2 = \frac{2p^2\Phi_M n I_o \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{J}. \quad (4.24)$$

در اینجا رابطه (4.21) که رفتار $\theta(t)$ را تعیین می‌کند رابطه مهمی است. برجسته‌ترین ویژگی این رابطه این است که مخرج نسبت به s از مرتبه سوم می‌باشد که تفاسیر فیزیکی آن بعداً مورد بحث

قرار خواهد گرفت. رابطه (۴.۲۰) نشان می‌دهد که جریانهای گذرا در فازهای A و B برابر هستند اما مخالف هم می‌باشند. بخاطر این ویژگی، طرح تحریک دوفاز همانطور که بعداً اشاره می‌شود میرایی بسیار خوبی فراهم می‌کند. قبل از حل در حوزه زمان، نشان داده می‌شود که معادلات اساساً مشابهی برای موتور VR بدست می‌آید.

۴.۱.۲ موتور VR

روابط زیر بر اساس موتور VR تک پشته‌ای می‌باشد، اما نتایج را می‌توان به سادگی با صفر قرار دادن تمامی اندوکتانس‌های متقابل برای انواع چند پشته‌ای بکار برد. اندوکتانس‌های متقابل و خودی سیم‌پیچی‌های دوفاز در مدل شکل (b) ۴.۱ صور زیر را دارا هستند،

$$L_A = L_o + L \cos 2p\theta, \quad (4.25)$$

$$L_B = L_o + L \cos 2p(\theta - \lambda), \quad (4.26)$$

$$M_{AB} = -M_o + M \cos 2p \left[\theta - \frac{\lambda}{2} \right]. \quad (4.27)$$

علامت منفی M_o در رابطه (۴.۲۷) نشان می‌دهد که جریان مثبت در یک سیم‌پیچی در دیگری شارهای ناشی منفی بوجود می‌آورد. گشتاور تولید شده توسط جریانهای i_A و i_B مطابق رابطه (۳.۵۲) عبارت است از

$$\tau = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta} \quad (4.28)$$

$$= - \left\{ i_A^2 p L \sin 2p\theta + i_B^2 p L \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B p M \sin 2p \left[\theta - \frac{\lambda}{2} \right] \right\} \quad (4.29)$$

و از اینرو معادله حرکت عبارت است از

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + i_A^2 p L \sin 2p\theta + i_B^2 p L \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B p M \sin 2p(\theta - \lambda/2) = 0. \quad (4.30)$$

معادلات ولتاژ در دوسیم‌پیچی عبارتند از

$$V - r i_A - \frac{d}{dt} (L_A i_A) - \frac{d}{dt} (M_{AB} i_B) = 0, \quad (4.31)$$

$$V - r i_B - \frac{d}{dt}(L_B i_B) - \frac{d}{dt}(M_{AB} i_A) = 0. \quad (4.32)$$

این معادلات به این شکل خطی سازی می‌شوند

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 4p^2 I_o^2 (M + L \cos p\lambda) (\delta\theta) + 2p I_o L \sin p\lambda (\delta i_A - \delta i_B) = 0, \quad (4.33)$$

$$r(\delta i_A) (L_o + L \cos p\lambda) \frac{d}{dt} (\delta i_A) + (M - M_o) \frac{d}{dt} (\delta i_B) - 2p I_o L \sin p\lambda \frac{d}{dt} (\delta\theta) = 0, \quad (4.34)$$

$$r(\delta i_B) (L_o + L \cos p\lambda) \frac{d}{dt} (\delta i_B) + (M - M_o) \frac{d}{dt} (\delta i_A) + 2p I_o L \sin p\lambda \frac{d}{dt} (\delta\theta) = 0, \quad (4.35)$$

روابط (۴.۳۳) تا (۴.۳۵) از نظر شکلی، در متغیرهای $\delta\theta$ ، δi_A ، δi_B ، با معادلات (۴.۱۷) تا (۴.۱۹) برای موتور PM مشابه هستند، و جواب معادلات با توجه به شرایط اولیه مشابه عبارتند از

$$I_A = -I_B = \frac{2p I_o L \sin(p\lambda) (s\Theta - \theta_i)}{(r + L_v s)}, \quad (4.36)$$

$$\Theta(s) = \frac{\left\{ s^2 + \left[\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right] s + \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + k_p \omega_{nv}^2 \right\} \theta_i}{s^3 + \left[\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right] s^2 + \left\{ \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + \omega_{nv}^2 (1 + k_v) \right\} s + \left[\frac{r}{L_v} \right] \omega_{nv}^2} \quad (4.37)$$

که

$$L_v = L_o + L \cos p\lambda - M + M_o, \quad (4.38)$$

$$k_v = \frac{2L^2 \sin^2 p\lambda}{L_v (M + L \cos p\lambda)}, \quad (4.39)$$

$$\omega_{nv}^2 = \frac{4p^2 I_o^2 (M + L \cos p\lambda)}{J}. \quad (4.40)$$

۴.۲ توابع تبدیل موتورهای پله‌ای

روابط (۴.۲۱) و (۴.۳۷) عباراتی در حوزه s برای مکان هندسی گذرای $\delta\theta$ با موقعیت اولیه $\delta\theta = \theta_i$ می‌باشند. قبل از بررسی مشخصه‌های میرایی، تابع تبدیل موتورهای پله‌ای را تعریف می‌کنیم.

موتورهای پله‌ای معمولاً برای کنترل موقعیت بکار می‌روند. در شکل ۴.۳ انتظار می‌رود که مرکز قطب مغناطیسی روتور با تحریک یکسان دوفاز در $\theta = \lambda/2$ استقرار یابد؛ در این حالت مقدار مطلوب $\theta = \lambda/2$ می‌باشد. تبدیل لاپلاس مقدار مطلوب را Θ_i می‌گیریم، و تبدیل لاپلاس موقعیت واقعی $\delta\theta(t)$ را Θ_o قرار می‌دهیم. آنگاه تابع تبدیل اینطور تعریف می‌شود

$$G(s) = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} \quad (۴.۴۱)$$

و مابین رابطه را در حالات مختلف بررسی خواهیم کرد.

۴.۲.۱ عملکرد تکفاز

همانطور که پیشتر اشاره شد، هنگامیکه $\lambda = 0$ باشد، سیم‌پیچی‌ها بعنوان یک سیم‌پیچی واحد رفتار می‌کنند. از اینرو جواب عملکرد تکفاز بسادگی با قرار دادن $\lambda = 0$ در معادلات دوفاز بدست می‌آید. جملات نهایی در هر یک از معادلات (۴.۱۷) تا (۴.۱۹) و (۴.۳۰) تا (۴.۳۲) صفر می‌شوند، و معادلات مکانیکی و الکتریکی مستقل از هم می‌شوند. معادله تبدیل موتور PM تنها از روی رابطه (۴.۱۷) و برای موتور VR به راحتی از رابطه (۴.۳۲) بدست می‌آید. بمنظور بررسی حالت موتور PM با قرار دادن $\lambda = 0$ در رابطه (۴.۱۷) داریم

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_o \delta\theta. \quad (۴.۴۲)$$

چون $\delta\theta$ موقعیت واقعی θ_o منهای موقعیت مطلوب θ_i می‌باشد:

$$\delta\theta = \theta_o - \theta_i \quad (۴.۴۳)$$

رابطه (۴.۴۲) اینطور بازنویسی می‌شود

$$J \frac{d^2\theta_o(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta_o(t)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_o \theta_o(t) = 2p^2 \Phi_M n I_o \theta_i. \quad (۴.۴۴)$$

تبدیل لاپلاس این معادله با شرایط اولیه $\theta_o = 0$ ، $d\theta_o/dt = 0$ در $t = 0$ عبارت است از

$$(s^2 J + sD + 2p^2 \Phi_M n I_o) \Theta_o(s) = 2p^2 \Phi_M n I_o \Theta_i \quad (4.45)$$

که از آن تابع تبدیل زیر بدست می‌آید

$$G(s) = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{2p^2 \Phi_M n I_o}{Js^2 + Ds + 2p^2 \Phi_M n I_o} = \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + Ds/J + \omega_{np}^2} \quad (4.46)$$

از اینرو ω_{np} 'فرکانس زاویه‌ای طبیعی' می‌باشد که برابر است با

$$\omega_{np} = \sqrt{(2p \Phi_M n I_o / J)}, \quad (4.47)$$

یا

$$\omega_{np} = \sqrt{(N_r K_T I_o / J)}. \quad (4.48)$$

شکل رابطه (۴.۴۸) شکل شناخته شده موتور پله‌ای هیبرید می‌باشد. K_T در رابطه (۴.۴۸) 'ثابت گشتاور' می‌باشد و برابر است با

$$K_T = 2n N_r \Phi_M. \quad (4.49)$$

رابطه (۴.۴۹) اینطور بدست می‌آید. گشتاور کل τ مجموع τ_A از رابطه (۴.۱) و τ_B از رابطه (۴.۲) می‌باشد، اما در تحریک تکفاز $\lambda = 0$ و در موتور هیبرید $p = N_r$ می‌باشد. در نتیجه

$$\tau = -2N_r n \Phi_M I_o \sin(N_r \delta\theta). \quad (4.50)$$

اگر موقعیت روتور $\delta\theta$ نزدیک صفر باشد، $\sin(N_r \delta\theta) \approx N_r \delta\theta$ ، و داریم

$$\tau = -2N_r^2 n \Phi_M I_o \delta\theta. \quad (4.51)$$



شکل ۴.۴. منحنی گشتاور بر جابهایی و تقریب خطی آن.

هنگامیکه گشتاور تولید شده در یک موتور پله‌ای بصورت تابع خطی از $\delta\theta$ بیان می‌شود، اغلب به این شکل بیان می‌شود

$$\tau = -K_T N_r I_o \delta\theta. \quad (4.52)$$

از مقایسه روابط (۴.۵۰) و (۴.۵۲) معلوم می‌شود که ثابت گشتاور K_T در معادله (۴.۵۲) باید دارای شکل رابطه (۴.۴۹) باشد. با قرار N_r بجای p در رابطه (۴.۴۷) و حذف n با استفاده از رابطه (۴.۴۹) ما شکل رابطه (۴.۴۸) را برای ω_{np} بدست می‌آوریم. چون تعداد دورها در اینجا $2n$ می‌باشد، اگر با تعداد دورهای یکفاز در یک موتور معمولی n_r جایگزین شود، K_T به این شکل بیان می‌شود

$$K_T = n_1 N_r \Phi_M. \quad (4.53)$$

ثابت گشتاور در حالت نظری به این شکل بیان می‌شود، اما معمولاً از تقریب منحنی مشخصه T/θ با یک خط راست مطابق با شکل ۴.۴ بدست می‌آید.

همچنین تابع تبدیل رابطه (۴.۴۶) را می‌توان از معادله (۴.۲۱) بدست آورد. چون در این حالت $\bar{r} = 0$ است اندوکتانس متقابل M با اندوکتانس خودی L برابر می‌باشد، و از اینرو L_p در رابطه (۴.۲۲) صفر می‌شود. بعد از ضرب صورت و مخرج در $L_p/2$ قرار می‌دهیم $L_p = 0$ تا داشته باشیم

$$\Theta = \frac{(s + D/J)\theta_i}{s^2 + (D/J)s + \omega_{np}^2}. \quad (4.54)$$

اگر صورت را با یک مقدار ثابت جایگزین کنیم که مقدار تابع واحد در $s=0$ می‌باشد، تابع تبدیل بدست می‌آید. که به روشی مشابه رابطه (۴.۴۶) می‌باشد. تابع تبدیل موتور VR را می‌توان از مراحل مشابهی بدست آورد.

۴.۲.۲ درایو با منبع جریان

گزینه‌های مختلفی برای شکل موجهای ولتاژ یا جریان تحریک وجود دارد. در روابط (۴.۶) و (۴.۷) یا (۴.۳۱) و (۴.۳۲) یک ولتاژ ثابت اعمال می‌شود، که نشان دهنده یک درایو با منبع ولتاژ می‌باشد. هنگامیکه گشتاور بوجود آمده در یک موتور پله‌ای هیبرید در بخش ۳.۲ بررسی می‌شد، جریان‌ها به شکل سینوسی بودند. مشخص کردن جریان به این معنی است که موتور توسط یک منبع جریان درایو می‌شود. تابع تبدیل درایو با منبع جریان در اینجا بررسی خواهد شد. گشتاور حاصل از رابطه (۳.۷۳) در اینجا دوباره نوشته می‌شود

$$\tau = CN_r I_M \sin \rho \quad (4.55)$$

که C = ثابتی است که از ابعاد موتور و تعداد دورها معین می‌شود، و دارای دیمانسیون یکسان با ثابت گشتاور است (رابطه (4.52))

$$I_M = \text{جریان پیک.}$$

زاویه گشتاور ρ به این معنی است

$$\rho = \xi_i - \xi_o \quad (4.56)$$

که ξ_i = زاویه الکتریکی موقعیت مطلوب روتور

ξ_o = زاویه الکتریکی موقعیت واقعی روتور.

منطقی است تا از ωt در روابط (4.71) و (4.72) بعنوان موقعیت مطلوب در کنترل موقعیت در درایو با جریان سینوسی دوفاز استفاده شود.

از اینرو

$$\xi_i = \omega t. \quad (4.57)$$

مفهوم آن این است که موقعیت مطلوب با نسبت ω در تغییر است، یا می‌توان گفت که سرعت فرمان داده می‌شود. اگر ξ_i در ωt_i در $t = t_i$ ثابت باشد، انتظار می‌رود روتور به موقعیتی که $p=0$ یا $\xi_i = \xi_o$ است تنزل کند. (از بار اصطکاکی صرف‌نظر می‌شود.) در رابطه (4.57) برابر فرکانس زاویه‌ای ولتاژ القاء شده حاصل از روابط (4.68) و (4.69) می‌باشد و به تعداد دندانه‌ها N_r بستگی دارد بطوریکه اگر سرعت ثابت باشد ω با N_r متناسب است. از اینرو زوایای الکتریکی ξ_i و ξ_o با زوایای مکانیکی θ_i و θ_o بترتیب زیر مرتبط می‌باشند

$$\theta_i = \xi_i / N_r, \quad (4.58)$$

$$\theta_o = \xi_o / N_r. \quad (4.59)$$

پس گشتاور رابطه (4.55) اینطور نوشته می‌شود

$$\begin{aligned} \tau &= CN_r I_M \sin N_r (\theta_i - \theta_o) \\ &= K_T I_M N_r \sin N_r (\theta_i - \theta_o) \end{aligned} \quad (4.60)$$

که ثابت گشتاور K_T برابر است با

$$K_T = CN_r. \quad (4.61)$$

اگر $\theta_i \approx \theta_o$

$$\tau \approx K_T I_M N_r (\theta_i - \theta_o). \quad (4.62)$$

معادله حرکت عبارت است از

$$J \frac{d^2 \theta_o}{dt^2} + D \frac{d\theta_o}{dt} = K_T I_M N_r (\theta_i - \theta_o). \quad (4.63)$$

تبدیل لاپلاس با شرایط اولیه صفر برابر است با

$$(Js^2 + Ds + K_T I_M N_r) \Theta(s) = K_T I_M N_r \Theta_i. \quad (4.64)$$

از این معادله تابع تبدیل اینطور استخراج می‌شود

$$G(s) = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + (D/J)s + \omega_{np}^2}. \quad (4.65)$$

باید توجه داشت که تابع تبدیل موتور پله‌ای با درایو تحریک دوفاز با منبع جریان با تابع تبدیل در تحریک تکفاز با منبع ولتاژ یکسان می‌باشد. تابع تبدیل را همچنین می‌توان از رابطه (۴.۲۱) بدست آورد. درایو با منبع جریان از یک منبع تغذیه با امپدانس داخلی بینهایت، یا با یک مقاومت بزرگ که بصورت سری به سیم‌پیچی فاز متصل است، بهره می‌برد. بعد از ضربه صورت و مخرج رابطه (۴.۲۱) در r/L ، r را ∞ قرار می‌دهیم تا داشته باشیم

$$\Theta = \frac{\left(s + \frac{D}{J}\right) \theta_i}{s^2 + \frac{D}{J}s + \omega_{np}^2}. \quad (4.66)$$

با جایگزینی مخرج با یک مقدار ثابت که مقدار واحد معادله را به ازای $s=0$ می‌دهد، تابع، رابطه (۴.۶۵)، را بدست می‌آوریم. تابع مشابهی برای موتور VR بدست خواهد آمد.

۴.۲.۳ تحریک دوفاز در درایو با منبع ولتاژ

تابع تبدیل از رابطه (۴.۲۱) بدست می‌آید

$$G(s) = \frac{(r/L_p)\omega_{np}^2}{s^3 + \left(\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J}\right)s^2 + \left\{\frac{r}{L_p}\frac{D}{J} + \omega_{np}^2(1+k_p)\right\}s + \left(\frac{r}{L_p}\right)\omega_{np}^2} \quad (4.67)$$

رابطه مشابهی برای نوع VR بدست می‌آید.

۴.۳ پاسخ پله واحد

آماده‌ایم تا پاسخ گذاری یک موتور پله‌ای را بررسی کنیم. حالت تابع تبدیل مرتبه دوم و حالت تابع تبدیل مرتبه سوم را مقایسه خواهیم کرد. این مقایسه بین درایو تکفاز و درایو با تحریک دوفاز می‌باشد.

۴.۳.۱ تابع تبدیل مرتبه دوم

تابع تبدیل درایو تکفاز و درایو با منبع جریان بشکل زیر نوشته می‌شود

$$G(s) = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.68)$$

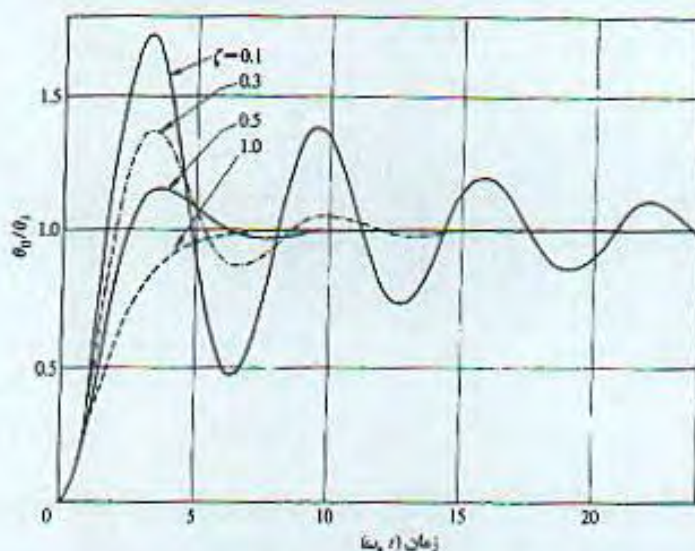
که ζ ضریب میرایی می‌باشد و بصورت زیر است

$$\zeta = D/2J\omega_n \quad (4.69)$$

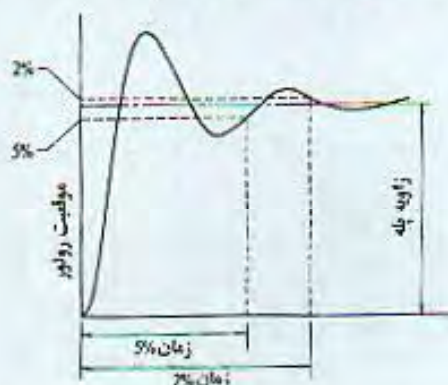
شکل رابطه (۴.۶۸) در تئوری کنترل فیدبک شکلی شناخته شده می‌باشد. پاسخ شاخص^۱، یا پاسخ θ_o به تابع پله θ_i دارای مسیرهای متفاوتی بر حسب اندازه ζ مطابق شکل ۴.۵ می‌باشد. بطور کلی، پاسخ به ازای $\zeta < 1$ نوسانی می‌باشد. چون ضریب میرایی یک موتور پله‌ای معمولی کمتر از ۰/۵ می‌باشد، پاسخ شاخص نوسانی است. به مدت زمان آغاز برخاستن^۲ تا لحظه‌ای که روتور بعد از آن همواره در محدوده‌ای قرار دارد زمان استقرار^۳ گفته می‌شود. زمان استقرار برحسب حد^۴ متفاوت می‌باشد؛ بطور مثال، همانطور که در شکل ۴.۶ نشان داده شده است زمان استقرار ± 2 درصد حد از ± 5 درصد حد طولانی تر است.

1- indicial response
3- settling time

2- step-up
4- limit



شکل ۴.۵. پاسخ‌های شاخص سیستم مرتبه دوم.



شکل ۴.۶. مثالهایی از زمان استقرار: زمان استقرار ۵ درصد و ۲ درصد در یک حالت خاص.

۴.۳.۲ تابع تبدیل مرتبه سوم

در درایو دوفاز در تحریک معادله حرکت و معادله ولتاژ به یکدیگر وابسته هستند. حل رابطه (۴.۲۰) یا رابطه (۴.۳۶) نشان می‌دهد که e.m.f.های جنبشی جریان‌های برابر و مخالفی را در فازهای تحریک شده تولید می‌کنند. جریان‌ها رویهم اثری بشکل یک جریان گردان^۱ روی جریان اصلی I_0 می‌گذرانند. جریان کل کشیده شده از منبع در مقدار $2I_0$ ثابت باقی می‌ماند، و از اینرو هیچ تغییری در توان تامین شده از منبع رخ نمی‌دهد. اگر حرکت روتور نوسانی باشد، جریان گردان هم نوسان خواهد کرد و گرمای ژول در سیم‌پیچی‌ها ایجاد می‌کند. چون این پدیده نشان می‌دهد که انرژی جنبشی روتور در تبدیل به تلفات حرارتی جذب شده است، نوسان روتور به سرعت میرا می‌شود. این موضوع توصیف میرایی الکترومغناطیسی در عملکرد دوفاز در تحریک می‌باشد.

مراحل زیر بررسی تحلیلی انجام شده توسط Hughes و Lawrenson می‌باشند. مخرج تابع که با صفر مساوی قرار داده شده است 'معادله مشخصه' خوانده می‌شود. هنگامیکه ثابت میرایی D ناشی از مقاومت هوا، و غیره، صفر فرض شود، معادله مشخصه درایو دوفاز در تحریک عبارتست از

$$s^3 + \left(\frac{r}{L}\right)s^2 + (1+k)\omega_n^2 s + \left(\frac{r}{L}\right)\omega_n^2 = 0. \quad (4.70)$$

پارامترهای این معادله دارای معانی فیزیکی زیر می‌باشند:

r/L = عکس ثابت زمانی مؤثر مدار

k = ثابت بدون دیمانسیون که اندازه پتانسیل میرایی ذاتی موتور را می‌دهد

ω_n = فرکانس طبیعی میرا نشده نوسانهای کوچک حول نقطه تعادل.

این معادله درجه سه دارای یک ریشه حقیقی و یک جفت ریشه مزدوج موهومی به ازای $0 < k < 8$ می‌باشد؛ و، چون اکثر موتورها دارای مقادیر $k < 1$ می‌باشند، معادله را می‌توان به این شکل بیان کرد.

$$(s+\alpha) \left\{ (s+\beta)^2 + \omega^2 \right\} = 0. \quad (4.71)$$

از رابطه (4.71) نتیجه می‌شود که پاسخ زمانی همواره به شکل زیر است

$$\theta(t) = A e^{-\alpha t} + B e^{-\beta t} \cos(\omega t - \lambda) \quad (4.72)$$

که A ، B و λ ثابت‌هایی هستند که از شرایط اولیه معین می‌شوند.

می‌توان از روی رابطه (4.72) گفت که استقرار سریع در نقطه تعادل تحت هر شرایطی اگر α و β هر دو بزرگ باشند ممکن است. پارامترهای α و β و ω با پارامترهای سیستم r ، L ، k ، ω_n طبق روابط زیر مربوط هستند

$$\alpha + 2\beta = r/L,$$

$$\alpha(\beta^2 + \omega^2) = (r/L)\omega_n^2, \quad (4.73)$$

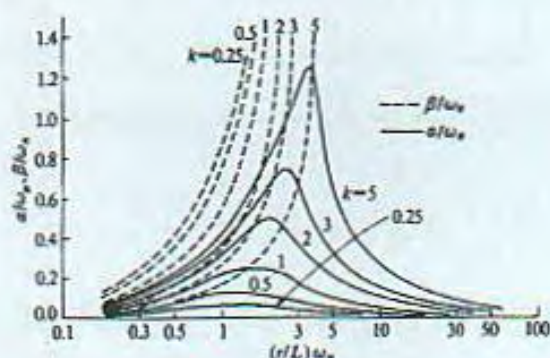
$$\beta^2 + \omega^2 + 2\alpha\beta = (1+k)\omega_n^2.$$

این روابط در شکل 4.7 بصورت نموداری بیان شده‌اند. مشاهده می‌شود که β/ω_n به ازای هر k در $(r/L)\omega_n$ ماکزیمم است. روابط مربوط به مقادیر ماکزیمم بصورت زیر می‌باشند:

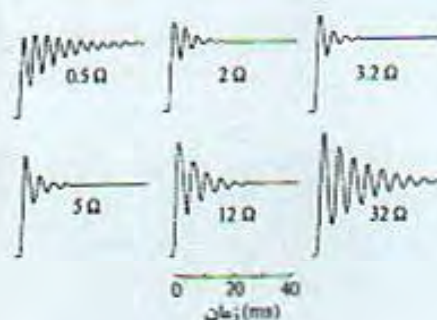
$$\beta/\omega_n = k/4, \quad \text{مقدار ماکزیمم} \quad (4.74)$$

$$(r/L)\omega_n = 1 + \frac{k}{2}, \quad \text{مقدار} \quad (4.75)$$

$$\alpha/\omega_n = 1. \quad \text{مقدار متناظر} \quad (4.76)$$



شکل ۴.۷. تغییرات پارامترهای میرایی α و β با پارامتر موتور k و پارامتر مدار r/L .
(طبق مرجع [1].)

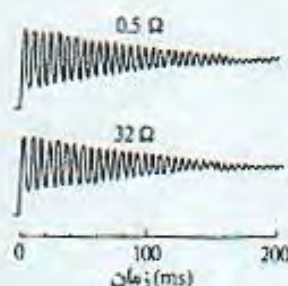


شکل ۴.۸. پاسخ‌های مکان - زمان اندازه‌گیری شده در یک موتور VR سه‌فاز با روش دو فاز در تحریک. (مطابق مرجع [1].)

در اکثر موتورهای مدرن k از مقدار واحد کمتر است و از اینرو β کمتر است؛ جمله اول حداقل چهار مرتبه سریعتر از جمله دوم در رابطه (۴.۶۹) میرا می‌شود. پس این β است که در زمان استقرار غالب است.

۴.۳.۳ آثار مقاومت‌های سری

نشان داده شد که مقاومت مدار برای به حداقل رساندن زمان استقرار در تحریک دوفاز از رابطه (۴.۷۵) بدست می‌آید و این در مورد موتور PM و VR صادق است. شکل ۴.۸ پاسخ‌های شاخص اندازه‌گیری شده در یک موتور VR سه‌فاز چند پشته‌ای را نشان می‌دهد. هنگامیکه یک مقاومت خارجی به هر فاز که مقاومت آن ۵٪ است متصل شود، زمان استقرار مینیمم است.

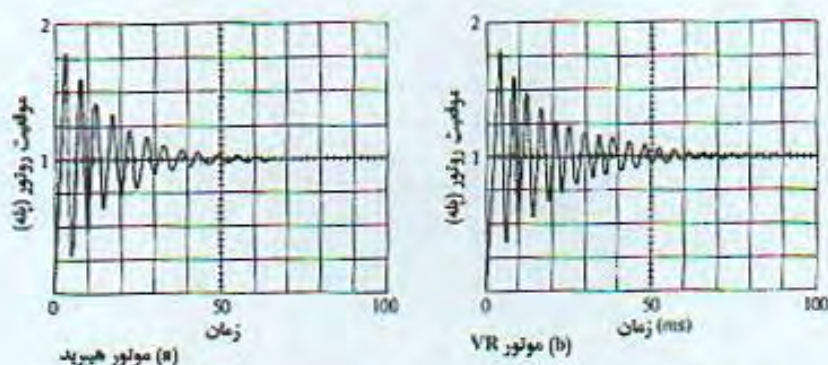


شکل ۴.۹. پاسخ‌های مکان - زمان اندازه‌گیری شده در روش یکفاز در تحریک.
(مطابق مرجع [1].)

نتایج درایو تک فاز مطابق شکل ۴.۹ می‌باشند، و کاملاً با پاسخ روش دوفاز در تحریک متفاوت هستند. اولاً میرایی خیلی کمتر است، و ثانیاً، مقدار مقاومت مدار استاتور هیچ اثر محسوسی روی میرایی ندارد. حقوق معنوی اصل دستیابی به میرایی خوب با طراحی بهینه امپدانس سیم‌پیچی یا اضافه کردن یک مقاومت مناسب به سیم‌پیچی متعلق به Hughes و Lawrenson می‌باشد.^[2] برای داشتن فرکانس راه‌اندازی ماکزیمم و نرخ چرخش ماکزیمم بهبود یافته در درایو دوفاز در تحریک، لازم است از مقادیر بزرگی برای مقاومت‌های خارجی استفاده کرد تا ثابت زمانی الکتریکی L/r به حداقل برسد. از اینرو باید بین میرایی خوب و نرخ پله بالا توازن برقرار شود. برای داشتن مشخصه‌های گشتاور - سرعت و میرایی خوب باید معیارهایی در مدار درایو رعایت شوند.

۴.۳.۴ مقایسه موتورهای PM و VR

عموماً اینطور پنداشته می‌شود که موتورهای پله‌ای VR از نظر میرایی از موتورهای PM نامرغوب‌تر هستند، به این خاطر که هیچ آهترایی ندارد. اما به نظر می‌رسد هیچ توضیح مشخصی برای اینکه چرا پارامتر k_p موتور PM لزوماً بزرگتر از k_v در موتور VR می‌باشد وجود ندارد. شکل ۴.۱۰ پاسخ‌های پله واحد اندازه‌گیری شده در یک موتور هیبرید (که نوع خاصی از موتور PM است) و یک موتور VR با زاویه پله $1/8^\circ$ را نشان می‌دهد.^[3] هر دو موتور اندازه یکسانی دارند، و اندازه‌گیری‌ها با m.m.f. یکسان با استفاده از مدار شکل ۵.۱۵ با $C=1\mu f$ و $E=247$ و R_e انجام شد تا جریان $1/5A$ حاصل شود. زمان استقرار در موتور VR کمی از زمان استقرار موتور هیبرید طولانی‌تر می‌باشد.



شکل ۴.۱۰. مقایسه مشخصه‌های میرایی بین یک موتور هیبرید و یک موتور VR در روش دو فاز در تحریک ماشین‌های مورد آزمایش: Sanyo Step-Syn 103-775-6 برای نوع هیبرید و معادل نوع VR آن، مدار درایو: شکل ۴.۱۱. $E = 24V$, $C = 1\mu f$, R_e طوری تنظیم شده تا در هر فاز $1/5A$ داشته باشیم.



شکل ۴.۱۱. منحنی مشخصه‌های گشتاور بر سرعت.

۴.۴ مشخصه‌های گشتاور بر سرعت

برای مشخص کردن رابطه گشتاور با سرعت یک موتور پله‌ای نمودار شکل ۴.۱۱ ارائه شده است. محور عمودی گشتاور و محور افقی نرخ پله^۱ می‌باشد. نرخ پله با سرعت متناسب است، ثابت تناسب یا پله بر دور به ساختار دندانه، تعداد فازها، و روش تحریک بستگی دارد. دو منحنی شکل منحنی گشتاور توقف و منحنی گشتاور چته که منحنی چرخش^۲ هم نامیده می‌شود، می‌باشند.

۴.۴.۱ مشخصه‌های گشتاور چته

منحنی گشتاور چته بر سرعت نشان دهنده بار گشتاوری - اصطکاکسی ماکزیمم است که یک موتور پله‌ای می‌تواند قبل از از دست دادن همزمانی در یک نرخ پله مشخص درایو کند. یک تنوری ساده ولی دقیق توسط Hughes و همکارانش^۴ برای مشخصه‌های چته در موتور

هیبرید دوفاز ارائه شد. ^[4] رئوس مطالب این تئوری در اینجا ارائه شده است. از روابط (۴.۱) و (۴.۲)، قرار می‌دهیم $p\lambda = \pi/2$ ، چون یک موتور دوفاز را در نظر داریم، رابطه گشتاور به شکل زیر بدست می‌آید

$$\tau = -nN_r\Phi_M \{i_A \sin(N_r\theta) + i_B \cos(N_r\theta)\}. \quad (4.77)$$

با صرفنظر از اندوکتانس متقابل M ، ولتاژها در روابط (۴.۶) و (۴.۷) اینطور بیان می‌شوند

$$v_A = ri_A + L \frac{di_A}{dt} - \frac{d}{dt}(n\Phi_M \sin N_r\theta) \quad (4.78)$$

$$v_B = ri_B + L \frac{di_B}{dt} - \frac{d}{dt}(n\Phi_M \sin N_r\theta). \quad (4.79)$$

مقاومت ترکیبی از مقاومت سیم‌پیچی‌ها با مقاومت خارجی اعمال شده می‌باشد؛ و اندوکتانس خودی L مستقل از موقعیت روتور در نظر گرفته می‌شود که، فرضی کاملاً منطقی برای موتورهای هیبرید است.

شکل موج ولتاژ در بسیاری از کاربردها، بطور مثال در درایو بامدار پل در شکل ۵.۲۲، مطابق شکل ۴.۱۲ مربعی می‌باشد. بخاطر سادگی در تحلیل، بهرحال، فرض می‌شود که فازها از یک منبع سینوسی دوفاز تغذیه می‌شوند، بطوریکه ولتاژهای فاز اینطور بدست می‌آیند

$$v_A = V \cos \omega t \quad (4.80)$$

$$v_B = V \cos(\omega t - \pi/2). \quad (4.81)$$

این روابط را می‌توان برای بدست آوردن عبارت گشتاور تولید شده توسط موتور در سرعتی متناظر با ω به اینصورت حل کرد

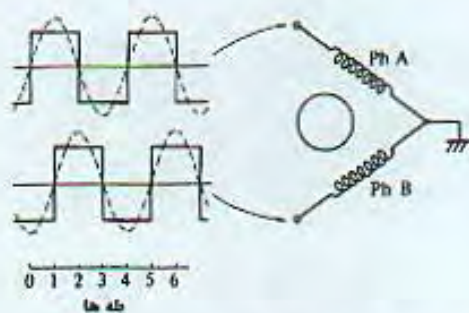
$$T = \frac{N_r n \Phi_M}{\sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)}} V \sin(\rho + v) - \frac{n^2 N_r \Phi_M^2 \omega r}{r^2 + \omega^2 L^2} \quad (4.82)$$

که

$$v = \tan^{-1}(r/\omega L). \quad (4.83)$$

در رابطه (۴.۸۲)، ρ زاویه گشتاور روتور می‌باشد، و گشتاور ماکزیمم یا چته T_p هنگامیکه ρ طوری است که $\rho + v = \pi/2$

$$T_p = \frac{nN_r\Phi_M V}{\sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)}} - \frac{n^2 N_r \Phi_M^2 \omega r}{r^2 + \omega^2 L^2}. \quad (4.84)$$



شکل ۴.۱۲. هنگامیکه یک موتور پله‌ای از یک مدار پله‌ای درایو می‌شود، ولتاژ موج مربعی دوفاز به فازها اعمال می‌شود. مولفه اصلی با منحنی‌های مقطع نشان داده شده‌اند.
(مطابق مرجع [4].)

اگر گشتاور چته را بصورت نسبی از گشتاورهای استاتیک نوک بیان کنیم، می‌توان ویژگی دو جمله را بهتر درک کرد.^۱ یعنی گشتاور در $\omega = 0$ از رابطه (۴۸۴) گشتاور استاتیک ماکزیمم اینستور بدست می‌آید

$$T_M = nN_r \Phi_M V/r = nN_r \Phi_M I_M \quad (4.85)$$

که I_M جریان نوک در هر فاز است. بنابراین گشتاور نرمالیزه برابر است با

$$\frac{T_p}{T_M} = -\frac{1}{\sqrt{(1+\omega^2(L/r)^2)}} - k_p \frac{\omega(L/r)}{1+\omega^2(L/r)^2} \quad (4.86)$$

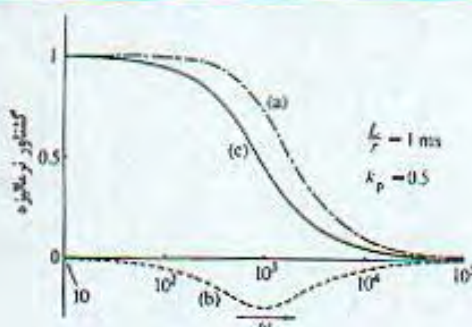
که

$$k_p = \frac{n\Phi_M}{L(V/r)} = \frac{n\Phi_M}{LI_M} \quad (4.87)$$

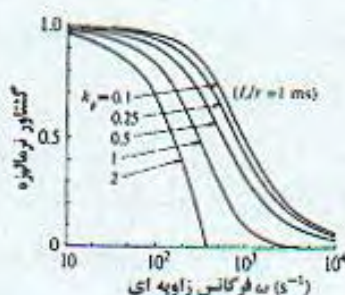
۴.۴.۲ پارامترهای کنترل کننده منحنی گشتاور - سرعت

عبارت نرمالیزه گشتاور در رابطه (۴۸۶) ساده و پر محتوا می‌باشد. اولاً، نشان می‌دهد که اگر موتوری دارای گشتاور استاتیک معلومی باشد، از اینرو گشتاور چته در یک سرعت یا ω معلوم تنها از روی دو پارامتر تعیین می‌شود؛ اولی ثابت زمانی استاتور (L/r) و دومی k_p می‌باشد که نسبت شار ناشی تولید شده توسط آهنربا به شار ناشی خودی (LI) سیم‌پیچی است. جمله اول رابطه (۴۸۶)، معکوس امپدانس سیم‌پیچی، دارای شکل کلی نشان داده شده توسط منحنی زنجیره‌ای (a) در شکل ۴.۱۳ می‌باشد، که تدریجاً در نرخ‌های پله بالاتر کاهش می‌یابد. جمله (منفی) دوم دارای شکل منحنی شکسته (b) می‌باشد. گشتاور متوجه، که با منحنی پیوسته (c) نشان داده شده، با جملات اول و دوم رابطه (۴۸۷) متفاوت می‌باشد.

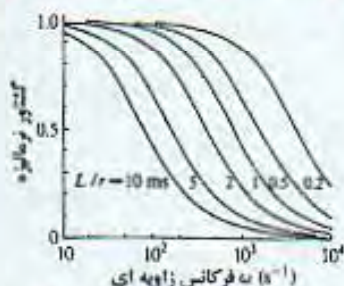
۱. گشتاور استاتیک نوک تعریف شده در اینجا دقیقاً با گشتاور نگهدارنده تعریف شده در بخش ۲.۶.۱ یکسان نیست.



شکل ۴.۱۳. منحنی مولفه‌های گشتاور چنته نرمالیزه.

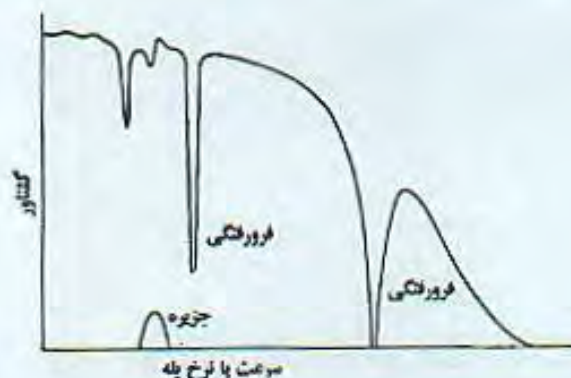


شکل ۴.۱۴. اثر k_p روی گشتاور چنته نرمالیزه. (مطابق مرجع [4]).



شکل ۴.۱۵. آثار L/r روی گشتاور چنته. (مطابق مرجع [4]).

در شکل ۴.۱۴ اثر k_p روی منحنی‌های گشتاور برای ثابت زمانی سیم‌پیچی $L/r = 1 \text{ ms}$ نشان داده شده است. منحنی‌های نشان می‌دهند که هر چه k_p کوچکتر باشد، گشتاور بزرگتر است. گفته می‌شود k_p که در اکثر موتورهای هیبرید در محدوده 0.2 تا 0.6 می‌باشد. این امر ناشی از اثر ترمز بیان شده توسط جمله دوم (منفی) می‌باشد که هر چه k_p بالاتر باشد، میرایی بهتر است. اثرات تغییر ثابت زمانی توسط مقاومت سری (و تغییر ولتاژ برای حفظ جریان و گشتاور استاتیک یکسان) در شکل ۴.۱۵ برای یک موتور هیبرید (نمونه) با $k_p = 0.25$ نشان داده شده‌اند. اضافه کردن یک مقاومت خارجی گشتاور چنته را در تمامی سرعتها افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، بهر حال، تلف حرارتی در مقاومت افزایش می‌یابد و میرایی کاهش می‌یابد.



شکل ۴.۱۶. مثالی از منحنی گشتاور چنته با فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها.

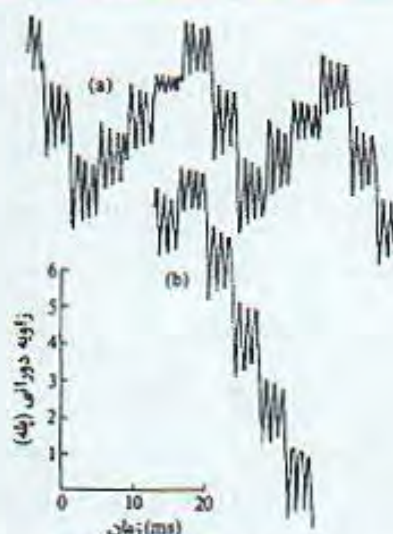
۴.۴.۳ مشخصه‌های توقف

منحنی گشتاور توقف بر سرعت ماکزیمم، گشتاور بار اصطکاکی را نشان می‌دهد که در آن یک موتور پله‌ای می‌تواند هنگامیکه یک قطار پالس با فرکانس متناظر اعمال می‌شود بدون هیچ عیبی حرکت کند. در تحلیل این عملکرد باید به اثر اینرسی همچون بار اصطکاکی توجه شود. یک تئوری اساسی توسط Lawrenson و همکارانش^[5] ارائه شده است، ولی در اینجا ارائه نمی‌شود. برای داشتن مشخصه‌های توقف خوب، چندین تکنیک مداری ابداع شده و بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موارد در فصل ۵ بررسی خواهند شد.

۴.۵ تشدیدها و ناپایداری‌ها

تئوری گشتاور توقف در بخش قبلی روی مدلی ساده با فرضیات آینده‌ال بیان شد. یکی از جنبه‌های مهمی که این تئوری به آن نمی‌پردازد تشدید و ناپایداری است که در سرعت‌های پله‌ای خاصی واقع می‌شود. ناپایداری و تشدید پدیده‌های نوسانی هستند که عملکرد طبیعی موتور پله‌ای را برهم می‌زنند. در برخی موارد دامنه نوسان با زمان افزایش می‌یابد و در نهایت موتور همزمانی را از دست می‌دهد. منحنی‌های گشتاور توقف واقعی در موارد بسیاری دارای فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی مطابق شکل ۴.۱۶ می‌باشند. اکثراً بر این باورند که فرورفتگی‌ها به دلایل مشابه با ناپایداری ظاهر می‌شوند.

تشدید و ناپایداری که در منحنی توقف ظاهر می‌شوند به سه دسته طبقه می‌شوند: تشدید فرکانس پایین، ناپایداری سطح میانی و نوسان سطح بالا. بعلاوه، نوع دیگری از ناپایداری در آغاز حرکت وجود دارد. به این معنی که، یک موتور پله‌ای نمی‌تواند بطور نرمال با بعضی از بارها در نرخ پله‌ای خاص راه‌اندازی شود. این نواحی با فرورفتگی‌ها در منحنی گشتاور توقف نشان داده شده‌اند.



شکل ۴.۱۷. مثالی از حرکت بی‌قاعده ناشی از تشدید در یک موتور VR چند پشته‌ای. (مطابق مرجع [6]). (a) رفتار تشدید در ۲۵Hz (b) شروع حرکت معکوس پایدار با سرعت دو برابر در ۲۶Hz.

۴.۵.۱ تشدید فرکانس پایین^۱

هنگامیکه یک موتور پله‌ای با سرعتی پایین شروع به حرکت می‌کند و فرکانس پالس به آرامی افزایش می‌یابد، تشدیدها ابتدا در هارمونیکهای فرعی فرکانس طبیعی واقع می‌شوند که معمولاً در حدود ۱۰۰Hz می‌باشد. پس یک تشدید بزرگ در فرکانس طبیعی و در حدود آن ظاهر خواهد شد. این نوسانات در فرکانس پایین‌تر از ۲۰۰Hz اتفاق می‌افتند و تشدیدهای فرکانس پایین نامیده می‌شوند. شکل ۴.۱۷ دو مثال از حرکت بی‌قاعده ناشی از تشدید اندازه‌گیری شده^[۶] در یک موتور VR سه پشته‌ای ۷/۵° را نشان می‌دهد. منحنی‌ها آثار اندازه‌گیری شده موقعیت لحظه‌ای روتور بر حسب زمان می‌باشند: (a) مشخصه انواع بی‌قاعده حرکت است که هنگام نزدیک بودن عملکرد به فرکانس تشدید (۲۵Hz در این مورد) را نشان می‌دهد. فرکانس طبیعی نوسان در این مورد در حدود ۱۰۰Hz می‌باشد. همانطور که فرکانس به بالاتر از فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد، دامنه نوسان کاهش یافته و پایدار می‌شود.

در اکثر کارهای عملی تشدیدهای فرکانس پایین بطور بحرانی عملکرد سیستم‌های موتور پله‌ای را محدود نمی‌کنند زیرا اکثر ترکیب‌های بار/موتور را می‌توان بطور لحظه‌ای در نرخ‌های پله بالاتر از فرکانس طبیعی راه‌اندازی کرد.

1- low - frequency resonance

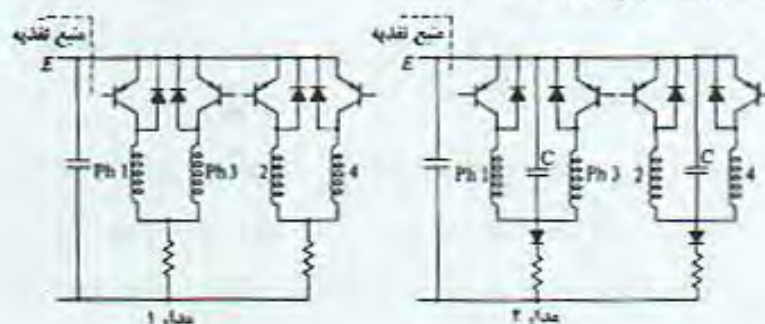
۴.۵.۲ ناپایداری سطح میانی^۱

هنگامیکه نرخ پله به محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ Hz افزایش می‌یابد، موتورهای پله‌ای ویژگی‌های رفتاری مشکل‌آفرینی از خود نشان می‌دهند که از نوع تشدید فوق‌الذکر نیستند و ناشی از ناپایداری ذاتی در موتور یا سیستم درایو موتور می‌باشند. این نوع از نوسان در موتورهای پله‌ای به نام 'تشدید سطح میانی' یا 'ناپایداری سطح میانی' خوانده می‌شود. فرکانس این رفتار نوسانی کاملاً از فرکانس طبیعی متفاوت می‌باشد، اما $\frac{1}{4}$ یا $\frac{1}{5}$ نرخ پله می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در بکارگیری یک موتور پله‌ای در سیستمی ظاهر می‌شود چگونگی جلوگیری یا از بین بردن این نوع از ناپایداری است. مشخصه‌های ناپایداری سطح میانی بسیار ساده نیستند، و دیدگاهها در مقالات و کتابها متفاوت می‌باشند. بر اساس مقاله‌ای^[۷] از Ward و Lawrenson این نوع از ناپایداری دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

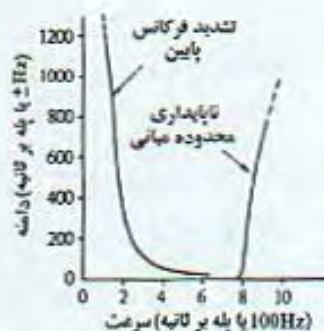
- (i) نوسان یک یا چندین مولفه فرکانسی دارد. آنها بسادگی به نرخ پله مربوط نمی‌شوند، معمولاً در یک فرکانس نسبتاً پایین، مثلاً در محدوده ۵-۲۰۰ Hz می‌باشند.
- (ii) در شرایط کاری ثابت، با اینکه ممکن است همزمانی از بین برود، معمولاً نوساناتی وجود دارند که به آرامی در پررود چندین ثانیه یا حتی دقیقه قبل از اینکه نهایتاً حرکت مختل شود، ایجاد شده‌اند.
- (iii) مشخصه‌های مختلف ناپایداری بصورتی پیچیده به نوع درایو و روش عملکرد بستگی دارند؛ بطور مثال روش تمام یا نیم پله.
- (iv) اندازه فرورفتگی گشتاور و ظرفیت حرکت در سرعت‌های بالا به مقدار میرایی مکانیکی بسیار حساس می‌باشند. اغلب با میرایی کافی می‌توان فرورفتگی‌ها را 'یکساخت کرد'^۲ یا محدوده سرعت را گسترش داد.

(v) اینرسی پارامتر مهمی می‌باشد؛ اینرسی‌های بزرگ معمولاً مشکل را تقویت می‌کنند. G.Singh و همکارانش^{[۹]، [۸]} مشخصه‌های ناپایداری سطح میانی و روشهای حذف آن از طریق تکنیکهای مداری را مورد مطالعه قرار دادند. برخی از نتایج در اینجا به اختصار آورده شده‌اند. موتور مورد استفاده در مطالعات یک موتور هیبرید با سیم‌پیچی دو رشته‌ای $1/8^\circ$ ساخته شده برای عملکردی با ۴A بر فاز می‌باشد. گشتاور نگهدارنده با تحریک دوفاز در جریان نامی برابر ۲/۱ Nm می‌باشد، و اینرسی روتور $1/23 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ است. در مرجع [۸] چهار درایو مختلف بکار رفته در اندازه‌گیری نشان داده شده‌اند، و دو عدد از آنها مطابق شکل ۴.۱۸ می‌باشند. شکل‌های ۴.۱۹ و

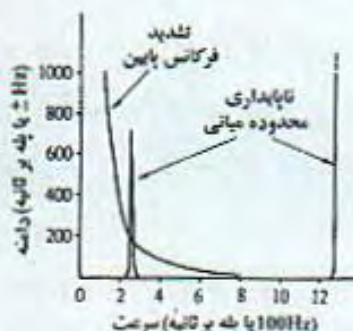
۴.۲۰ نمودارهای دامنه نوسان بر نرخ پله به هنگام کار موتور بدون بار را نشان می‌دهند. منحنی‌های تشدید فرکانس پایین نوسانات ۱:۱ (نرخ پله)، در ارتباط با فرکانس طبیعی، را نشان می‌دهند. فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده از پاسخ پله واحد برای مدارهای ۱ و ۲ بترتیب ۱۴۳Hz و ۱۴۸Hz می‌باشند. عدم همزمانی در هر دو مدار در محدوده ۱۲۰-۱۱۸Hz اتفاق افتاد. دامنه تشدید فرکانس پایین بطور یکساخت کاهش می‌یابد تا اینکه در حدود ۶۰۰Hz قابل صرف‌نظر می‌شود. در این محدوده سرعت موتور همزمانی را بصورت پایدار حفظ می‌کند و می‌تواند گشتاور بار خوبی را به نسبت قابلیت‌هایش ارائه کند.



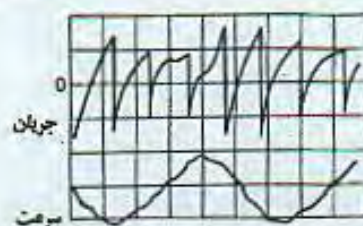
شکل ۴.۱۸. دو مدار درایو.



شکل ۴.۱۹. دامنه نوسانات در حالت درایو ۱. (مطابق مرجع [8]).



شکل ۴.۲۰. دامنه نوسانات در حالت درایو ۲. (مطابق مرجع [8]).



شکل ۴.۲۱. شکل موج جریان و سرعت به هنگام درایو شدن از درایو ۱ در 850 Hz . پرپود تغییرات سرعت در حدود چهار برابر بازه پالس می‌باشد: مقیاس عمودی؛ 2 A/div ، 556 Hz/div (مطابق مرجع [8]).

همانطور که از شکل‌های ۴.۱۹ و ۴.۲۰ روشن است، نرخ پله‌هایی که در آنها ناپایداری فرکانس میانی ظاهر می‌شود برای درایوهای ۱ و ۲ متفاوت می‌باشند. در درایو ۱ ناپایداری در 760 Hz شروع می‌شود، اما همزمانی تا 900 Hz ادامه می‌یابد. از طرف دیگر در درایو ۲، یک نوک^۱ در 260 Hz ظاهر می‌شود، اما این نوسان در محدوده فرکانسی بسیار باریکی اتفاق می‌افتد و منجر به عدم همزمانی نمی‌شود. ناپایداری با دامنه‌ای بزرگ بطور ناگهانی در 1275 Hz ظاهر می‌شود و همزمانی از دست می‌رود. فرکانس آن نوسانات در این محدوده $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{4}$ نرخ پله می‌باشد. شکل موجهای جریان و سرعت در شکل ۴.۲۱ نشان داده شده‌اند.

۴.۵.۳ آثار تغییرات پارامتر - سیستم روی ناپایداری‌ها

نتایجی که تاکنون ارائه شدند برای یک موتور بی‌بار بوده‌اند. آثار تغییرات سیستم روی یک موتور باردار اینطور گزارش^[9] شده‌اند:

- (i) گشتاور بار. در حالت درایو ۱ وقوع ناپایداری سطح میانی به هنگام اعمال بار کمی به تأخیر می‌افتد، در حالیکه در حالت درایو ۲ وقوع آن پیش می‌افتد.
- (ii) اینرسی بار. وجود اینرسی بار اثری مخالف با گشتاور بار دارد. به این معنی که، در درایو ۱ ناپایداری سطح میانی زودتر اتفاق می‌افتد در حالیکه در درایو ۲ با وجود بار به تأخیر می‌افتد.
- (iii) مقاومت سری. ولتاژهای درایو بالاتر و مقاومت‌های سری بزرگتر عملکرد هردو درایو را در فرکانس سطح میانی بهبود می‌بخشند.
- (iv) خازن. در حالت درایو ۲، هرچه خازن C کوچکتر باشد، درایو بهتر عمل می‌کند. اما مقادیر کوچکتر C مقدار نوک ولتاژ کلکتور - امیتر V_{CE} را افزایش می‌دهند که این ولتاژ باید توسط

1- peak

ترانزیستورها در فازهای off تحمل شود.

(۷) میراکننده‌ها^۱ اگر قرار باشد تا از محدوده میانی بدون از دست دادن همزمانی عبور کنیم، موتور باید بطور مناسب درایو شود یا اینکه باید از یک میراکننده اینرسی استفاده کرد. با اینکه میراکننده‌ها اثر بدی روی پاسخ زمانی می‌گذارند، اما اگر پاسخ‌های بزرگ مورد نظر نباشد برای گذر از ناپایداری‌های سطح میانی مفید هستند. هنگامیکه کاربرد یک میراکننده مطلوب نیست، طرح درایو و افزایش سرعت مناسب ضروری می‌باشد. برای این منظور پیشنهاد می‌شود مرجع [9] مورد مطالعه قرار گیرد.

۴.۵.۴ نوسانات سطوح بالاتر

اگر فرکانس بیشتر افزایش داده شود و موتور در ناپایداری‌ها سطح میانی بطور موفقیت آمیز افزایش سرعت یابد، ناحیه بعدی ناپایداری در محدوده ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ Hz می‌باشد. اما هیچ گزارشی وجود ندارد که دال بر این نوع نوسان باشد.

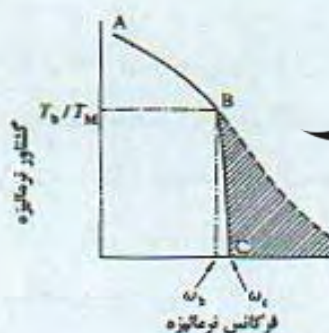
۴.۵.۵ تئوری ناپایداری

تئوری‌های چندی در مورد ناپایداری وجود دارد. اما تئوری ارائه شده توسط Lawrenson Hughes در سال ۱۹۷۹ دارای مطالب مشابه با مطالب این فصل می‌باشد و در مورد مکانیزم اساسی ناپایداری و آثار میرایی اطلاعات خوبی می‌دهد. با اینکه توجه ما روی تئوری موتورهای هیبرید^۲ ۱/۸ متمرکز شده، اینطور تصور می‌شود که امکان استخراج نتایج مشابه برای موتورهای VR به علت شباهت معادلات دینامیک موتورهای PM و VR وجود دارد.

(i) میرایی چسبندگی صفر^۳. هنگامیکه ضریب میرایی D صفر است، اثر کلی آن روی منحنی گشتاور شرایط ناپایداری در شکل ۴.۲۲ نشان داده شده است. گشتاور ماکزیمم حالت پایدار منحنی گشتاور چپته را تا نقطه B دنبال می‌کند، نقطه شکست، اما وقتی که ناهمگرا می‌شود، محدوده ناپایداری (پائین‌تر) جدیدی را تا نقطه C دنبال می‌کند. ناحیه هاشور زده در شکل ۴.۲۲ ناحیه ناپایدار را نشان می‌دهد. توجه کنید که بدون میرایی چسبندگی این تئوری اینچنین فرورفتگی گشتاور را نمی‌تواند تخمین بزند، اما در عوض، موتور برای کار در هر فرکانسی بالاتر از ω_c ناتوان است. تحلیل نشان می‌دهد که فرکانس شکست از فرمول ساده زیر بدست می‌آید

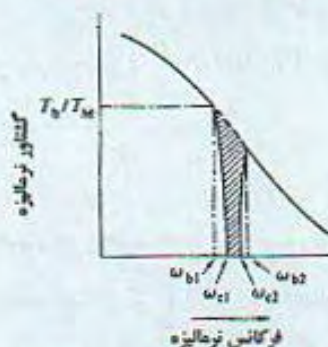
$$\omega_b = R/L \quad (4.88)$$

که متناظر با نرخ پله $2R/\pi L$ می‌باشد. از یک موتور هیبرید^۲ ۱/۸ و درایو نمونه انتظار می‌رود دارای ثابت زمانی خالصی در حدود ۱ تا ۵ms باشد، که نقاط شکست بین ۶۴۰ و ۱۲۸۰ Hz واقع می‌شوند.



POWEREN.IR

شکل ۴.۲۲. منحنی گشتاور چننه به ازای میرایی صفر. (مطابق مرجع [10]).



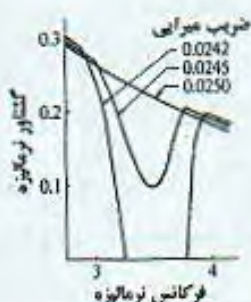
شکل ۴.۲۳. منحنی گشتاور چننه با میرایی. (مطابق مرجع [10]).

شیب منحنی BC بستگی به پارامترهای دیگر و r دارد. برای اینرسی‌های کل بزرگ (یعنی چند برابر اینرسی موتور) و یا مقادیر بزرگ r ، منحنی BC تقریباً عمودی می‌شود. و هرچه مقدار k_p کوچکتر باشد، خط BC شیب بیشتری دارد. گشتاور در فرکانس شکست، T_b ، اینطور بدست می‌آید

$$T_b/T_M = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{k_p}{2} \quad (4.89)$$

که T_M گشتاور استاتیکی ماکزیمم بدست آمده از رابطه (۴.۸۸) می‌باشد.

(ii) میرایی چسبندگی و فرورفتگی‌های گشتاور. هنگامیکه $D \neq 0$ ، به این معنی است که میرایی چسبندگی برای ناحیه پایدار دوم که در فرکانسهای بالاتر واقع می‌شود مجاز است، به این معنی که یک فرورفتگی همانطور که در عمل مشاهده شد ظاهر می‌شود (شکل ۴.۲۳). برای ورود به این ناحیه پایدار سرعت بالا نیاز به میرایی نسبتاً کوچکی می‌باشد، و غالباً سکون و اصطکاک هوا کافی خواهد بود. اگر میرایی به اندازه کافی وجود داشته باشد، این تئوری نشان می‌دهد که فرورفتگی گشتاور را می‌توان بکلی از بین برد.



شکل ۴.۲۴. تغییرات فرورفتگی‌های گشتاور به همراه ضرایب میرایی. (مطابق مرجع [10]).

در میرایی چسبندگی^۱ دو فرکانس شکست ω_{b1} ، ω_{b2} وجود دارند. فرکانس شکست ω_{b1} کمی بالاتر از فرکانس شکست ω_b به ازای $D=0$ واقع می‌شود، در حالیکه پهنای فرورفتگی با افزایش D کاهش می‌یابد. شکل و اندازه فرورفتگی شدیداً به میرایی وابسته است، مطابق نمودار بزرگ شده منحنی‌ها در شکل ۴.۲۴، که حالت‌های $k_p=0.4$ و $r/\omega_n L=2$ را نشان می‌دهند. شرط مهم کفایت میرایی برای حذف فرو رفتگی اینطور بدست می‌آید

$$D \geq \frac{1}{8} \frac{J \omega_n^2 k_p}{R/L}. \quad (4.90)$$

۴.۶ میراکننده‌های مکانیکی

در کاربرد موتورهای پله‌ای نامطلوب است که عملکرد نرمال با تشدید یا ناپایداری مختل شود. یکی از روشهای میرا کردن ناپایداری‌ها تزویج یک میراکننده مکانیکی به محور موتور است. در این بخش انواع میراکننده‌های مکانیکی، اثرات آنها، و تئوری اساسی میراکننده‌ها ارائه می‌شود.

۴.۶.۱ ساختار میراکننده‌ها

انواع مختلفی از میراکننده‌ها وجود دارند اما پرکاربردترین آنها میراکننده‌های اینرسی فتری - اصطکاکی^۳ (شکل ۲.۲۵)، میراکننده‌های اینرسی آهنربایی - اصطکاکی^۴ (۴.۲۶)، و میراکننده‌های اینرسی تزویج شده با چسبندگی^۵ یا VCIDها (شکل ۴.۲۷) می‌باشند. میراکننده فتری - اصطکاکی شامل یک چرخ اینرسی می‌شود که آزاد است دور محور بچرخد و بین دو صفحه اصطکاک قرار گرفته است که یکی به محور ثابت شده است. فشار بین دیسک و صفحه اصطکاک بوسیله فتری که قابل تنظیم

1- visuous damping

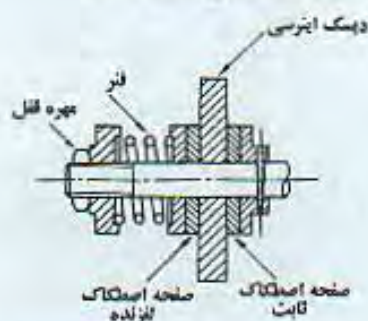
2- dampers

3- spring - friction inertial

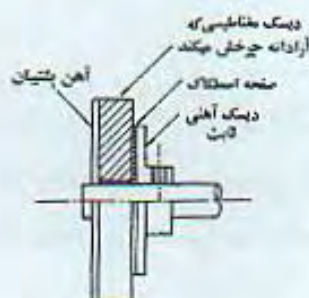
4- magnet - friction inertial

5- viscously - coupled inertial

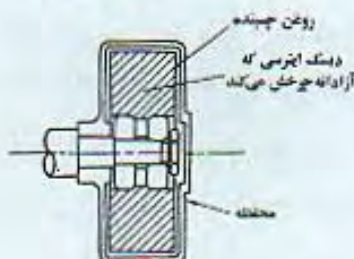
است حفظ می‌شود تا میرایی بهینه بدست آید. میراکننده آهنربایی شامل یک دیسک هرزگرد^۱ از جنس آهنربای فریت^۲ و یک دیسک فولادی که مستقیماً به روتور تزویج شده می‌شود. بین دو دیسک یک صفحه اصطکاک قرار گرفته است، و یک دیسک آهنی پشتیبان روی آهنربا ثابت شده است تا سیری برای شار فراهم شود. فشاری توسط نیروی جذب کننده آهنربا بین دیسک‌ها و صفحه اصطکاک بوجود می‌آید. VCID شامل یک چرخ اینرسی درون یک محفظه استوانه‌ای می‌شود. قطعات می‌توانند به راحتی نسبت به یکدیگر بچرخند، اما فضای حلقوی بین آنها کوچک است و با سیال سیلیکونی پر شده است بطوریکه هر حرکت نسبی منجر به نیروهای سکون در هر دو قطعه می‌شود. در عملکرد یک موتور پله‌ای، محفظه بیرونی محکم به محور روتور تزویج شده است.



شکل ۴.۲۵. میراکننده اینرسی فنی - اصطکاکی



شکل ۴.۲۶. میراکننده اینرسی آهنربایی - اصطکاکی



شکل ۴.۲۷. میراکننده اینرسی تزویج شده با چسبندگی

۴.۶.۲ آثار میراکننده‌ها

فرض می‌کنیم که روتور می‌چرخد و نوسان می‌کند. اگر چرخ اینرسی دارای اینرسی بزرگی باشد، با یک سرعت ثابت خواهد چرخید و تغییرات جزئی بین سرعت نوسان روتور و چرخ اینرسی، ظاهر خواهد شد. چسبندگی یا اصطکاک در مقابل هر تغییر جزئی سرعت از خود مقاومت نشان می‌دهد و نوسان را حذف می‌کند. به این دلیل، هرچه اینرسی چرخ گردان بزرگتر باشد، میرایی بهتر است. از طرف دیگر یک چرخ اینرسی بزرگ توانایی افزایش سرعت و کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. بهینه‌سازی اینرسی یک میراکننده مساله مهمی است.

توضیح تحلیلی ساده‌ای در مورد اثر میراکننده را میتوان با استفاده از تابع تبدیل رابطه (۴.۶۸) ارائه کرد، که به پاسخ شاخص نشان داده شده در شکل ۴.۵ اشاره میکند. اگر اینرسی چرخ گردان بزرگ باشد، انتظار می‌رود که چرخ تقریباً در قسمت ابتدایی پاسخ شاخص پایدار باشد، به این معنی که ضریب چسبندگی D سیستم بزرگ است. در نتیجه ضریب میرایی τ_m بزرگ است و پاسخ شاخص کمتر نوسانی می‌شود.

۴.۶.۳ تئوری میراکننده‌ها

توضیح بالا کیفی است و فرض بر این است که اینرسی چرخ گردان خیلی بزرگ است. در واقع اینرسی چرخ گردان باید به‌خوبی انتخاب شود. ما در اینجا اثر VCID را به‌طور کیفی تحلیل می‌کنیم. گشتاور بوجود آمده در موتور که از رابطه (۴.۶۲) بدست می‌آید، به‌این شکل نوشته می‌شود

$$\tau_m = E_m(\theta_i - \theta_o) \quad (4.91)$$

که

$$E_m = K_T I_M N_r \quad (4.92)$$

θ_i = موقعیت مطلوب روتور

θ_o = موقعیت واقعی روتور

می‌باشند.

معادله حرکت روتور برابر است با

$$(J_m + J_{di}) \ddot{\theta}_o = \tau_m - \tau_d \quad (4.93)$$

که J_m = اینرسی روتور

J_{di} = اینرسی محفظه میراکننده

می‌باشند.

گشتاور چسبندگی اعمال شده به محفظه τ_d اینطور بدست می‌آید

$$\tau_d = D(\dot{\theta}_o - \dot{\theta}_{do}) \quad (4.94)$$

که θ_{do} = موقعیت چرخ‌گردان اینرسی می‌باشد. معادله حرکت چرخ اینرسی عبارتست از

$$J_{do} \ddot{\theta}_{do} = \tau_d \quad (4.95)$$

این روابط یک سیستم از مرتبه سوم را تعریف می‌کنند و توسط Kingham و Lawrenson حل شده‌اند.^[11] عملکرد پله واحد با شرایط اینرسی صفر، پاسخ ترکیب روتور / محفظه می‌راکنده را بر حسب تبدیل لاپلاس اینطور بیان می‌کند:

$$G(s) = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{E(K+s)}{s^3 + K(1+J)s^2 + Es + EK} \quad (4.96)$$

که

$$E = E_m / (J_m + J_{di}) \quad (4.97)$$

$$K = D / J_{do} \quad (4.98)$$

$$J = J_{do} / (J_m + J_{di}) \text{ = نسبت اینرسی بدست آمده از } \quad (4.99)$$

می‌باشد.

پاسخ شاخص از رابطه (4.96) اینطور بدست می‌آید

$$\theta_o(t) = \theta_i \left\{ 1 - Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi) \right\} \quad (4.100)$$

که

$$A = J/4 \quad (4.101)$$

$$B = \frac{1}{4} \sqrt{\left[\frac{15J^4 + 72J^3 + 64J^2 + 128J + 256}{-J^2 + 8J + 16} \right]} \quad (4.102)$$

$$\omega = \frac{1}{4} \sqrt{\left[\frac{E(-J^2 + 8J + 16)}{J + 1} \right]} \quad (4.103)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{4J(J+2)}{(J+4)\sqrt{(-J^2 + 8J + 16)}} \quad (4.104)$$

با

$$\alpha + 2\beta = K(J+1) \quad (4.105)$$

و β در رابطه زیر صدق می‌کند

$$8\beta^3 - 8K(J+1)\beta^2 + 2\{K^2(J+1)^2 + E\}\beta - EKJ = 0. \quad (4.106)$$

از این روابط ایده اساسی لازم برای بهینه‌سازی میراکننده بدست می‌آید. به خوانندگانی که به جزئیات آن علاقه مند هستند توصیه می‌شود که مرجع [11] را مطالعه کنند. اما برخی از جنبه‌های مهم آن در اینجا ارائه خواهد شد.

برای اکثر کاربردهای موتور، مطلوب است که تا حد ممکن به یک میرایی سریع در نوسانات برسیم. این موضوع به مقدار ماکزیمم ممکن β نیازمند است، که اگر بتوانیم به آن بدون اینکه باعث مقدار بزرگ α شود برسیم (که ظهور پاسخ آرام غیر قابل قبولی را نشان می‌دهد)، به پاسخ کلی خوبی می‌توان دست یافت. با دیفرانسیل‌گیری از معادله (4.106) نسبت به K ، و با در نظر گرفتن $d\beta/dK=0$ برای بدست آوردن β ماکزیمم، داریم

$$K = \frac{8\beta^2(J+1) + EJ}{4\beta(J+1)^2} \quad (4.107)$$

و با جایگذاری در رابطه (4.106)

$$\beta_{max} = \frac{J}{4} \sqrt{\left[\frac{E}{J+1} \right]} \quad (4.108)$$

متناظر با این، از رابطه (4.105)

$$\alpha = \sqrt{\left[\frac{E}{J+1} \right]} \quad \beta_{max} \text{ به ازای } (4.109)$$

و از رابطه (4.107)

$$K = \frac{J+2}{2(J+1)} \sqrt{\left[\frac{E}{J+1} \right]} \quad \beta_{max} \text{ به ازای } (4.110)$$

همچنین، از رابطه (4.108) و (4.109)

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{J}{4} \quad (4.111)$$

نشان می‌دهد، همانطور که ما انتظار داشتیم، نیازی به بزرگ بودن β نیست.

می‌توان نشان داد که پاسخ غیر نوسانی است اگر که نسبت اینرسی J در نامساوی زیر صدق کند

$$J^2 - 8J - 16 \geq 0 \quad (4.112)$$

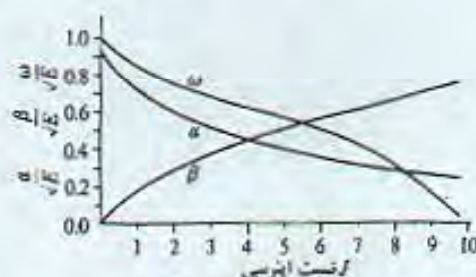
یا

$$J \geq 4(1 + \sqrt{2}) \approx 9.66. \quad (4.113)$$

بهر حال غیر عملی است چون چنین نسبت اینرسی بزرگی نرخ افزایش سرعت را کاهش می‌دهد. یک مقدار بهینه عملی را می‌توان وقتی $\alpha = \beta$ و $J = 4$ انتظار داشت. شکل ۴.۲۸ نمودارهای α ، β و ω را بعنوان توابعی از J نشان می‌دهد. همانطور که نسبت اینرسی J با افزایش β افزایش می‌یابد، α کاهش می‌یابد. این ایده‌ای در بهینه سازی سیستم است تا داشته باشیم $\alpha = \beta$ که در ناحیه‌ای واقع می‌شود که J زیاد بزرگ نیست. Lawrenson و Kingham^[11] ثابت کردند که $J = 4$ هم یک شرط بهینه معقول برای مدلی از مشخصه واقعی گشتاور غیر خطی بر جابجایی می‌باشد.

مقدار بهینه D ، $J = 4$ در تئوری خطی برابر است با

$$D = \frac{J+2}{2(J+1)} \sqrt{\left(\frac{J}{J+1}\right)} \sqrt{(E_m J_{do})} = 0.54 \sqrt{(E_m J_{do})}. \quad (4.114)$$



شکل ۴.۲۸. تغییرات α ، β و ω با نسبت اینرسی J . (مطابق مرجع [11].)

مراجع فصل ۴

- [1] Hughes, A. and Lawrenson, P. J. (1975). Electromagnetic damping in stepping motors. *Proc. IEE* 122, (8) 819-24.
- [2] Hughes, A. and Lawrenson, P. J. (1978). UK Patent No. 1,523,348.
- [3] Kenjo, T. and Niimura, Y. (1979). *Fundamentals and applications of stepping motors*. (In Japanese.) p. 111. Sogo Electronics Publishing Co., Tokyo.
- [4] Hughes, A., Lawrenson, P. J., and Davies, T. S. (1976). Factors determining high-speed torque in hybrid motors. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Devices*. University of Leeds, pp. 150-7.

- [5] Lawrenson, P. J., Hughes, A., and Acarnley, P. P. (1976). Starting/stopping rates of stepping motors: Improvement and prediction. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds, pp. 54-60.
- [6] Lawrenson, P. J. and Kingham, I. E. (1977). Resonance effects in stepping motors. *Proc. IEE* 124, (5), 445-8.
- [7] Ward, P. A. and Lawrenson, P. J. (1977). Backlash, resonance and instability in stepping motors. *Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. 73-83.
- [8] Singh, G., Leenhouts, A. C., and Mosel, E. F. (1976) Electromagnetic resonance in permanent-magnet step motor drive system. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds, pp. 115-24.
- [9] Leenhouts, A. C. and Singh, G. (1977). An active stabilization technique for open loop permanent-magnet step motor drive system. *Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. 19-24.
- [10] Hughes, A. and Lawrenson, P. J. (1979). Simple theoretical stability criteria for 1.8° hybrid motors. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*. University of Leeds, pp. 127-35.
- [11] Lawrenson, P. J. and Kingham, I. E. (1975). Viscously coupled inertial damping of stepping motors. *Proc. IEE* 122, (10), 1137-40.

سیستم درایو و مدار کنترل حلقه - باز موتورهای پله‌ای



یکی از مهمترین مسائل در کاربرد موتور پله‌ای سیستم درایو می‌باشد. سیستم‌های درایو به طرح‌های حلقه - باز و حلقه - بسته طبقه‌بندی می‌شوند. این فصل سیستم درایو حلقه - باز را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۵.۱ سیستم درایو

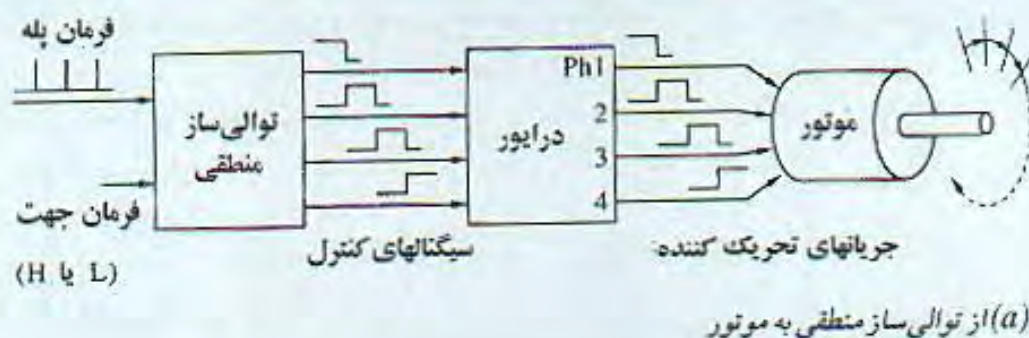
یک سیستم درایو ساده برای یک موتور پله‌ای با بلوک دیاگرام در شکل ۵.۱ نشان داده شده است، تعداد فازها در این مثال چهار می‌باشد. بلوک دیاگرام برای راحتی در تشریح به دو بخش تقسیم شده است. شکل ۵.۱(a) بخش توالی ساز منطقی^۱ به موتور را نشان می‌دهد. هنگامیکه یک پالس فرمان پله به توالی ساز منطقی اعمال می‌شود، حالات ترمینال‌های خروجی تغییر می‌کنند تا درایور موتور را طوری کنترل کنند که موتور را به اندازه یک زاویه پله در جهت فرمان داده شده بچرخاند. جهت چرخش از حالت منطقی در ورودی جهت مشخص می‌شود، بطور مثال سطح H برای جهت CW (ساعتگرد) و سطح L برای جهت CCW (عکس ساعتگرد). در برخی کاربردها توالی ساز منطقی تک جهته است، و هیچ ترمینال سیگنال جهتی^۲ ندارد. اگر یک نمو در حرکت با یک پله انجام شود، بلوک دیاگرام ۵.۱(a) کل سیستم را نشان می‌دهد. اما، وقتی یک نمو در حرکت با دو یا چند پله انجام شود، طبقه دیگری برای تولید یک قطار پالس مناسب لازم است تا قبل از توالی ساز منطقی قرار گیرد، و این در شکل ۵.۱(b) نشان داده شده است این مدار منطقی در این کتاب به نام 'کنترلر ورودی' نامیده می‌شود. در کاربردهای پیچیده کار کنترلر ورودی توسط یک ابزار الکترونیکی هوشمند مانند ریز پردازنده انجام می‌شود که قطار پالسی را برای افزایش سرعت، چرخش و کاهش سرعت در موتور بصورت بسیار کارا و قابل اطمینان تولید می‌کند. در این فصل ابتدا جزئیات توالی سازهای پالس بررسی شده‌اند، سپس در پی آن بررسی درایورهای قدرت و کنترلرهای ورودی آمده است. در پایان مثالی از کاربرد ریزپردازنده در کنترل حلقه - باز ارائه خواهد شد.

۵.۲ توالی سازهای منطقی

توالی ساز منطقی یک مدار منطقی است که ترتیب تحریک سیم‌پیچی‌ها را در پاسخ به پالسهای فرمان پله کنترل می‌کند. یک توالی ساز منطقی معمولاً از یک شیفتر رجیستر و گیت‌های منطقی همچون NANDها و NORها و غیره تشکیل شده است. اما می‌توان یک توالی ساز منطقی را برای

1- logic sequencer

2- direction - signal terminal



شکل ۵.۱. بلوک دیاگرام سیستم درایو یک موتور پله‌ای.

منظور خاصی با ترکیب مناسب تراشه فلیپ فلاپ J-K^۱ (JK-FF) و تراشه های گیت منطقی در یک جا مجتمع کرد. توابع اساسی گیتها و JK-FF در جدول ۵.۱ خلاصه شده اند. بجای ساختن یک توالی ساز با تراشه های IC مجزا یا / و یک شیفت رجیستر، توالی سازهای منطقی با کاربرد خاص^۲ برای موتورهای پله ای موجود می باشد.




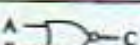
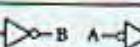
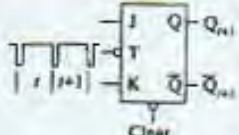
در این بخش تعدادی توالی سازهای منطقی که با ICهای TTL مجتمع شده اند ارائه خواهند شد، و سپس یک توالی ساز یونیورسال از نوع CMOS بررسی شده است.

۵.۲.۱ تحریک دوفاز در تحریک برای موتور دوفاز

دو نوع ساده از توالی ساز را می توان تنها با دو JK-FF ساخت، مطابق شکل ۵.۲ برای حالت تک جهته. جداول درستی ترتیب منطقی در همان شکل برای هر دو جهت چرخش (CCW, CW) آورده شده اند. تناظر بین ترمینالهای خروجی توالی ساز و سیم پیچی های فاز تحت کنترل عبارتند از:

Q1	PhA
$\overline{Q1}$	\overline{PhA}
Q2	PhB
$\overline{Q2}$	\overline{PhB}

جدول ۵.۱ گیت‌های منطقی و توابع آنها

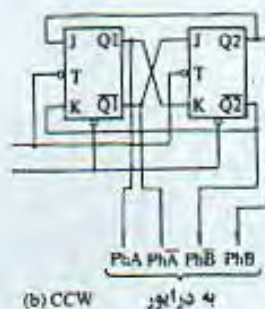
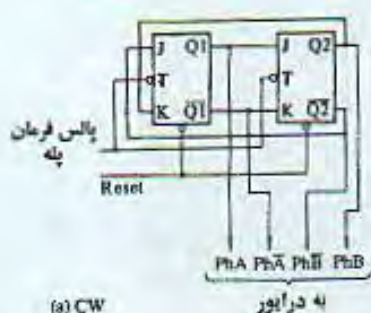
AND	 $A \cdot B = C$	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0												
Input		Output																														
A	B	C																														
1	1	1																														
1	0	0																														
0	1	0																														
0	0	0																														
NAND	 $\overline{A \cdot B} = C$	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1												
Input		Output																														
A	B	C																														
1	1	0																														
1	0	1																														
0	1	1																														
0	0	1																														
OR	 $A + B = C$	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0												
Input		Output																														
A	B	C																														
1	1	1																														
1	0	1																														
0	1	1																														
0	0	0																														
NOR	 $\overline{A + B} = C$	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1												
Input		Output																														
A	B	C																														
1	1	0																														
1	0	0																														
0	1	0																														
0	0	1																														
NOT	 $\overline{A} = B$	<table border="1"> <tr> <th>Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	Input	Output	A	B	1	0	0	1																						
Input	Output																															
A	B																															
1	0																															
0	1																															
JK-FF		<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th colspan="2">Output</th> <th></th> </tr> <tr> <th>J</th> <th>K</th> <th>Q_{n+1}</th> <th>\overline{Q}_{n+1}</th> <th></th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Q_n</td> <td>\overline{Q}_n</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>set</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>reset</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_n</td> <td>\overline{Q}_n</td> <td></td> </tr> </table> <p>نکته: جدول مسامک ترمینال clear در سطح H می‌باشد تغییر می‌کند اگر ترمینال clear در سطح L باشد خروجی Q در سطح H خواهد بود</p>	Input		Output			J	K	Q_{n+1}	\overline{Q}_{n+1}		1	1	Q_n	\overline{Q}_n		1	0	1	0	set	0	1	0	1	reset	0	0	Q_n	\overline{Q}_n	
Input		Output																														
J	K	Q_{n+1}	\overline{Q}_{n+1}																													
1	1	Q_n	\overline{Q}_n																													
1	0	1	0	set																												
0	1	0	1	reset																												
0	0	Q_n	\overline{Q}_n																													

به این معنی که، اگر Q1 در سطح H باشد سیم‌بندی PhA تحریک شده است و اگر Q1 در سطح L باشد PhA تحریک نشده است. همانطور که در دو جدول مقایسه شده است، مدارهای (a) و (b) از جهت ترتیب تحریک مخالف هم هستند، جهت مدار (a) CW (= ساعتگرد) و مدار (b) CCW (= عکس ساعتگرد) در نظر گرفته می‌شود. برای معکوس کردن جهت چرخش، اتصالات توالی ساز باید بین (a) و (b) تعویض شود. مدارهای سوئیچینگ جهت نشان داده شده در شکل ۵.۳ برای این منظور بکار می‌روند، عمل اساسی مربوط به ترکیب سه گیت NAND یا دو گیت AND و یک گیت NOR می‌باشد. در مدار (a)، اگر سیگنال فرمان جهت در سطح H باشد سطح سیگنالی مشابه با ترمینال ورودی A در ترمینال خروجی C ظاهر می‌گردد. بالعکس، اگر فرمان جهت در سطح L باشد،

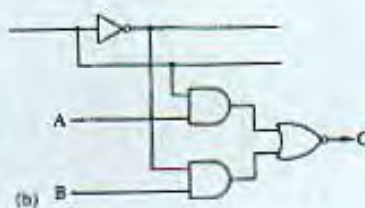
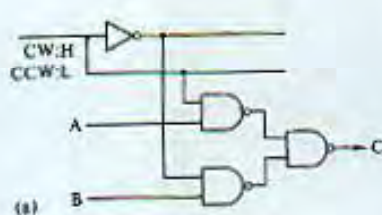
سیگنال موجود در C مشابه سیگنال ترمینال ورودی B است. در مدار (b)، $C=A$ به ازای فرمان جهت سطح H، و $C=B$ به ازای فرمان جهت سطح L. شکل ۵.۴ یک توالی ساز دو جهته را برای روش دو فاز در تحریک نشان می‌دهد که دو بخش سوئیچینگ - جهت را شامل می‌شود.

	R	1	2	3	4	5	6	...
PhA, Q1	0	1	1	0	0	1	1	...
PhB, Q2	0	0	1	1	0	0	1	...
PhA, Q1	1	0	0	1	1	0	0	...
PhB, Q2	1	1	0	0	1	1	0	...

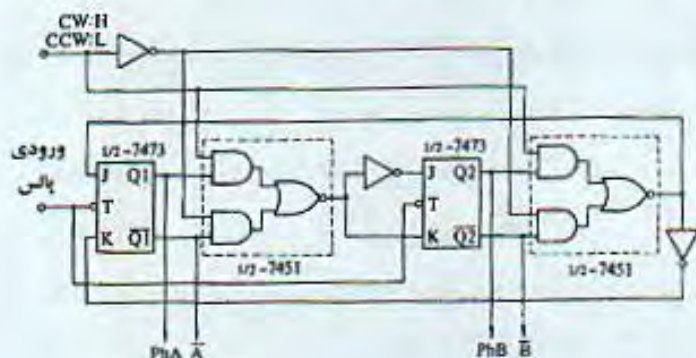
	R	1	2	3	4	5	6	...
PhA, Q1	0	0	1	1	0	0	1	...
PhB, Q2	0	1	1	0	0	1	1	...
PhA, Q1	1	1	0	0	1	1	0	...
PhB, Q2	1	0	0	1	1	0	0	...



شکل ۵.۲ یک توالی ساز تک جهته برای عملکرد دو فاز در تحریک یک موتور هیبرید دو فاز.



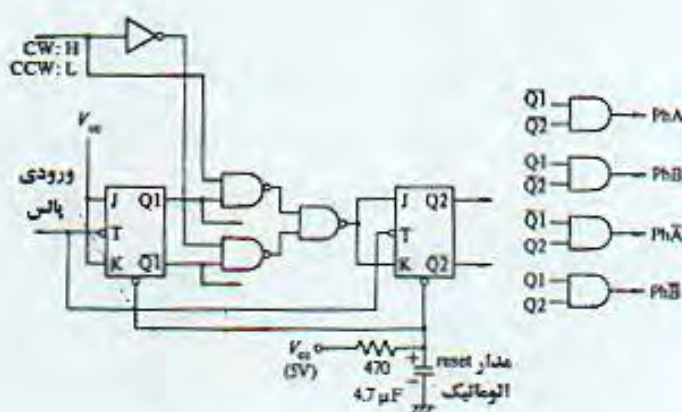
شکل ۵.۳ سلکتورهای منطقی بکار رفته به منظور دادن فرمان جهت چرخش در یک مدار. (a) $C=A$ به ازای فرمان سطح H، و در (b) $C=A$ به ازای فرمان سطح L، و در (b) $C=B$ به ازای فرمان سطح H و $C=B$ به ازای فرمان سطح L.



شکل ۵.۴ یک توالی ساز منطقی دو جهته برای یک موتور هیبرید دو فاز یا موتور VR چهار فاز.

CW						
	R	1	2	3	4	5
Q_1	0	1	0	1	0	1
\bar{Q}_1	1	0	1	0	1	0
Q_2	0	0	1	1	0	0
\bar{Q}_2	1	1	0	0	1	1
PhA $Q_1 Q_2$	1	0	0	0	1	0
PhB $Q_1 \bar{Q}_2$	0	1	0	0	0	1
PhA $\bar{Q}_1 Q_2$	0	0	1	0	0	0
PhB $Q_1 \bar{Q}_2$	0	0	0	1	0	0

CCW						
	R	1	2	3	4	5
Q_1	0	1	0	1	0	1
\bar{Q}_1	1	0	1	0	1	0
Q_2	0	1	1	0	0	1
\bar{Q}_2	1	0	0	1	1	0
PhA $Q_1 Q_2$	1	0	0	0	1	0
PhB $Q_1 \bar{Q}_2$	0	0	0	1	0	0
PhA $\bar{Q}_1 Q_2$	0	0	1	0	0	0
PhB $Q_1 \bar{Q}_2$	0	1	0	0	0	1



شکل ۵.۵. یک توالی ساز منطقی برای عملکرد یکفاز در تحریک یک موتور هیبرید دوفاز یا موتور VR چهارفاز.

۵.۲.۲. توالی سازهای یکفاز در تحریک برای موتور دوفاز

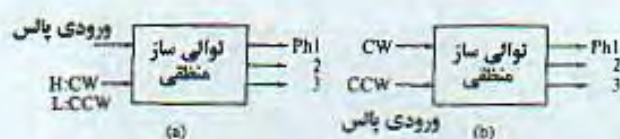
یک توالی ساز یکفاز در تحریک با اضافه کردن چهار گیت AND به ترمینال‌های خروجی توالی ساز دوفاز در تحریک، مطابق شکل ۵.۵، ساخته می‌شود.

در مدارهای این کتاب، در اغلب موارد، تغییرات حالت‌های خروجی در لبه پایین‌رونده پالس فرمان پله اتفاق می‌افتد. مداری که برای حذف نویز و اصلاح شکل موج در مقابل توالی ساز قرار گرفته بعداً در شکل ۵.۳۲ نشان داده می‌شود.

۵.۲.۳. دو شکل از توالی ساز دو جهته

توالی سازهای پالس از نوع دو جهته که تاکنون تشریح شدند دارای ترمینال فرمان و ترمینال جهت درست ورودی می‌باشند. اگر این نوع از توالی ساز بشکل جعبه سیاهی^۱ در نظر گرفته شود، مطابق شکل ۵.۶(a) خواهد بود. نوع دیگری از توالی ساز وجود دارد که دارای یک ترمینال ورودی برای پله‌های CW و پله‌های CCW می‌باشد، شکل آن بصورت جعبه سیاه شکل ۵.۶(b) می‌باشد.

1- black box



شکل ۵.۶. دو شکل از توالی‌ساز پالس دو جهته

۵.۲.۴ توالی‌ساز برای درایو پل موتورهای هیبرید دوفاز

آرایش ادوات سوئیچینگ در درایو پل یک موتور پله‌ای هیبرید در شکل ۲.۶۰ نشان داده است. در این طرح، که از هشت المان استفاده می‌کند، ادوات سوئیچینگ S_1 و S_4 باید همزمان کار کنند. به همین ترتیب جفت کلیدهای S_2 و S_3 ، S_5 و S_8 ، S_6 و S_7 همزمان کار می‌کنند. توالی‌ساز شکل ۵.۴ را می‌توان برای درایو این ادوات سوئیچینگ با اتصالات زیر بکار برد:

خروجی $\overline{Q_2}$ به S_1 و S_4

خروجی Q_2 به S_2 و S_3

خروجی Q_1 به S_5 و S_8

خروجی $\overline{Q_1}$ به S_6 و S_7 .

۵.۲.۵ توالی‌ساز یونیورسال^۱ MSI

بجای مجتمع کردن یک توالی‌ساز منطقی با تراشه‌های IC مجزا برای بکار انداختن یک درایور خاص در روشی خاص، می‌توان از یک توالی‌ساز MSI طراحی شده برای روش‌های عملکرد مختلف استفاده کرد. برای مثال، PMM8713 نشان داده شده در شکل ۵.۷ یک یکپارچه^۲ CMOS می‌باشد که برای کنترل یک موتور هیبرید دوفاز و یک موتور VR سه یا چهار فاز در هر یک از روشهای تحریک یکفاز در تحریک، دوفاز در تحریک، یا نیم‌پله طراحی شده است. سیگنالهای خروجی این نوع از توالی‌سازهای منطقی یونیورسال می‌توانند مستقیماً^۳ ترانزیستورهای قدرت دارلینگتون^۴ را که مطابق مدار نشان داده شده در شکل (d) - (b) متصل شده‌اند کنترل کنند. PMM8723 بسیار اقتصادی می‌باشد و تنها برای موتور هیبرید دوفاز بکار می‌رود. PMM8714 برای یک موتور هیبرید پنج‌فاز می‌باشد که درای اتصالات به شکل پنج ضلعی یا حلقوی است.

1- universal

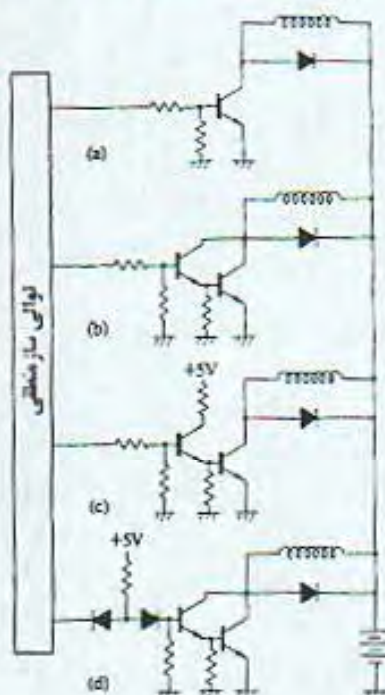
2- monolithic

3- base

4- Darlington



شکل ۵.۷. توالی‌سازهای منطقی MSI. PMM8714، PMM8723، PMM8713

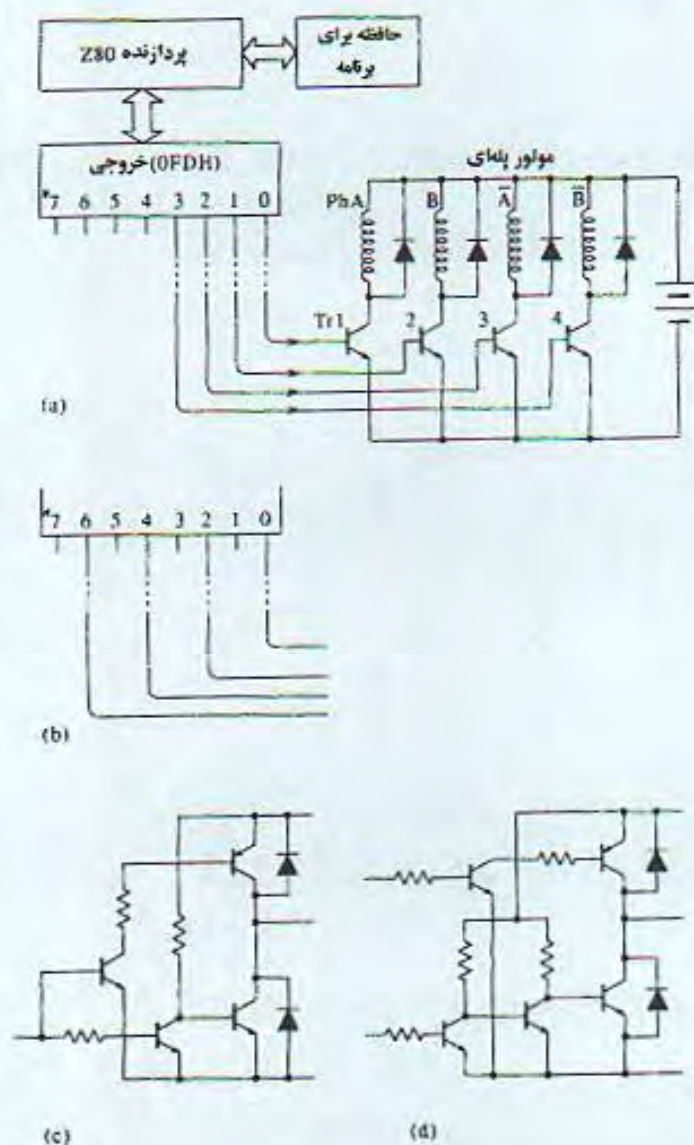


شکل ۵.۸. نمونه‌هایی از اتصال بین یک توالی‌ساز و یک درایور.

۵.۲.۶ استفاده از یک ریزپردازنده^۱

از یک ریزپردازنده می‌توان برای تولید هر نوع از توالی با استفاده از نرم‌افزار استفاده کرد. شکل ۵.۹ سیستمی است که از یک پردازنده Z80 استفاده می‌کند. در این سیستم، دستورات پله و جهت به جای اعمال یک قطار پالس، در برنامه‌ای در محل حافظه ثبت شده‌اند. یک پورت خروجی، که آدرس آن در اینجا 0FDH می‌باشد، برای فرستادن سیگنالهای سونیچینگ مورد استفاده قرار گرفته است. این آدرس

در برنامه نشان داده شده در رجیستر C^1 مشخص شده است. پورت خروجی و مدار درایور به الگوریتم و نوع درایور مورد استفاده بستگی خواهد داشت. (با اینکه این هشت بیت را می‌توان برای تولید یک توالی در عملکرد بکار گرفت، تمامی بیت‌ها بعنوان سیگنال درایو استفاده نشده‌اند).



شکل ۵.۹. استفاده از یک ریزپردازنده بعنوان توالی‌ساز منطقی و اتصال بین بیت‌های پورت خروجی و ترانزیستورها. (a) استفاده از چهار بیت کم ارزش تر برای درایو چهار ترانزیستور در یک موتور هیبرید دوفاز، (b) استفاده از بیت‌های زوج، (c) استفاده از یک بیت برای درایو ترانزیستورهای جفت در اتصال کاسکاد، و (d) استفاده از یک بیت برای هر ترانزیستور. کارکردهای مختلف در حافظه برنامه‌ریزی شده‌اند.

شماره بیت	7	6	5	4	3	2	1	0
(a) تحریک دوفاز	0	0	1	1	0	0	1	1
	0	1	1	0	0	1	1	0
	1	1	0	0	1	1	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	1
	0	0	1	1	0	0	1	1
	0	1	1	0	0	1	1	0
	1	1	0	0	1	1	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	1
(b) تحریک تکفاز	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	0	1	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	0	1	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	1	0	0	0
(c) تحریک نیم پله	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	1	1	1	0
	0	0	0	1	1	1	0	0
	0	0	1	1	1	0	0	0
	0	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	1
	1	0	0	0	0	0	1	1

شکل ۵.۱۰. تغییر داده هشت بیتی در ترتیب تحریک، که در برنامه جدول ۵.۲ در رجیستر B انجام می گیرد. (a) تحریک دوفاز (b) تحریک تکفاز، و (c) تحریک نیم پله.

قسمت (a) و (b) دوروش مختلف اتصال برای عملکرد تک قطبی یک موتور VR چهارفاز یا عملکرد دورشته ای یک موتور هیبرید دوفاز را بر اساس توالی نشان داده در شکل ۵.۱۰ نشان می دهند. از اینرو هر ترانزیستور با یک بیت از پورت 0FD درایو می شود. به هنگام درایو یک مدار پل، همانطور که در قسمت های (c) و (d) در شکل ۵.۹ نشان داده شده است دو انتخاب وجود دارد؛ اولی استفاده از یک بیت برای درایو دو ترانزیستور شامل یکفاز، و دیگری استفاده از دو بیت برای این منظور می باشد. در انتخاب دوم نمی توان دو ترانزیستور را همزمان به حالت off (قطع) برد. برای درایو یک موتور پنج فاز در طرح اول به ۱۰ بیت نیاز داریم، که ناممکن نیست ولی با پردازنده هشت بیتی نامتناسب است. ما در اینجا تنها حالت طرح دوم را نشان می دهیم که از پنج بیت برای یک موتور پنج فاز استفاده می کند. در برنامه نمونه در جدول ۵.۲ روشی که در آن بیت های پورت 0FD بکار گرفته شده اند به این ترتیب است:

درایو تک قطبی یک موتور سه فاز
سه بیت کم ارزش تر
درایو دو قطبی یک موتور هیبرید سه فاز با استفاده از یک درایو پل سه فاز
شش بیت کم ارزش تر
درایو یکفاز در تحریک یا دوفاز در تحریک یک موتور هیبرید دوفاز یا موتور VR چهارفاز

چهار بیت کم ارزش تر
عملکرد نیم پله یک موتور هیبرید دوفاز یا VR چهارفاز
بیت های ۰، ۲، ۴، ۶
روش پنج فاز در تحریک با اتصال ستاره یا چهارفاز در تحریک با اتصال پنج ضلعی در یک موتور هیبرید پنج فاز
پنج بیت کم ارزش تر
نرم افزار شامل سه قسمت می شود: برنامه اصلی^۱، زیر برنامه TIME^۲، و گروه زیر برنامه های کارکرد. در برنامه اصلی، حالت تحریک اولیه باید در رجیستر B مشخص شود، به سرعت به پورت

0FDH فرستاده شود، و زمان ۲ ثانیه برای قرار دادن موتور در موقعیت اولیه خواهد شد. رجیستر E باید با یک داده مناسب قبل از فراخوانی زیربرنامه TIME بار^۱ شود. واحد بازه زمانی پله در این مثال ۱۰ ms می‌باشد. بطور مثال، اگر داده 10 به رجیستر E بار شود، زیربرنامه TIME، ۱۰۰ ms یا نرخ پله حدوداً ۱۰ Hz را تولید می‌کند. هنگامیکه برنامه اجرا می‌شود حالت تحریک متغیر در رجیستر B ثبت می‌شود. عناوین آدرس برای زیربرنامه‌های توالی ساز با STP شروع می‌شوند، که بدنبال آنها تعداد بیت‌های مورد استفاده می‌آید. برنامه‌هایی که در اینجا آورده شده‌اند عبارتند از:

STP3FL و STP3FR	سه فاز تمام پله به راست و چپ
STP3HL و STP3HR	سه فاز نیم‌پله به راست و چپ
STP4L و STP4R	چهار فاز تمام / نیم‌پله به راست و چپ
STP5FL و STP5FR	پنج فاز تمام پله به راست و چپ
STP6HL و STP6HR	پنج فاز نیم‌پله به راست و چپ برای یک موتور سه فاز هیبرید

(هیبرید دوفاز در اینجا چهار فاز در نظر گرفته می‌شود.)

در این حالت عنوان STP4L در برنامه اصلی تشخیص داده می‌شود. هنگامیکه مشخص شد، یک موتور VR چهار فاز یا یک موتور هیبرید دوفاز را می‌توان بکار انداخت. در این مورد رقم باینری 00010001 یا هگزادسیمال 11(11H) بعنوان داده اولیه در عملکرد یکفاز در تحریک به رجیستر B بار می‌شود. اگر داده اول 00110011 یا 33 هگزادسیمال باشد، موتور به روش دوفاز در تحریک کار می‌کند. این موارد مربوط به عملکرد تمام پله می‌باشند و چهاربیت کم‌ارزشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانطور که در شکل ۵.۱۰ نشان داده شده است اگر بیت‌های زوج مورد استفاده قرار گیرند و اولین داده 00000111 (یا رقم دیگری مثل 00111000) تشخیص داده شود، عملکرد نیم‌پله انجام خواهد گرفت. از اینرو، تمامی آنها از گردش هشت بیتی استفاده می‌کنند، که نماد حافظه‌ای^۲ آن RLC می‌باشد، تا ترتیب تحریک را بوجود آورند، و از آن در زیر برنامه کارکرد^۳ استفاده می‌شود. برنامه منطقی توالی برای استفاده از چهار بیت کم‌ارزش‌تر در عملکرد نیم‌پله امکان‌پذیر بوده ولی پیچیده است. اگر STP4R تشخیص داده شود، برنامه زیربرنامه کارکرد را فرا خواهد خواند تا موتور را در جهت CW درایو کند، تا از ترتیب معکوس با بکارگیری RRC B در زیربرنامه کارکردی مربوطه تبعیت کند.

برای موتورهای سه و پنج فاز دستور ساده‌ای در دسترس نیست، و باید ترکیبی از دستورات مختلف بکار گرفته شود. زیربرنامه‌های کارکرد در جدول ۵.۲ مثالهایی از این دست می‌باشند. همانطور که پیشتر اشاره شد، به هنگام استفاده از آنها، باید روابط مناسبی بمنظور تعیین اینکه کدام بیت مربوط به کدام

1- load

2- mnemonic

3- function subroutine

ترانزیستورها می‌شود تعیین گردند.

جدول ۵.۲. لیست برنامه برای درایو پیوسته با استفاده از یک پردازنده Z80

توضیحات	Operand	Op-code	عنوان
***** Initialization *****			
برنامه را از آدرس 8000H شروع می‌کند	8000H	ORG	
اولین داده تحریک را در رجیستر B بار می‌کند	B,01H	LD	
پورت خروجی را در رجیستر C مشخص می‌کند	C,0FDH	LD	
موتور را با خروجی قرار دادن پورت 0FDH تحریک می‌کند	(C),B	OUT	
داده زمان 200 را در رجیستر E بار می‌کند	E,200	LD	
موتور را در عرض ۲۰۰۰ ms موقعیت اولیه قرار می‌دهد	TIMER	CALL	
1 را در E بار می‌کند تا نرخ پله ۱۰۰ Hz تولید کند.	E,1	LD	
***** Continuous drive of motor *****			
کارکرد را فرامی‌خواند	STP4L	CALL	LOOP1:
موتور را با دادن فرمان جدید حالت تحریک می‌چرخاند	(C),B	OUT	
زیر برنامه TIMER را فرا می‌خواند	TIMER	CALL	
	LOOP1	JP	
***** TIMER subroutine *****			
	BC	PUSH	TIMER:
	DE	PUSH	
	D,60	LD	LOOP2:
	B,46	LD	LOOP3:
	B	DEC	LOOP4:
	NZ,LOOP4	JP	
	D	DEC	
	NZ,LOOP3	JP	
	E	DEC	
	NZ,LOOP5	JP	
	DE	POP	
	BC	POP	
		RET	
	D,4	LD	LOOP5:
		NOP	
		NOP	
	D	DEC	LOOP6:
	NZ,LOOP6	JP	
	LOOP2	JP	
***** Function subroutines *****			
سه فاز تمام پله (چپ)	A,B	LD	STP3FL:
	A	SRA	
	D,A	LD	
	A,B	LD	
	A	SLA	
	A	SLA	
	D	OR	
	07H	AND	

جدول ۵.۲ (ادامه)

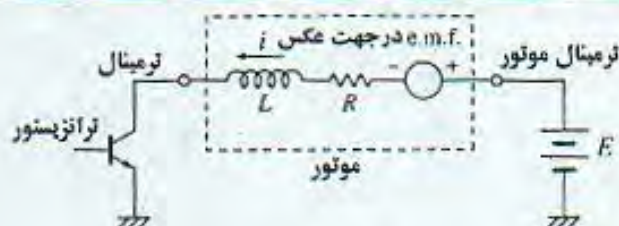
عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
	LD	B,A	
	RET		
STP3FR:	LD	A,B	سه فاز تمام پله (راست) †
	SLA	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SRA	A	
	SRA	A	
	OR	D	
	AND	07H	
	LD	B,A	
	RET		
STP3HL:	LD	A,B	سه فاز نیم پله (چپ) †
	SLA	A	
	AND	07H	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SRL	A	
	SRL	A	
	OR	D	
	JP	PE,L01	
	OR	B	
	JP	L02	
L01:	AND	B	
	JP	L02	
L02:	AND	07H	
	LD	B,A	
	RET		سه فاز نیم پله (راست) †
STP3HR:	LD	A,B	
	SRL	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SLA	A	
	SLA	A	
	AND	07H	
	OR	D	
	JP	PE,L03	
	OR	B	
	JP	L04	
L03:	AND	B	
	JP	L04	
L04:	AND	07H	
	LD	B,A	
	RET		
STP4L:	RLC	B	چهار فاز (چپ) †
	RET		
STP4R:	RRC	B	چهار فاز (راست) †
	RET		

جدول ۵.۲. (ادامه)

عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
STP5HL:	LD	A,B	پنج فاز نیم پله (چپ)
	CPL		
	AND	1FH	
	LD	B,A	
	SRL	A	
	SRL	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	OR	D	
	AND	1FH	
	LD	B,A	
	RET		
STP5HR:	LD	A,B	پنج فاز نیم پله (چپ)
	CPL		
	AND	1FH	
	LD	B,A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SRL	A	
	SRL	A	
	SRL	A	
	OR	D	
	AND	1FH	
	LD	B,A	
	RET		
STP6FL:	LD	A,B	سه فاز دو قطبی تمام پله (راست)؛
	SLA	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SRA	A	
	SRA	A	
	SRA	A	
	SRA	A	
	SRA	A	
	SRA	A	
	OR	D	
	AND	3FH	
	LD	B,A	
	RET		
STP6FR:	LD	A,B	سه فاز دو قطبی تمام پله (چپ) ؛
	SRA	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SLA	A	

جدول ۵.۲ (ادامه)

عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	OR	D	
	AND	3FH	
	LD	B,A	
	RET		
STP6HL:	LD	A,B	سه فاز دو قطبی نیم پله (چپ) †
	SLA	A	
	AND	3FH	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SRL	A	
	SRL	A	
	SRL	A	
	SRL	A	
	SRL	A	
	OR	D	
	JP	PE,L09	
	OR	B	
L09:	JP	L10	
	AND	B	
L10:	JP	L10	
	AND	3FH	
	LD	B,A	
	RET		
STP6HR:	LD	A,B	سه فاز دو قطبی نیم پله (راست) †
	SRL	A	
	LD	D,A	
	LD	A,B	
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	SLA	A	
	AND	3FH	
	OR	D	
	JP	PE,L11	
	OR	B	
	JP	L12	
L11:	AND	B	
	JP	L12	
L12:	AND	3FH	
	LD	B,A	
	RET		
	END		



شکل ۵.۱۱. مدار معادل یک سیم پیچی در موتور پله‌ای.

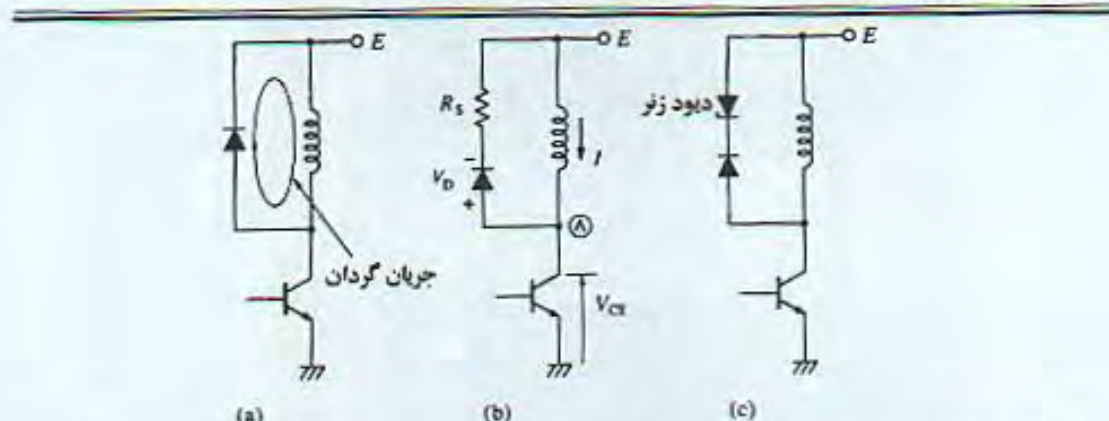
۵.۳ درایور موتور^۱

۵.۳.۱ اتصال توالی ساز و درایور

سیگنالهای خروجی یک توالی ساز منطقی به ترمینالهای ورودی یک درایور قدرت منتقل می‌شوند، که بوسیله آن on/off بودن سیم پیچی‌های موتور کنترل می‌شوند. درایور قدرت ممکن است یک 'درایور موتور' یا به سادگی 'درایور' خوانده شود. ساده‌ترین روش اتصال مطابق شکل (b) و (a) ۵۸ اتصال مستقیم می‌باشد. اما، اگر جریانهای خروجی توالی ساز برای درایو ترانزیستورهای قدرت کافی نباشند، لازم است یک بافر^۲ برای تقویت جریان بین دو طبقه مطابق شکل (d) و (c) ۵۸ قرار داده شود. اخیراً MOSFET ها و IGBT ها همچون ترانزیستورهای دو قطبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. چگونگی ارتباط این ادوات با ترمینالهای گیت منطقی / ریزپردازنده در مرجع [5] مورد بحث قرار گرفته است.

۵.۳.۲ مشکلات درایورها

سیم پیچی در یک موتور پله‌ای سلفی است و به نظر ترکیبی از سلف و مقاومت سری می‌آید. به علاوه، با گردش موتور، یک e.m.f. در جهت عکس در سیم پیچی تولید می‌شود. مدار معادل یک سیم پیچی، از اینرو، مطابق شکل ۵.۱۱ می‌باشد. در طراحی یک درایور قدرت، باید فاکتورهای لازم و رفتار این نوع از مدار را در نظر گرفت. در ابتدا، بدترین شرایط موتور پله‌ای، ترانزیستورهای قدرت، و ولتاژهای اعمالی باید مورد توجه قرار گیرند. پارامترهای موتور به نسبت تلورانس ساخت و شرایط عملکرد متفاوت هستند. چون موتورهای پله‌ای برای تحویل بالاترین توان از کوچکترین اندازه طراحی شده‌اند، دمای آن می‌تواند در حد بالای 100°C باشد، و از اینرو مقاومت سیم پیچی به اندازه 20° تا 25 درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۵.۱۲. مدارهای حذف کننده (a) حذف کننده دیودی، (b) حذف کننده دیود - ترانزیستوری، و (c) حذف کننده دیود زتر.

۵.۳.۳ حذف کننده‌ها^۱

هنگامیکه ترانزیستور شکل ۵.۱۱ خاموش (قطع) می‌شود، یک ولتاژ بالا ناشی از $L(di/dt)$ بوجود می‌آید، و این ولتاژ به ترانزیستور آسیب می‌رساند. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از این ولتاژ ضربه‌ای^۲ و محافظت از مدار همانطور که در زیر نشان داده شده وجود دارد:

(۱) حذف کننده دیودی. اگر دیودی بصورت موازی با سیم‌پیچی با پلاریته نشان داده شده در شکل ۵.۱۲(a) قرار داده شود جریان گردانی^۳ بعد از خاموش شدن ترانزیستور جاری می‌شود، و جریان به مرور زمان از بین خواهد رفت. در این طرح، به هنگام خاموش شدن ترانزیستور تغییر بزرگی در جریان بوجود نمی‌آید، و پتانسیل کلکتور برابر با پتانسیل منبع E به اضافه پتانسیل بایاس مستقیم دیود است. این روش بسیار ساده است، اما مشکل این است که جریان گردان به مدت زمان قابل توجهی باقی می‌ماند و یک گشتاور ترمزکننده^۴ بوجود می‌آورد.

(۲) حذف کننده دیود - مقاومتی. یک مقاومت با دیود مطابق شکل ۵.۱۲(b) سری شده است تا جریان گردان را به سرعت میرا کند. ولتاژ V_{CE} اعمال شده به کلکتور در حالت خاموش در این طرح برابر است با

$$V_{CE} = E + IR_s + V_D \quad (5.1)$$

که E = پتانسیل منبع

R_s = مقاومت حذف کننده.

V_D = پتانسیل بایاس مستقیم دیود

می‌باشند.

1- suppressor

3- circulating current

2- spike voltage

4- braking torque

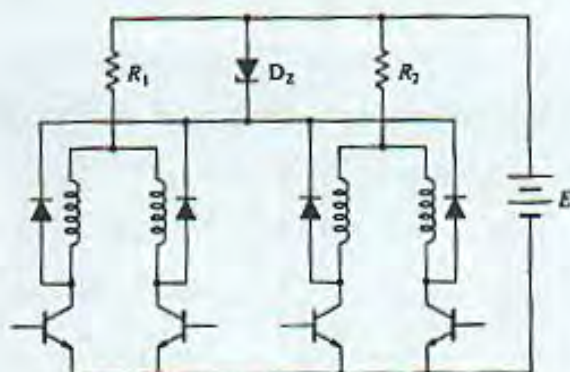


شکل ۵.۱۳. مقایسه آثار طرحهای مختلف حذف کننده.

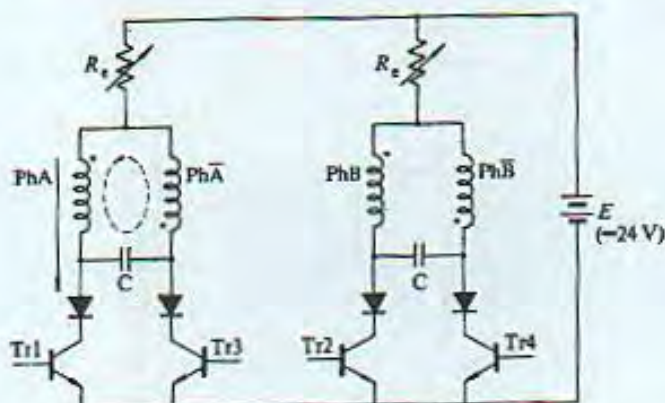
یک مقاومت بزرگ R_s برای از بین رفتن سریع جریان مورد نیاز می‌باشد، اما این موضوع هم باعث پتانسیل کلکتور V_{CE} بزرگتر می‌شود، از اینرو به یک ترانزیستور ولتاژ بالا نیاز می‌باشد.

(۳) حذف کننده دیود زنر. دیودهای زنر اغلب مطابق شکل (۵.۱۲c) بصورت سری با دیودهای معمولی بکار می‌روند. در مقایسه با دو مورد قبلی، در این طرح جریان بعد از خاموش شدن ترانزیستور سریعتر از بین می‌رود (شکل ۵.۱۳). به علاوه، مزیت این روش این است که پتانسیل اعمال شده به کلکتور برابر با پتانسیل منبع به اضافه پتانسیل زنر، و مستقل از جریان، می‌باشد. این امر تعیین محدوده پتانسیل ماکزیمم کلکتور را آسان می‌کند. شکل ۵.۱۴ یک مدار درایور با حذف کننده دیود زنر برای یک موتور چهار فاز می‌باشد. مقاومت R_1 و R_2 برای ظهور سریع جریان تحریک می‌باشند، که در بخش ۵.۳.۴ توضیح داده خواهد شد.

(۴) حذف کننده خازنی^۱. این طرح اغلب در موتورهای هیبرید با سیم پیچی دورشته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. توضیحی برای مدار نشان داده شده در شکل ۵.۱۵ آورده شده است، که



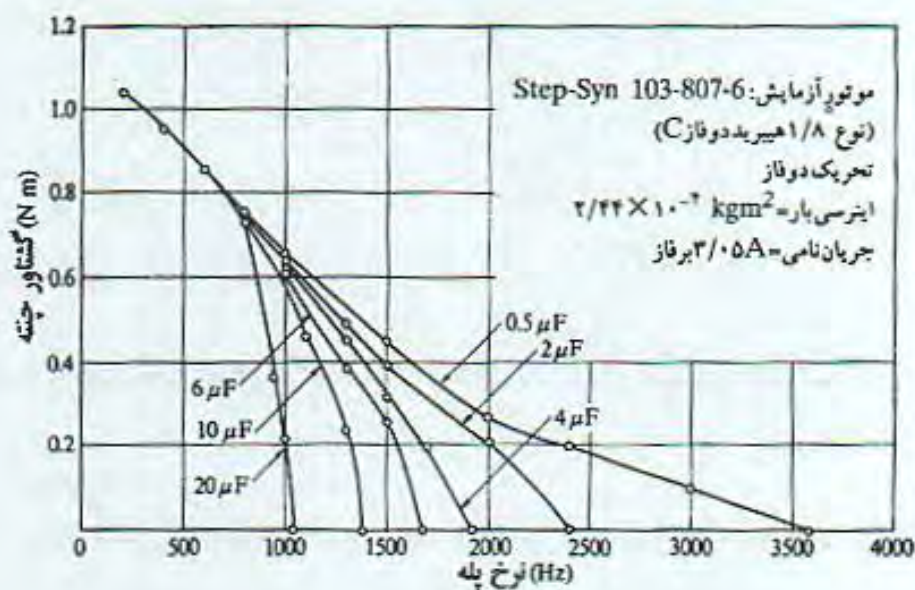
شکل ۵.۱۴. مثالی از درایور چهار فاز با حذف کننده دیود زنر.



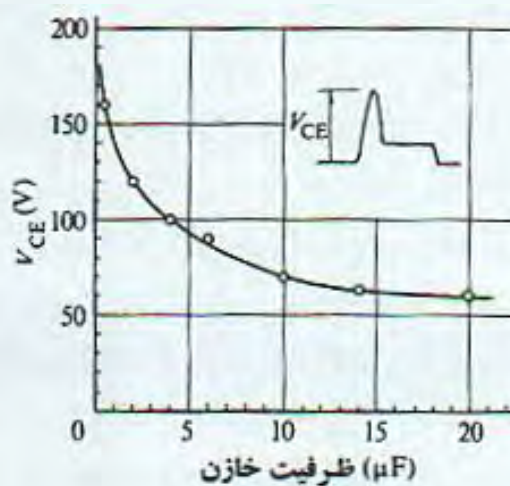
شکل ۵.۱۵. درایور دو فاز با حذف‌کننده خازنی. مقاومت‌های خارجی نشان داده شده با R_e برای جریان نامی تنظیم شده‌اند.

مربوط به یک موتور دو فاز می‌باشد. خازنی بین PhA و PhA -bar و بین PhB و PhB -bar قرار داده شده است. این خازنها یک دو هدف را میسر می‌کنند. اولاً، هنگامیکه ترانزیستوری خاموش می‌شود، خازنی که به آن از طریق دیود متصل شده است جریان میراثونده را از سیم پیچی جذب می‌کند تا از ترانزیستور محافظت کند. حال حالتی را درست بعد از خاموش شدن $Tr1$ در روش یکفاز در تحریک بررسی می‌کنیم. یکی از ترانزیستورهای $Tr2$ یا $Tr4$ روشن خواهد شد، اما $Tr3$ در حالت خاموش باقی خواهد ماند. چون سیم پیچی‌های PhA و PhA -bar به روش دورشته‌ای پیچیده شده‌اند، یک جریان گذرا که بصورت حلقه خط چین در شکل نشان داده شده جاری می‌شود. اگر $Tr3$ هنگامیکه جریان گذرا صفر می‌شود و بار ذخیره شده در خازن ماکزیمم می‌شود روشن شود، جریان مثبت براحتی می‌تواند از سیم پیچی PhA -bar عبور کند. از طریق این مکانیزم تشدید، در این طرح از جریانها بطور کارآمدی بهره برداری می‌شود. این ویژگی در روش دو فاز در تحریک وجود دارد. حذف‌کننده خازنی برای درایوهایی که در آنها نرخ پله به ناحیه کوچکی محدود می‌شود مناسب می‌باشد.

کاربرد دیگر خازن بعنوان یک میراکننده الکتریکی است. همانطور که در بخش ۴.۳ اشاره شد، عمل میرا کردن نوسانات روتور برای ایجاد مکانیزمی است تا انرژی جنبشی به گرمای ژول تبدیل شود. اگر روتور دارای آهنربای دائمی نوسان کند، یک e.m.f. متناوب در سیم پیچی تولید می‌شود. بهر حال، اگر مسیری برای جریان موجود نباشد یا مقاومت بزرگی در مسیر وجود داشته باشد، هیچ جریانی توسط این e.m.f. بوجود نمی‌آید. هنگامیکه خازنی بین فازها متصل شده است، یک جریان نوسانی در حلقه بسته نشان داده شده در شکل ۵.۱۵ جاری می‌شود، و گرمای ژول در سیم پیچی‌ها تولید می‌شود، به این معنی که خازن بعنوان یک میراکننده الکتریکی عمل می‌کند. تغییرات منحنی گشتاور چته و ظرفیت

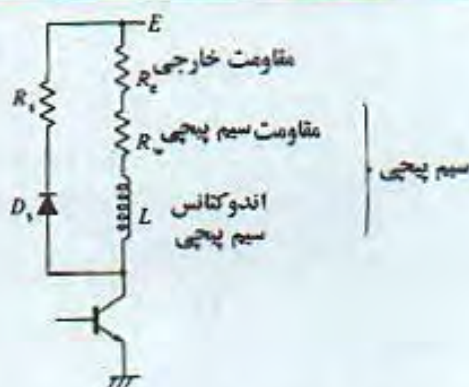


شکل ۵.۱۶. تغییرات منحنی گشتاور چنته با خازن متصل بین فازها، که در مدار شکل ۵.۱۵ (از مرجع [2]) اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵.۱۷. پتانسیل اعمال شده به ترانزیستور خاموش با ظرفیت در نرخ چنته ماکزیمم تغییر می‌کند (از مرجع [2]).

در شکل ۵.۱۶ نشان داده شده‌اند، گشتاور چنته در نرخ‌های پله بالا بعلت میرایی سریع جریان بعد از خاموش شدن ترانزیستور با کاهش ظرفیت بزرگتر می‌شود، همانطور که در شکل ۵.۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۵.۱۸ بهبود ظهور جریان با قرار دادن R_e بصورت سری با سیم پیچی و یا بردن پتانسیل منبع E

۵.۳.۴ بهبود ظهور جریان^۱

هنگامیکه ترانزیستوری برای تحریک یک فاز روشن می‌شود، منبع تغذیه باید اثر اندوکتانس سیم پیچی را قبل از درایو در جریان نامی از بین ببرد، چون در این حالت اندوکتانس تمایل به مخالفت با ظهور جریان دارد. با افزایش فرکانس سوئیچینگ، مدت زمان ظهور^۲ در سیکل سوئیچینگ بزرگ می‌شود و باعث کاهش گشتاور و پاسخ کند می‌شود. روشهای مختلفی برای کوتاه کردن زمان ظهور و بهبود مشخصه‌های گشتاور در سرعت‌های بالا وجود دارند، که در اینجا مطرح خواهند شد.

(۱) مقاومت سری. کم هزینه ترین روش اضافه کردن یک مقاومت بصورت سری با سیم پیچی مطابق شکل ۵.۱۸ می‌باشد. پتانسیل منبع تغذیه E برای درایو جریان نامی به سیم پیچی‌ها تحت شرایط پایداری انتخاب می‌شود. ثابت زمانی مدار از L/R_{Σ} به $L/(R_e + R_{\Sigma})$ کاهش می‌یابد.

با اینکه مقاومت سری ساده‌ترین روش است، بعلت تلف زیاد توان در مقاومت‌های سری مفید نمی‌باشد. اگر مقاومت سیم پیچی یک موتور چهار فاز 55Ω و جریان نامی $4A$ ، و نیاز به درایو از یک منبع $24V$ داشته باشد، آنگاه مقاومت اضافه شونده به هر فاز $4/5\Omega$ می‌باشد. تلف توان در روش یکفاز در تحریک $4/5 \times 4^2 = 72W$ می‌باشد. در درایو دو فاز در تحریک این مقدار دو برابر می‌شود.

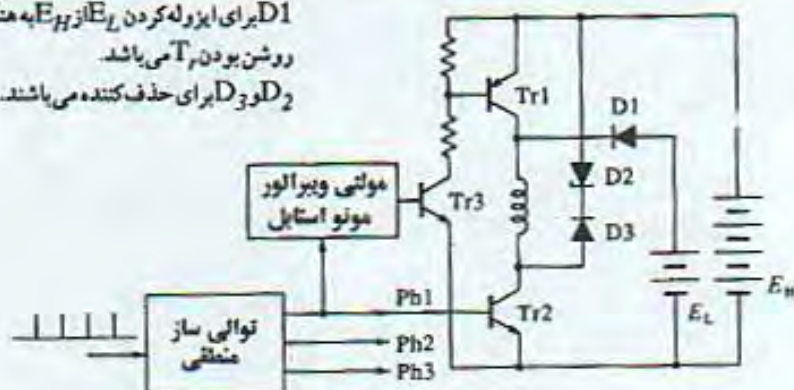
(۲) دو ولتاژ^۳. به منظور کاهش تلف توان در درایو و افزایش بازدهی یک موتور پله‌ای، درایو دو ولتاژ بکار می‌رود. در شکل ۵.۱۹ طرحی برای یکفاز نشان داده شده است. هنگامیکه یک پالس فرمان پله به توالی ساز داده می‌شود، یک سیگنال سطح بالا در یکی از ترمینالهای خروجی ظاهر می‌شود تا سیم پیچی فازی را تحریک کند. در این سیگنال $Tr1$ و $Tr2$ هر دو روشن می‌شوند، و ولتاژ بالاتر E_H به سیم پیچی اعمال خواهد شد. حال دیود $D1$ به منظور ایزوله کردن منبع ولتاژ پایین‌تر از منبع ولتاژ بالاتر بایاس معکوس می‌شود. جریان بعلت ولتاژ بالاتر E_H بسرعت ظهور می‌کند. ثابت زمانی

1- current build-up

2- build-up time

3- dual voltage

D1 برای ایزوله کردن E_L از E_H به هنگام روشن بودن T_1 می‌باشد.
D2 و D3 برای حذف کننده می‌باشند.



شکل ۵.۱۹. بهبود ظهور جریان از طریق درایو دو ولتاژ.

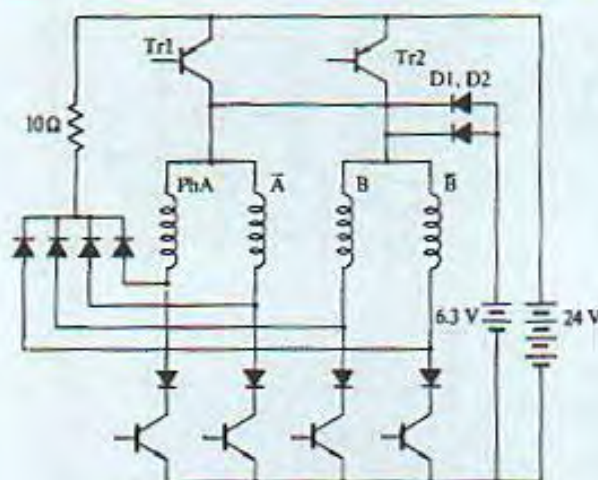
مولتی ویراتور مونواستابل^۱ طوری انتخاب می‌شود که T_{r1} بهنگام افزایش جزئی جریان سیم پیچی از جریان نامی خاموش می‌شود. بعد از اینکه منبع ولتاژ بالاتر قطع شد، دیود بایاس مستقیم می‌شود و جریان سیم پیچی از منبع ولتاژ پایین تر تامین می‌شود. یک شکل موج نمونه در شکل ۵.۲۰ نشان داده شده است.

هنگامیکه روش دوولتاژ برای درایو دوفاز در تحریک یک موتور هیبرید دو فاز بکار می‌رود، طرح مدار مطابق شکل ۵.۲۱ خواهد بود. دو ترانزیستور (T_{r2}, T_{r1}) و دو دیود ($D2, D1$) برای سونپیچینگ ولتاژ بالاتر بکار می‌روند.

در طرح دوولتاژ، با افزایش نرخ پله، ولتاژ بالا مدت زمان بیشتری برقرار خواهد بود.



شکل ۵.۲۰. شکل موجهای ولتاژ و جریان در یک درایو دوولتاژ.



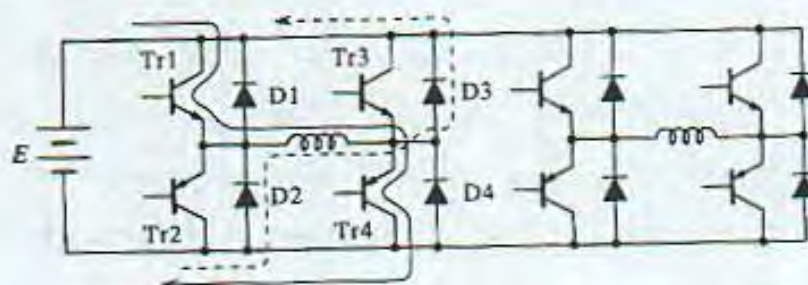
شکل ۵.۲۱. یک درایور دوولتاژ برای درایو دوفاز در تحریک در یک موتور هیبرید دوفاز.

۵.۳.۵ درایو پل یک موتور دوفاز

اگر سیم پیچی‌ها همواره طوری تحریک شوند که گشتاور موثری را تولید کنند، در مقایسه با حالتی که در آن هر سیم پیچی تنها مدت زمان محدودی تحریک می‌شود، کارایی موتور بیشتر خواهد بود. این مورد بخصوص در مورد موتورهای کوچک صادق می‌باشد. در درایور یک موتور هیبرید دوفاز، بعلاوه اینکه چهار سیم پیچی همواره تحریک می‌شوند، درایور دوقطبی یک درایور بسیار خوب برای این منظور است. در مقایسه با درایور تک قطبی، که در آن جریان در یک جهت در سیم پیچی شارش می‌کند، ۲۰ تا ۳۵ درصد بهبود در گشتاور امکان پذیر می‌باشد.

برخی موتورها با هدف درایو پل ساخته شده‌اند، و دارای چهار ترمینال کاری در طرح نشان داده شده در شکل ۵.۲۲ می‌باشند. برای یک موتور دارای سیم‌های سروسطدار^۱، که به منظور درایو تک قطبی می‌باشند، عملکرد پل با آرایش دادن سرسیم‌ها مطابق شکل ۲.۶۲ میسر می‌شود. در درایو پل، طراحی مدار باید دقت کرد تا از امکان آسیب دیدن ترانزیستور که ممکن است بهنگام سوئیچینگ دو ترانزیستور کامسکاد رخ دهد، جلوگیری شود. هنگامیکه زمان خاموش شدن در یک ترانزیستور از زمان روشن شدن در ترانزیستور دیگر سریعتر نباشد، دو ترانزیستور اتصال کوتاه می‌شوند. از این مورد باید توسط قواعد زیر جلوگیری کرد. دیودهای موازی با ترانزیستورها به منظور حذف ولتاژ ضربه‌ای هستند که بهنگام حالت خاموش هر ترانزیستور بوجود می‌آید، این کارکرد دیودها در درایو تک قطبی کمی متفاوت است. اگر Tr1 و Tr4 در حال هدایت باشند، مسیر جریان مطابق منحنی پیوسته کمرنگ نشان

1- centre-tapped wires



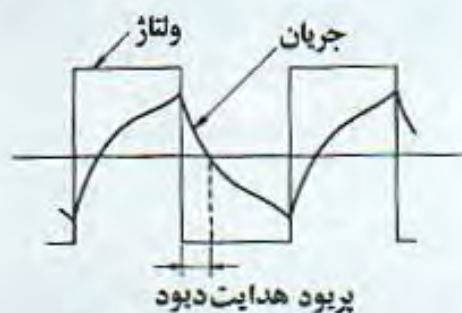
شکل ۵.۲۲ مدار پل یک موتور هیبرید دوفاز.

داده شده در شکل ۵.۲۲ خواهد بود. بلافاصله بعد از اینکه $Tr1$ و $Tr4$ خاموش و $Tr2$ و $Tr3$ روشن شدند، جریان سیم‌پیچی معکوس نخواهد شد و از طریق $D2$ و $D3$ ، و منبع تغذیه E همانطور که با خط چین نشان داده شده گردش خواهد کرد. ممکن است گفته شود که جریان به منبع تغذیه بازمی‌گردد. از نظر انرژی، انرژی مغناطیسی در سیم‌پیچی‌ها به منبع تغذیه بازگردانده می‌شود. چون در درایو تک قطبی این نوع از انرژی مغناطیسی در سیم‌پیچی‌ها، دیود، و مقاومتهای خارجی مصرف می‌شود، درایو دوقطبی در درایو پل از این نظر مزیت بیشتری دارد.

شکل موج جریان در این درایو در شکل ۵.۲۳ نشان داده شده است. این شکل موج متفاوت از یک منحنی نمایی است، اما بعلاوه $e.m.f$ بازگشتی تولید شده توسط حرکت روتور اندکی مقعر می‌باشد.

۵.۳.۶ موتورهای هیبرید سه و پنج فاز

همانطور که در بخش ۲.۴.۶ اشاره شد، اساساً سه طرح مختلف برای یک موتور هیبرید سه یا پنج فاز وجود دارد. اولین طرح درایو هر فاز بصورت دوقطبی با یک پل H مستقل از دیگر فازها می‌باشد.



شکل ۵.۲۳ شکل موجهای جریان و ولتاژ در درایو دوقطبی.

چون این طرح پرهزینه می باشد، طرح حلقوی یا ستاره انتخابهای معمول تری می باشند. طرح حلقوی در یک ماشین سه فاز به نام اتصال مثلث و در یک موتور پنج فاز به نام اتصال پنج ضلعی نامیده می شود. تعداد ترانزیستورهای اصلی یا MOSFET ها در این روش ها برای طرح سه فاز ۶ عدد و برای طرح پنج فاز ۱۰ عدد بترتیب مطابق شکل های ۵.۲۴ و ۵.۲۵ می باشد. در این شکل ها، حالت تحریک در هر فاز وابسته به دیگری می باشد. بهر حال، نوع وابستگی در هر دو طرح حلقوی و ستاره متفاوت می باشد.

۵.۳.۷ درایو مدولاسیون پهنای پالس^۱

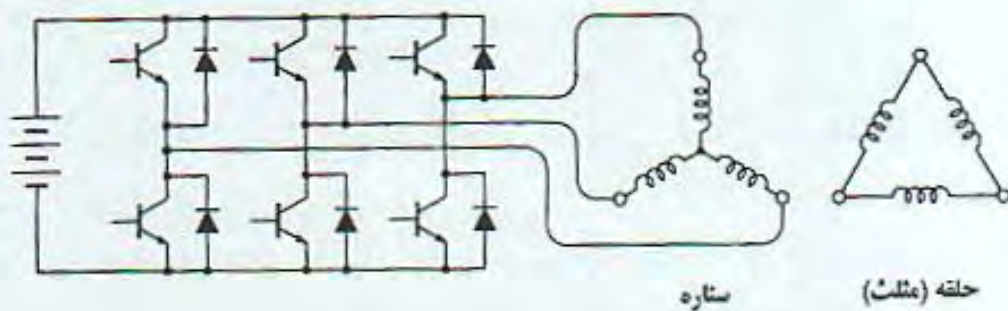
درایو مدولاسیون پهنای پالس ($PWM=$) درایو بسیار خوبی است که ظهور خوب جریان با تلف کم را ممکن می سازد. اساس کار یک درایو PWM در شکل ۵.۲۶ نشان داده شده است. در اینجا بار سلفی قرار داده شده در خط چین مربع یک درایو معمولی را نشان می دهد (شکل ۵.۲۷). ولتاژ در انتخابگر^۲ جریان بار با ولتاژ مرجع توسط یک تقویت کننده عملیاتی با بهره بالا مقایسه می شود. ولتاژ مرجع جمع مولفه فرکانس بالای مثلثی یا سینوسی و یک مولفه DC است که باید با ولتاژ انتخابگر جریان مقایسه شود. اگر مولفه DC سیگنال مرجع و ولتاژ انتخابگر تقریباً برابر باشند، شکل موج در ترمینال خروجی تقویت کننده مطابق شکل (b) ۵.۲۶ موج مربعی خواهد بود. چون بهره تقویت کننده بالا می باشد، ولتاژ خروجی بین اشباع و قطع نوسان می کند. سیگنال توسط $Tr2$ عکس می شود و به بیس ترانزیستور اصلی سوئیچینگ $Tr1$ داده می شود تا آن را در حالت ON-OFF درایو کند. در حالت ON، جریان از منبع جریان به بار کشیده می شود، در حالیکه در حالت OFF یک جریان چرخشی مطابق خط زنجیره ای نشان داده شده در شکل بوجود می آید. دیود $D1$ برای این مسیر جریان یک دیود هرزگرد می باشد. اگر فرکانس سوئیچینگ در محدوده چند KHz تا ۳۰ KHz انتخاب شود، مولفه ریل در جریان بار خیلی آرام است. چون در این درایو ولتاژ اعمال شده به موتور قطعه قطعه یا بریده بریده است، این درایو اغلب "برشگر"^۳ نامیده می شود. هنگامیکه جریان آشکار شده از مقدار مطلوب کمتر باشد، بازه ON ترانزیستور $Tr2$ طولانی تر از بازه OFF می شود تا جریان بیشتری از منبع کشیده شود. از طرف دیگر، اگر جریان آشکار شده بیشتر از مقدار مطلوب متناظر با ولتاژ مرجع V_r باشد، بازه OFF طولانی تر از بازه ON می شود تا جریان بار کاهش یابد. ولتاژ متوسط اعمال شده به درایو موتور، E_{avg} ، اینطور بدست می آید:

1- pulse-width modulation

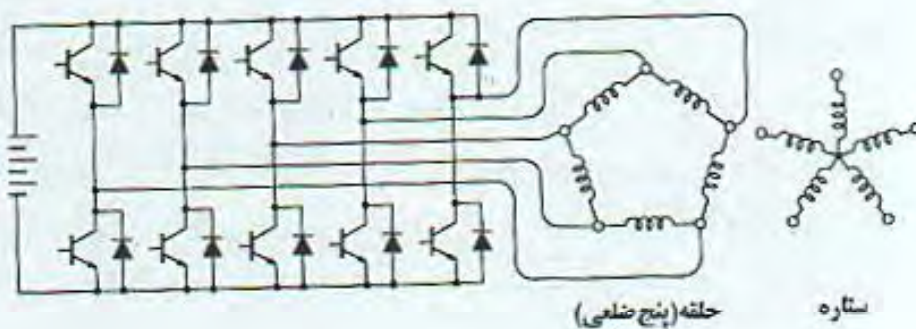
2- pick-up

۲- تعریف دیگر آن حداقل جریان، ولتاژ، توان، یا هر پارامتر دیگری که در وله ای کار خود را کامل می کند می باشد، همچنین pick-up voltage ولتاژی است که در آن ابزار مقناطیسی شروع به کار می کند.

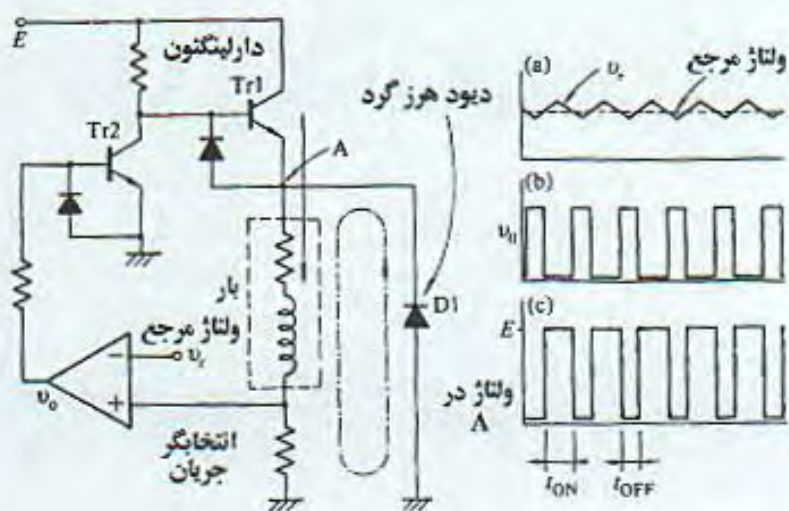
3- chopper



شکل ۵.۲۴. مدار پل سه‌فاز.



شکل ۵.۲۵. مدار پل پنج‌فاز.



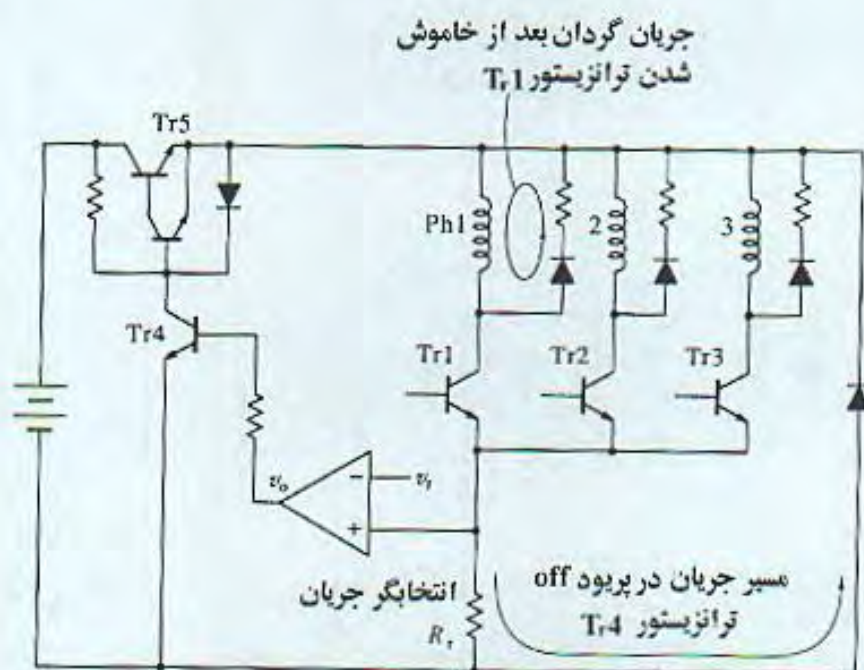
شکل ۵.۲۶. مدار و شکل موجهای PWM (= پهنای پالس مدوله شده).

$$E_M = E \times \text{نسبت زمانی} = E \times \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad (5.2)$$

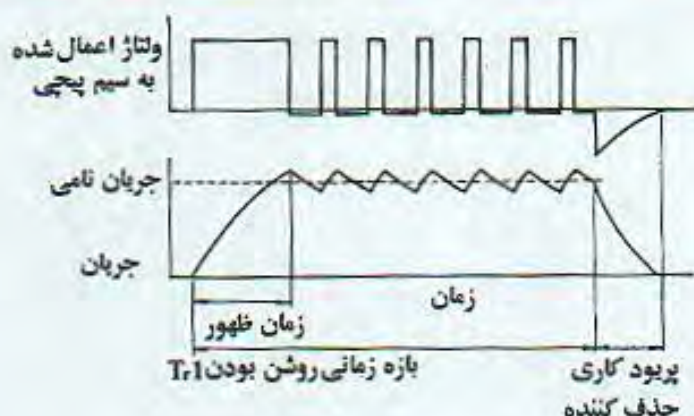
مزایای درایور PWM با برشگر آن است که جریان نامی بطور خودکار توسط یک منبع تغذیه واحد بدست می‌آید و تلف توان اندک است.

شکل موج جریان مدار شکل ۵.۲۷ را در نظر می‌گیریم. بعد از اینکه Tr1 در درایو یکفاز در تحریک روشن شد، جریان ظهور می‌کند اما از مقدار مرجع متناظر شامل مولفه AC اضافه شده کمتر می‌باشد، و ترانزیستورهای Tr4 و Tr5 در حالت ON هستند بطوریکه ولتاژ تغذیه بالا به سیم‌پیچی Ph1 اعمال می‌شود و جریان سرعت ظهور می‌کند. هنگامیکه جریان به محدوده متغیر V_f/R_f وارد می‌شود، ترانزیستورها به حالت ON-OFF یا برشگر می‌روند، و جریان سیم‌پیچی مطابق شکل ۵.۲۸ خواهد بود، و منطبق بر مقدار نامی یا مطلوب است. هنگامیکه Tr1 خاموش است، جریان باعث حذف‌کننده دیود / ترانزیستوری موازی با سیم‌پیچی سرعت میرا می‌شود.

در این نوع درایور PWM، فرکانس برشگر توسط یک منبع جریان معین می‌شود. یک روش جایگزین بکارگیری مکانیزمی خودنوسان، با استفاده از ثابت زمانی الکتریکی سیم‌پیچی‌ها می‌باشد. یک نارسایی PWM نویز الکتریکی و صوتی ناشی از درایور می‌باشد.



شکل ۵.۲۷. یک طرح درایور از نوع PWM

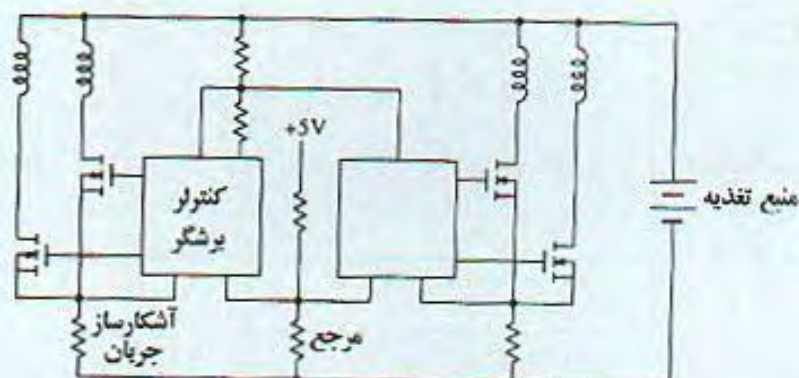


شکل ۵.۲۸. شکل موج ولتاژ و جریان برشگر.

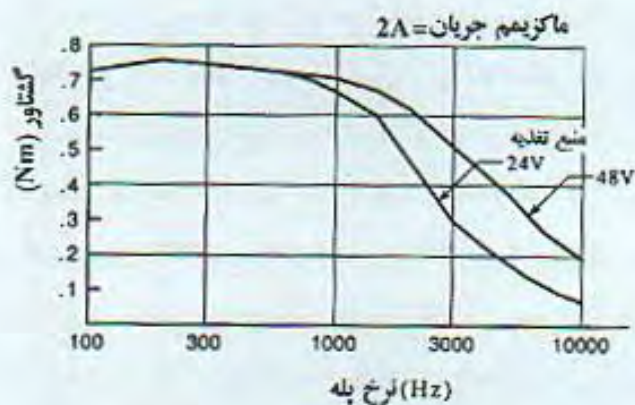
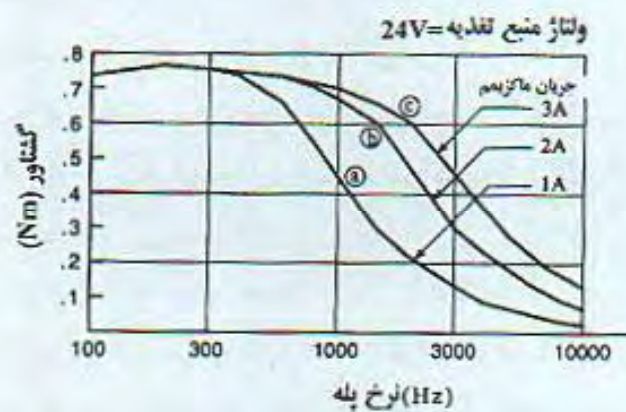
۵.۳.۸. تنظیم مشخصه‌های دینامیک یک موتور پله‌ای با استفاده از درایور برشگر

هنگامیکه افزایش محدوده گشتاور چته از موتوری با اندازه یکسان ولی با پارامترهای سیم‌پیچی متفاوت مطلوب باشد، اغلب مدار درایور را مجدداً طراحی می‌کنیم. دو حالت نمونه در اینجا برای یک موتور هیبرید دوفاز ارائه خواهد شد. ترکیب مدار مورد استفاده در این آزمایشها در شکل ۵.۲۹ نشان داده شده است. این مدار برای برش از ترانزیستور استفاده نمی‌کند، اما MOSFETهای قدرت اصلی جریان را به‌نگام روشن بودن برش می‌دهند.

(۱) ثابت نگهداشتن منبع ولتاژ و فاکتور فضا^۱. فرض کنید لازم است محدوده گشتاور چته را بدون تعویض منبع ولتاژ n برابر کنید. گشتاور نگهدارنده را می‌توان افزایش داد چون به ساختار ماشین بستگی دارد. برای افزایش گشتاور چته بایستی تعداد دورها را n بار کاهش و قطر سیم کلافها را $n^{1/2}$ بار به ازای فاکتور فضایی ثابت افزایش دهیم. برای فراهم کردن همان نیرو محرکه مغناطیسی (آمپر-دور) نسبت جریانها n برابر افزایش می‌یابد. شکل (a) نمونه‌ها را نشان می‌دهد. منحنی (a) منحنی مشخصه قبل از طراحی مجدد است؛ جریان نامی $1A$ است. برای دو برابر کردن محدوده گشتاور چته به ازای گشتاور بار ثابت، تعداد دورها به نصف کاهش یافته و مقطع عرضی سیم دو برابر می‌شود. هنگامیکه جریان محدودکننده روی $2A$ تنظیم شود منحنی (b) بدست می‌آید. منحنی (c) از طراحی بدست آمد که تعداد دورها برای تنظیم جریان نامی در $3A$ کاهش بیشتری داشتند. برای کار با جریانهای بزرگتر المانهای سونیچینگ و دیودها باید دارای جریانهای نامی بالایی باشند. باید توجه کرد که در محدوده‌های نرخ پله بالاتر توان ورودی به اندازه n برابر افزایش می‌یابد، و از اینرو تلف درون موتور بیشتر می‌شود. باید معیارهایی را برای گرمای موتور و مدار درایور در نظر گرفت.

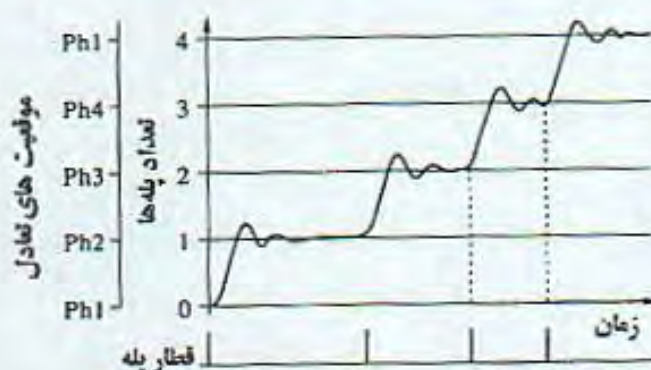


شکل ۵.۲۹. یک مدار برشگر برای یک موتور هیبرید دوفاز.



شکل ۵.۳۰. تغییر مشخصه‌های گشتاور چگانه. (a) کاهش تعداد دورها و افزایش جریان نامی، (b) افزایش ولتاژ

تغذیه.



شکل ۵.۳۱. پاسخ پله واحد.

(۲) ثابت نگهداشتن جریان ماکزیمم. اگر افزایش ولتاژ تغذیه بجای افزایش جریانه‌های نامی امکان‌پذیر باشد نیازی به تغییر سیم‌پیچی‌ها نداریم؛ از همان موتور محدوده‌های گشتاور چنده بزرگتری بدست می‌آید. شکل (b) ۵.۳۰ چنان نمونه‌ای را نشان می‌دهد. منبع ولتاژ از ۲۴ به ۴۸V افزایش می‌یابد. در این حالت هم توان ورودی در محدوده‌های نرخ پله بالا دوبرابر می‌شود. در محدوده‌های پایین‌تر ولتاژ موثر اعمال شده به موتور در هر حالتی از ۲۴V کمتر است.

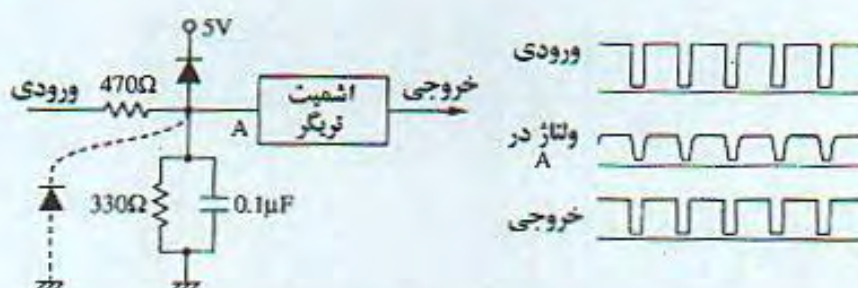
۵.۴ کنترل ورودی

آخرین بخش سیستم درایو که باید در این فصل بررسی شود کنترل ورودی است که تعداد پالس‌های فرمان پله و زمان‌بندی آنها، و در برخی کاربردها سیگنال جهت را کنترل می‌کند.

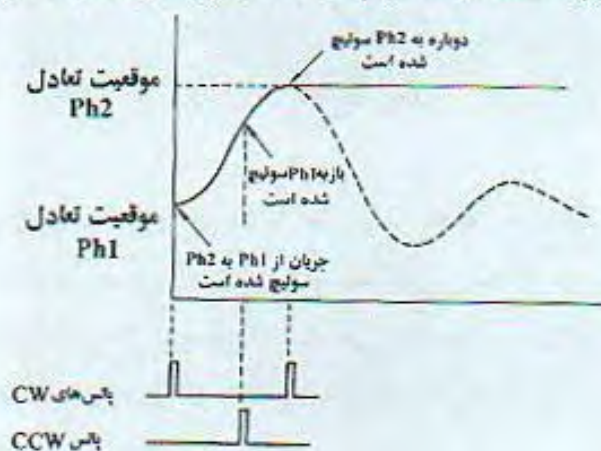
۵.۴.۱ کنترل پله واحد

ساده‌ترین کنترل سیستمی است که یک نمونه با یک پله واحد انجام می‌دهد. رابطه پله بر زمان در این سیستم مطابق شکل ۵.۳۱ خواهد بود. نمودار تعیین موقعیت معمولاً نوسانی است و میرایی آن به موتور و طرح درایور مورد استفاده بستگی دارد. کنترل ورودی بسیار ساده است، چون وظیفه آن تنها فراهم کردن یک سیگنال خروجی است که برای ورودی توالی‌ساز مناسب باشد. مثالی در شکل ۵.۳۲ نشان داده شده است، که ویژگی‌های زیر را داراست.

۱. سیگنال ورودی در یک سطح H مناسب بریده شده است. (در شکل در ۵V).



شکل ۵.۳۲. کنترل ورودی مورد استفاده در عملکرد پله واحد، که بطور گسترده بعنوان شکل دهنده موج بکار می‌رود.



شکل ۵.۳۳. زاویه چرخش و زمان بندی پالس در میرایی برگشت فاز.

۲. نویز در خازن جذب می‌شود.

۳. چون سیگنال ورودی توسط خازن تغییر شکل داده می‌شود، بوسیله یک اشمیت تریگر دوباره شکل داده می‌شود. اگر بخشی از سیگنال ورودی کمتر از پتانسیل زمین باشد، باید دیودی به مدار اضافه شود که در شکل با خط چین نشان داده شده است. اکثر توالی‌سازهای یونیورسال دارای یک اشمیت تریگر درون ساخت می‌باشند.

۵.۴.۲ کنترل ورودی برای میراکننده الکترونیکی

برای انجام یک پله واحد بدون نوسان، روشی بنام 'برگشت فاز' // مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه بین نمودار موقعیت و زمان بندی پالس در شکل ۵.۳۳ نشان داده شده است. به موتور، در حال سکون در یک موقعیت تعادل با Ph1 تحریک شده، فرمان داده می‌شود تا به موقعیت تعادل بعدی

حرکت کند. اگر روتور با تحریک Ph2 به افزایش سرعت ادامه دهد، از موقعیت تعادل بعدی جهش^۱ خواهد کرد. پس، با حرکت روتور به سمت موقعیت تعادل فاز بعدی، Ph2 خاموش و Ph1 دوباره روشن می‌شود. این امر یک گشتاور تاخیر تولید می‌کند که سرعت روتور را کاهش می‌دهد. هنگامیکه ممان روتور توسط گشتاور تاخیر از بین رفت، روتور قبل از اینکه در جهت عکس به موقعیت قبلی حرکت کند بطور لحظه‌ای ساکن می‌شود. در این لحظه، تحریک دوباره به Ph2 سوئیچ می‌شود. پالس معکوس کننده باید بدقت زمان‌بندی شود بطوریکه وقتی روتور در موقعیت تعادل Ph2 است به سرعت صفر برسد. از اینرو هنگامیکه جریان تحریک دوباره به Ph2 سوئیچ می‌شود، روتور در موقعیت تعادل Ph2 بدون هیچگونه جهش یا نوسانی قفل خواهد شد. این تکنیک را می‌توان با اضافه کردن پالس‌های بیشتر جلوتر از پالس برگشت فاز به بیش از یک پله حرکت اعمال کرد. تنظیم استقرار پالس اینطور خلاصه می‌شود:

۱. تنظیم پالس‌های جلویی برگشت فاز برای افزایش سرعت موتور در یک زمان حداقل.
۲. تنظیم پالس برگشت فاز برای کند کردن حرکت بار بطوریکه به موقعیت نهایی پله خود برسد.
۳. تنظیم آخرین پالس برای نگهداری بار در موقعیت نهایی خود با کمترین نوسان.

۵.۴.۳ حرکت نموی میراشده با پله‌های چندگانه^۲

حرکت تک پله عموماً نوسانی است. اما حرکت‌های نموی غیرنوسانی را می‌توان با چندین پله با زمان‌بندی مناسب پالس انجام داد. در اینجا دو مثال آورده شده است.

(۱) میرایی الکترونیکی آخرین پله تاخیردار (DLSED)^{۳/۱/۱} این تکنیک با توجه به شکل ۵.۳۴ توضیح داده می‌شود. فرض کنید حرکت به اندازه سه پله مطلوب باشد. اگر یک قطار پالس سه‌تایی با نرخ متوسط اعمال شود پاسخ مطابق (a) خواهد بود. بهر حال، اگر پریود بین پالس‌های اول و دوم تنظیم شود، روتور می‌تواند تنها با یک پله جهش کند تا به موقعیت نهایی پله خود برسد. از اینرو پالس آخر برای نگهداری روتور در مکان سرعت صفر خود اعمال می‌شود، همانطور که در (b) نشان داده شده است. اگر اصطکاک سیستم طوری باشد که روتور یک پله جهش نکند، این تکنیک را نمی‌توان بکار برد. به همین ترتیب، از آن نمی‌توان برای کمتر از سه پله استفاده کرد.

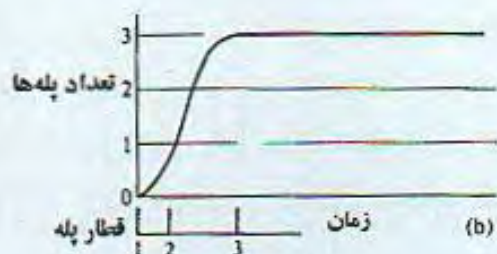
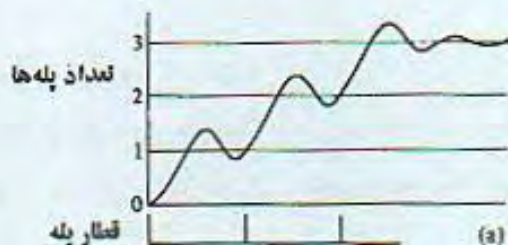
(۲) میرایی الکترونیکی با نرخ پالس ثابت. اگر یک حرکت نموی غیر نوسانی با چندین پالس در فواصل مساوی انجام گیرد، کنترلر ورودی ساده می‌شود. Niimura^{۴/۱/۲} مثال‌هایی از حرکت نموی میراشده روی یک موتور با روتور بیرونی از نوع VR، با سه تا شش پالس با فواصل مساوی در هر دو

1- overshoot

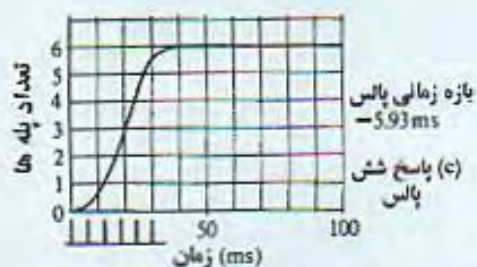
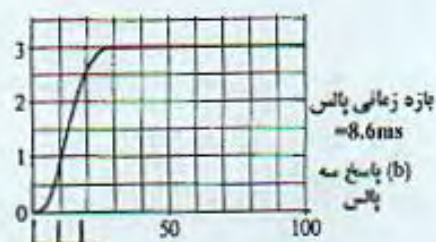
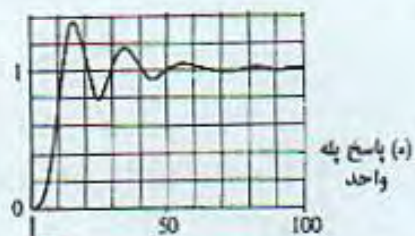
2- multi-step

3- delayed-last-step electronic damping

درایو یکفاز در تحریک و دوفاز در تحریک را نشان می‌دهد. برخی نمونه‌های درایو روش نیم‌پله با ۶ تا ۱۲ پله را هم ارائه کرد. شکل (a) ۵.۳۵ پاسخ پله واحد آن را در درایو دوفاز در تحریک نشان می‌دهد. شکل‌های (b)، (c) ۵.۳۵ بترتیب مربوط به درایو سه پله و شش پله می‌باشند.



شکل ۵.۳۴. عملکرد سه پله معمولی و (b) DLSED سه پله.



شکل ۵.۳۵. حرکت تک پله و حرکت‌های غیرنوسانی با چندین پالس با فواصل مساوی.

۵.۵ کنترل افزایش و کاهش سرعت توسط یک ریزپردازنده

برای بکارگیری یک موتور پله‌ای قبل از رسیدن به نرخ پله خودراه‌اندازی، باید برخی تکنیک‌های افزایش/کاهش سرعت بکار گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که هیچ پله‌ای از دست نمی‌رود. در یک سیستم درایو حلقه‌باز به معنی این است که موتور با یک نرخ پله راه‌اندازی ماکزیمم یا کمتر از آن راه‌اندازی می‌شود و سپس نسبت به زمان تا رسیدن به سرعت مطلوب افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، در اکثر موارد، موتور باید قبل از توقف بدون خطای موقعیت به سرعتی کمتر از نرخ توقف ماکزیمم خود کاهش یابد.

در این بخش کنترل افزایش/کاهش خطی سرعت با استفاده از یک ریزپردازنده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. یکی از قابل توجه‌ترین ویژگیهای ریزپردازنده در انعطاف‌پذیری آن از نظر ترم‌افزاری می‌باشد. همچنین یک ریزپردازنده این مزیت را دارد که نه تنها برای زمان‌بندی پله برای بلکه برای توالی‌سازی منطقی و بازی کردن نقش کنترلر ورودی بکار می‌رود. در اینجا ما یک پردازنده Z80 را انتخاب کرده‌ایم که به چند دلیل بهترین انتخاب برای یک مبتدی است. اولاً، یک ریزپردازنده ۱۶ بیتی خیلی بزرگ است و بعلاوه معماری پیچیده و گرانر زبان اسمبلی دشوار آن همواره مناسب نیست، و کنترل دقیق زمان‌بندی پله‌ها آسان نیست. اگر یک زبان پیشرفته مانند C بکار رود، خود نرم‌افزار آسان است، اما، بعلاوه کارکرد برنامه مترجم^۱، فواصل کوچک پله را نمی‌توان تولید کرد. پردازنده‌های هشت بیتی برای این نوع کاربرد مناسبترین هستند. انواع مختلفی از پردازنده هشت بیتی وجود دارند، اما Z80 غالب‌تر است.

افزایش خطی سرعت همواره بهترین انتخاب نیست، اما این تکنیک را می‌توان با انجام بهترین الگوی افزایش/کاهش سرعت برای هر کاربردی بهبود بخشید. بخصوص، هنگامیکه بار موتور شامل یک قسمت الاستیک مانند تسمه زمان‌بندی^۲ باشد، افزایش خطی ساده سرعت بعلاوه نوسانات القا شده از تعامل بین الاستیسته و جرم در بار خوب انجام نمی‌گیرد. در برخورد با چنین مواردی، ابتدا لازم است تا سرعت محور را با استفاده از طرح افزایش خطی سرعت ذکر شده مشاهده کنیم، و ناحیه‌هایی که به افزایش سریعتر یا کندتر سرعت نیاز دارند تعیین کنیم. به این منظور باید یک سنسور سرعت مانند سرعت‌سنج^۳ روی محور قرار داده شود. بعد از چندین مرتبه تنظیم مجدد داده فاصله پالس، به کنترل بهینه افزایش و کاهش سرعت دست می‌یابیم.

نرم‌افزار ارائه شده در اینجا حتی برای افزایش‌های غیرخطی سرعت قابل استفاده است، اما در برخی موارد، تغییر نهایی روی داده فاصله پالس که از تئوری مورد بررسی در بخش ۶.۴ تعیین شد ضروری

1- compiler

2- timing belt

3- tachometer

می‌باشد.

۵.۵.۱ اساس بکارگیری یک ریزپردازنده Z80 و فلوچارت کلی

برای نوع خاصی از ریزپردازنده، طرح‌های مختلفی از یک برنامه برای منظوری مشخص داریم. در مثال حاضر، یک الگوریتم ساده با استفاده از یک پردازنده Z80 ارائه خواهد شد. پردازنده Z80 دارای هفت رجیستر یونیورسال به نام‌های A, B, C, D, E, H و L می‌باشد. (در واقع، دسته دیگری از رجیسترها موجودند، که برای بحث ما ضروری نیستند). با اینکه هر یک از آنها یک رجیستر هشت بیتی است، رجیستر B و C، هنگامیکه ترکیب شوند، می‌توانند بعنوان یک جفت رجیستر BC و یک رجیستر ۱۶ بیتی کار کنند، و به همین ترتیب DE و HL. بعلاوه پردازنده دارای دو رجیستر شاخصه ۱۶ بیتی به نام‌های IX و IY می‌باشد، که برای مشخص کردن آدرس‌های حافظه مناسب هستند. ما این رجیسترها را برای وظایف زیر بکار می‌بریم.

رجیستر A این رجیستر اصلی برای منظوره‌های مختلفی بکار می‌رود.

رجیستر B این رجیستر برای ذخیره حالت تحریک جاری چهار سیم‌پیچی یا فازها بکار می‌رود.

رجیستر C و E رجیستر C ابتدا برای شمارش پله‌های تکمیل شده بکار می‌رود، در حالیکه رجیستر E برای شمارش تعداد پله‌های باقیمانده در یک حرکت بکار می‌رود. هنگامیکه دستور حرکتی با p پله داده شود، عدد p به E بار می‌شود، و C با صفر پاک می‌شود. بعد از اینکه یک فرمان پله اجرا شد، محتوای C یک واحد افزایش و محتوای E کاهش می‌یابد. یک نمونه از رابطه بین فواصل پالس و تغییرات محتوای C و E در شکل ۵.۳۶ برای چندین حالت از پله‌ها نشان داده شده است. نمودارهای فرمان سرعت بر زمان در شکل ۵.۳۷ نشان داده شده‌اند؛ به موتور فرمان داده می‌شود تا با نرخ پله f_0 شروع به حرکت کند، بطور خطی تا نرخ چرخش f افزایش سرعت داشته باشد، و در این سرعت ثابت حرکت کند. برای توقف، موتور بطور تدریجی با سرعتی که در آن می‌تواند بدون جهش از موقعیت هدف توقف کند کاهش سرعت می‌یابد.

رجیستر D این رجیستر برای ذخیره کدی که جهت چرخش یا دستور پایان حرکت را کنترل می‌کند بکار می‌رود که بصورت زیر است:

$D=0$ برای جهت CCW ← برنامه LEFT

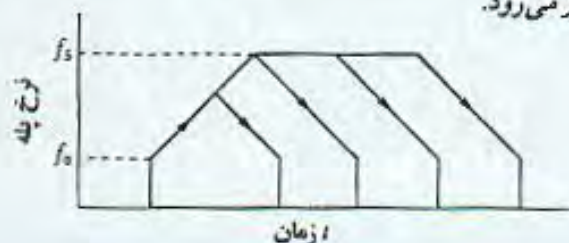
$D=1$ برای جهت CW ← برنامه RIGHT

$D=2$ برای دستور پایان حرکت ← برنامه STOP

E=1	C=0	Δt_1	0	1											
E=2	C=0	Δt_1	1	0											
E=3	C=0	Δt_1	2	1	0										
E=4	C=0	Δt_1	3	2	1	0									
E=5	C=0	Δt_1	4	3	2	1	0								
E=6	C=0	Δt_1	5	4	3	2	1	0							
E=48	C=0	Δt_1	47	46	26	25	24	23	22	2	1	0			
E=49	C=0	Δt_1	48	47	27	26	25	24	23	22	2	1	0		
E=50	C=0	Δt_1	49	48	28	27	26	25	24	23	22	2	1	0	
E=51	C=0	Δt_1	50	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	1	0

شکل ۵.۳۶. رابطه بین فواصل پالس و تغییرات داده‌ها در رجیستر E و C هنگامیکه ۲۴ پله برای افزایش سرعت قبل

از چرخش^۱ بکار می‌رود.



شکل ۵.۳۷. رابطه نموداری فرمان سرعت بر زمان.

جفت رجیستر BC و DE با استفاده از دستورهای $PUSH$ و POP یک رجیستر را می‌توان برای دو یا چند منظور بکار برد. در این برنامه، کاربرد دیگری از BC و DE بعنوان مکمل رجیستر شاخصه IX در محاسبه آدرس حافظه‌های ذخیره‌کننده داده‌ها است که از روی آنها زمان‌بندی مناسب پالس ایجاد می‌شود. BC در برنامه‌های $ACCEL$ و $SLEW$ و DE در برنامه $DECEL$ بکار می‌رود. رجیسترهای شاخصه‌ای IX و IY در ریزپردازنده $Z80$ ، رجیسترهای شاخصه‌ای IX و IY اغلب برای مشخص کردن آدرس حافظه‌ای بکار می‌روند که از (یا به) آن داده‌ای به (یا از) رجیستری منتقل می‌شود. در این برنامه، در حالیکه IX برای تعیین آدرس‌های حافظه ذخیره‌کننده داده‌های فاصله پالس بکار می‌رود، IY برای مشخص کردن آن آدرس حافظه‌های ذخیره‌کننده دستور حرکت و داده‌های پله بکار می‌رود.

بعد از بازیافت داده‌های جهت/پله از حافظه، رجیستر IY بکار می‌رود. همانطور که در شکل ۵.۳۸ نشان داده شده است اولین داده، که فرمان جهت اولین حرکت است، در آدرس حافظه مشخص شده با $STEPDA$ ذخیره شده است، که در واقع $9000H$ و یک عدد زوج می‌باشد. در اینجا نماد H نشان می‌دهد که عدد قبل از آن هگزادسیمال است. این داده بازیافت شده و به رجیستر D بار می‌شود تا مشخص شود که فرمان جهت است یا توقف. بطور مشابه، رجیستر E با داده موجود در آدرس حافظه $9001H$ ، یک عدد فرد، بار می‌شود. پردازنده به دفعات بسیار این $IOOP1$ را انجام می‌دهد تا یک ۲ به رجیستر D بار کند. بخاطر دستور

آدرس	بایت حافظه	
$STEPDA$	جهت	برای اولین حرکت
$STEPDA+1$	فاصله	
$STEPDA+2$		2nd
$STEPDA+3$		
$STEPDA+4$		3rd
$STEPDA+5$		
$STEPDA+6$		4th
$STEPDA+7$		
$STEPDA+8$		5th
$STEPDA+9$		
$STEPDA+10$		6th
$STEPDA+11$		
$STEPDA+12$		7th
$STEPDA+13$		
$STEPDA+14$		
$STEPDA+15$		
$STEPDA+16$		

شکل ۵.۳۸ ناحیه حافظه برای جهت و تعداد پله‌ها برای چرخش.

نمو، یعنی $IX+2$ در برنامه NEXT، رجیستر D را با کد جهت 0، 1، یا کد پایان حرکت 2 از هر آدرس حافظه زوج متوالی که با عنوان STEPDA شروع می‌شود، و رجیستر E را با تعداد پله‌ها در هر حرکت از هر آدرس حافظه فرد متوالی بار خواهد کرد. توجه کنید که کد جهت 2 در آخرین آدرس حافظه فرد ناحیه داده‌های حرکت (با شروع از عنوان STEPDA) ذخیره خواهد شد.

همانطور که در شکل ۵.۳۹ نشان داده شده است، عنوان دیگر TIMEDA در اولین آدرس ناحیه حافظه ذخیره‌کننده داده‌های فاصله پالس ($Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_m, \dots, Q_n$) معرفی شده است. از اینرو یک Q_m در دو بایت ذخیره می‌شود (برای مثال‌هایی از Q_m بکار رفته در این برنامه به جدول ۶.۳ مراجعه کنید). هنگامیکه یک داده فاصله پالس به پردازنده وارد می‌شود، رجیستر IX برای مشخص کردن آدرس آن بکار می‌رود. به این منظور، IX با $TIMEDA-1$ شروع می‌شود. داده فاصله پالس در برنامه WAIT بکار رفته است. بهر حال، همانطور که در شکل ۵.۴۴ نشان داده شده است، قبل از آن، رجیستر IX در برنامه DECEL با $TIMEDA-1+2E-1$ یا در برنامه ACCEL با $TIMEDA-1+2C-1$ بار شده است. در اینجا E و C بترتیب محتوای رجیسترهای E و C را نشان می‌دهند.

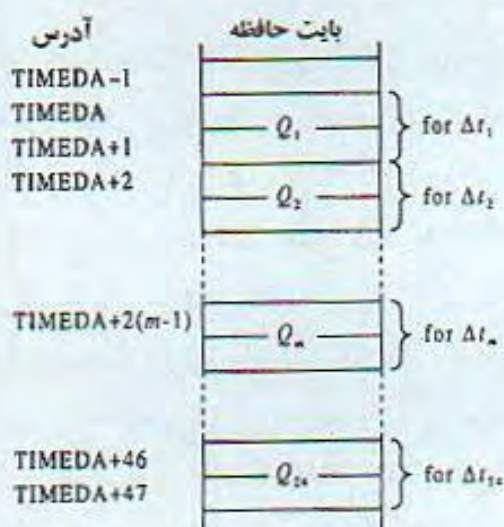
ما ابتدا برنامه ACCEL را بررسی می‌کنیم. ارزش C بعد از اجرای اولین فرمان پله 1 می‌باشد. حال، $TIMEDA-1+2C-1 = TIMEDA$ ، که در این حالت 9100H است، در IX قرار خواهد گرفت. داده موجود در 9100H/9101H برابر با 1656 می‌باشد، و این داده به جفت رجیستر HL با توجه به IX در برنامه WAIT بار خواهد شد.

بعد از تولید اولین فاصله پالس (پله) C برابر 2 می‌شود. IX آدرس $TIMEDA-1+2 \times 2-1$ یا 9102H را دربر خواهد داشت بطوریکه داده 1420 این آدرس به HL در برنامه WAIT بار می‌شود. هنگامیکه C برابر 3 می‌باشد، IX آدرس $TIMEDA+4$ یا 9104H را خواهد داشت، و HL مقدار 1263 را خواهد داشت. از اینرو داده‌های فاصله پالس بترتیب دریافت می‌شوند تا فواصل پالس تولید شود.

فاصله پالس واقعی Δt_m از داده Q_m و تعداد حالت‌ها در اجرای بعضی از قسمت‌های برنامه محاسبه می‌شود، و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta t_m = (aQ_m + b) t_c \quad (5.3)$$

که a و b ثابت‌هایی هستند که توسط نرم‌افزار تعیین می‌شوند، و t_c پریود یک حالت ساعت می‌باشد. $1/t_c$ فرکانس ساعت برای درایو ریزپردازنده است: در مثال ارائه شده در اینجا ۴MHz می‌باشد.



شکل ۵.۳۹ ناحیه حافظه برای داده‌های فاصله پالس.

جفت رجیستر HL در این برنامه، جفت رجیستر HL برای تولید زمان انتظار در هر دو برنامه $ACCOM$ و $WAIT$ بکار رفته است. کاربرد آن در برنامه $WAIT$ بصورت زیر است. ابتدا، رجیسترهای H و L بطور جداگانه با داده‌های موجود در ناحیه حافظه بار می‌شوند، سپس در کنار هم یک رجیستر جفت ۱۶ بیتی را تشکیل می‌دهند. با انجام $LOOP4$ نشان داده شده در فلوچارت شکل ۵.۴۵، محتوای جفت رجیستر HL تا وقتی که صفر شود کاهش می‌یابد. برای بررسی اینکه HL چه موقع صفر است، عمل OR برای هر بیت متناظر H و L انجام می‌شود. اگر نتیجه صفر باشد، به این معنی است که هر بیت در رجیستر H و L صفر است که $HL=0$ نوشته می‌شود.

۵.۵.۲ فلوچارت و برنامه

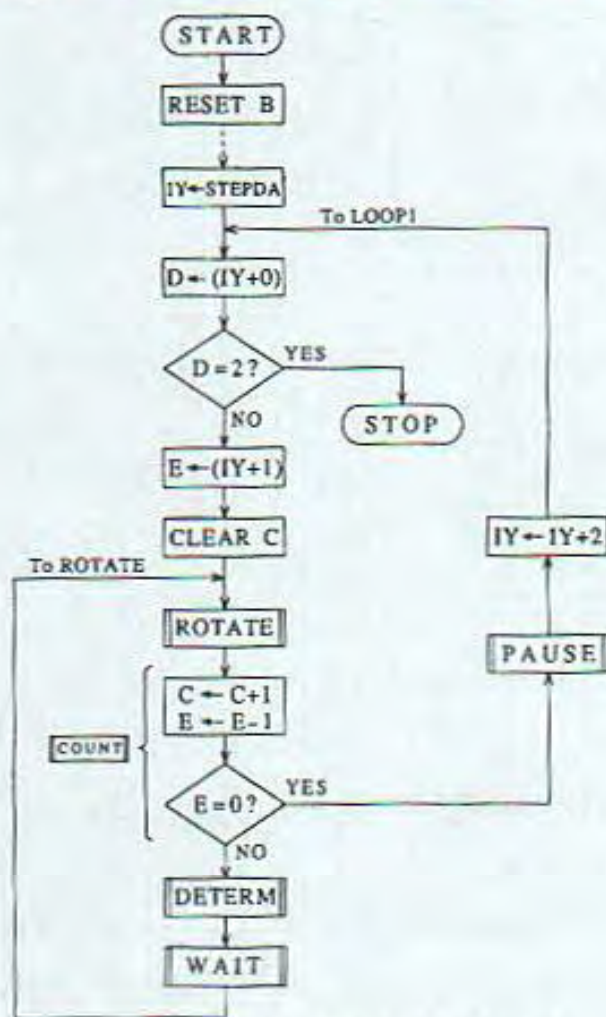
روش ارزشیابی a و b در رابطه (۵.۳) و شمارش تعداد حالت‌های برنامه $Z80$ در بخش ۵.۵.۳ بررسی خواهد شد. قبل از آن، به فلوچارت کل برنامه، در شکل ۵.۴۰، نگاه کنید. توضیح جزئیات و برنامه جزء به جزء بصورت زیر داده خواهد شد:

(1) $START$ تا انتهای $LOOP1$ فلوچارت و برنامه دقیق‌تر در شکل ۵.۴۱ نشان داده شده‌اند.

برنامه در این مثال از آدرس $8000H$ شروع می‌شود.

رجیستر B دارای مقدار اولیه و حالت تحریک $reset$ می‌شود. این مرحله از سه زیرمرحله تشکیل

شده است:



شکل ۵.۴۰. فلوچارت کلی برنامه.

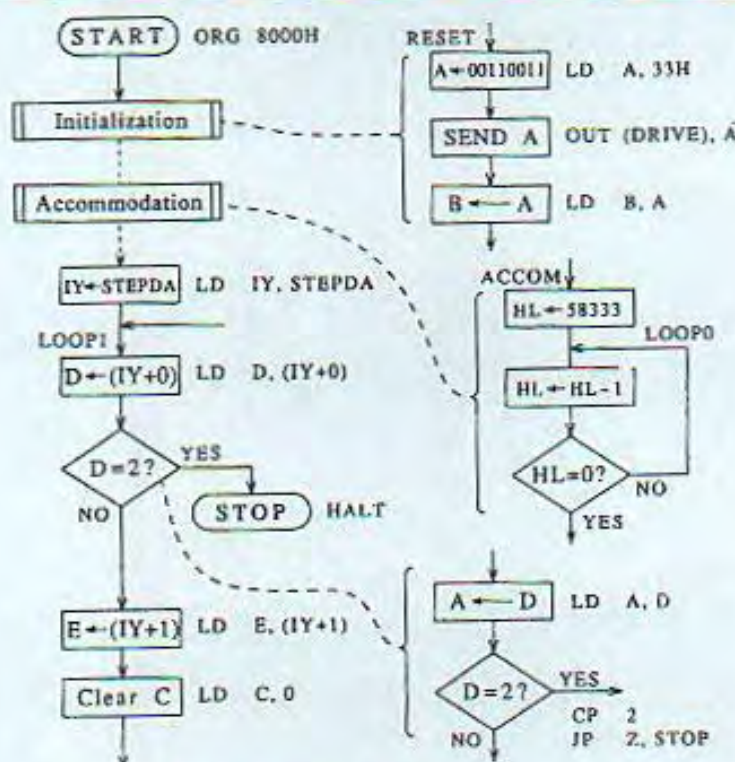
(۱) $A \leftarrow 33H$. رجیستر A با $33H$ بار می‌شود تا موتوری را در روش دوفاز در تحریک درایو کند.
(۲) SEND A. این کد از طریق یک پورت خروجی مطابق شکل ۵.۹(a) به درایور فرستاده می‌شود.
سیم‌پیچی‌های PhA و PhB به عملیات یک پتانسیل مثبت $5V$ به مدارهای پایه PhA و PhB تحریک می‌شوند.

(۳) $B \leftarrow A$. داده موجود در رجیستر A به رجیستر B منتقل و ذخیره می‌شود.

برنامه ACCOM در شکل ۵.۴۱ به منظور قرار دادن موتور در موقعیت اولیه با طول زمانی معلوم طبق مراحل زیر می‌باشد:

۱. $HL \leftarrow 58333$. جفت رجیستر HL با 58333 بار می‌شود.

۲. $HL \leftarrow HL-1$. هنگامیکه داده موجود در HL در هر تکرار LOOP0 کاهش می‌یابد، مقدار 58332 ، 58331 ، 58330 و ... را خواهد داشت.



شکل ۵.۴۱. فلوجارت دقیق از START تا CLEAR C

۳. $H \text{ OR } L = 0$ ؟ داده موجود در HL تا وقتی که صفر شود کاهش می‌یابد. چون رجیستر هشت‌بیتی A برای عملیات منطقی بکار می‌رود، جفت رجیستر HL به دو جزء هشت‌بیتی به نام‌های H و L تفکیک می‌شود، و عمل OR برای بررسی صفر بودن آنها بکار می‌رود. اگر فرکانس ساعت ۴MHz باشد زمان $3/5s$ صرف خواهد شد.

رجیستر IY با عددی که با عنوان STEPDA مشخص شده بار می‌شود، که با دستور دیگری بصورت 9000H بیان می‌شود. همانطور که در شکل ۵.۳۸ نشان داده شده است، یک حرکت با دو بایت هدایت می‌شود؛ بایت اول برای جهت یا کد پایان حرکت و دومی تعداد پله‌ها در یک حرکت می‌باشد.

رجیستر D با داده موجود در آدرس حافظه مشخص در رجیستر IY بار می‌شود. مقدار اولیه STEPDA یا 9000H، می‌باشد که جهت اولین حرکت را ذخیره می‌کند. توجه کنید که در ناحیه 9000H به بعد کد جهت / پایان حرکت آدرس $IY+0$ است و داده مربوط به تعداد پله‌ها $IY+1$ می‌باشد. در اینجا 'IY' در عبارت $IY+n$ داده موجود در رجیستر IY را نشان می‌دهد، و () مفهوم آدرس را می‌رساند.

اگر داده ۲ باشد، برنامه به STOP می‌رود، که با کد حافظه‌ای HALT دستور می‌گیرد تا برنامه را

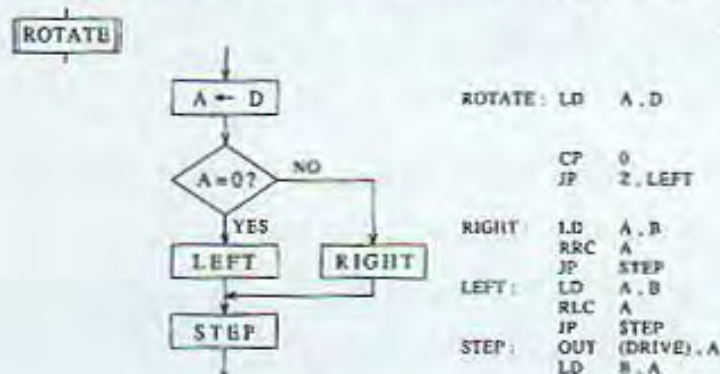
متوقف کند. برای بررسی داده موجود در رجیستر D، به رجیستر A منتقل می شود تا با 2 مقایسه شود. اگر داده ۲ نباشد، برنامه ادامه می یابد و رجیستر E با تعداد پله ها بار می شود. که در آدرس حافظه نشان داده شده با $IY+1$ ذخیره شده است. رجیستر C با صفر پاک می شود.

(۲) توالی ساز منطقی (برنامه ROTATE). قبل از بحث تولید پالس های با زمان بندی برنامه ریزی شده، خواهیم دید که چگونه CPU جهت درایو خود را برای موتور مطابق شکل ۵.۱۰ انتخاب می کند.

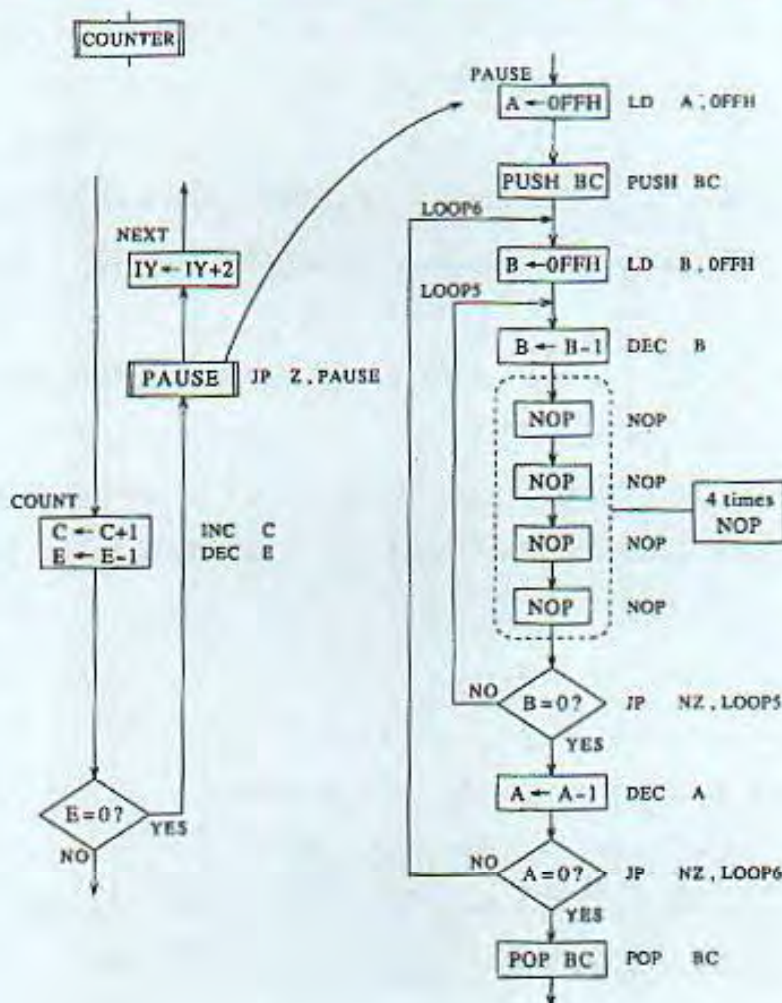
حال، داده یکسانی در رجیسترهای A و D وجود دارد. این مورد چه رجیستر A بکار رود یا صفر باشد بررسی می شود. اگر برابر صفر باشد، برنامه به برنامه LEFT و بعد از آن به برنامه STEP می رود. اگر صفر نباشد، ابتدا برنامه RIGHT اجرا خواهد شد، و سپس برنامه به LEFT می رود و به STEP پرش^۱ می کند. از اینرو، تنها یک مسیر را می توان انتخاب کرد، انحصاراً LEFT-STEP یا RIGHT-STEP.

در STEP، داده موجود در رجیستر A، که از رجیستر B منتقل شده و در جهت عکس ساعتگرد (RLC در LEFT) یا ساعتگرد چرخیده است، از یک پورت خروجی بیرون فرستاده می شود تا موتور را یک زاویه پله در جهت مربوط پیش براند. این داده در رجیستر B برای استفاده بعدی به هنگامیکه برنامه LEFT یا RIGHT دوباره فراخوانده شده ذخیره می شود.

تغییر داده در رجیستر B در شکل (a) ۵.۱۰ با 00110011، شکل باینری 33H، نشان داده شده است. عملکرد توالی ساز منطقی با برداشتن ۴ بیت کم ارزش تر از هشت بیت سیگنال پورت خروجی انجام می گیرد. شکل (b) ۵.۱۰ مربوط به تحریک تک فاز است؛ چهار بیت کم ارزش تر هم برداشته شده اند، اما داده اولیه برای رجیستر B برابر با 00010001 می باشد. شکل (c) ۵.۱۰ مربوط به درایو نیم پله است؛ و داده اولیه برای B برابر با 00000111 می باشد و چهار بیت زوج برای سیگنال های تحریک بکار می روند.



شکل ۵.۴۲. فلوچارت برنامه ROTATE



شکل ۵.۴۳. PAUSE و COUNTER

(۳) برنامه *COUNTER*. جزئیات شمارش پله در شکل ۵.۴۳ نشان داده شده‌اند. عملکرد شمارنده
به ترتیب زیر است:

همانطور که رجیستر *C* برای تعداد پله‌های تمام شده بکار می‌رود، داده آن بعد از هر خروجی یکی
افزایش می‌یابد. رجیستر *E* برای ثبت تعداد پله‌هایی بکار می‌رود که هنوز اجرا نشده‌اند. پس، بعد از هر
خروجی یکی کاهش می‌یابد.

اگر داده موجود در *E* برابر صفر باشد، یک حرکت مطلوب بطور کامل انجام شده است. از اینرو،
برنامه به *PAUSE* خواهد رفت و قبل از اینکه محتوای رجیستر *IY* دوبار در *NEXT* افزایش یابد
توقفی خواهد کرد. بعد از اینکه برنامه به *LOOP1* برگشت، دسته جدیدی از داده‌های دستور حرکت و
داده‌های فاصله پالس با مراجعه به محتوای جدید *IY* و *IX* خوانده خواهد شد، تا منجر به انجام حرکت

جدید توسط موتور شود.

(۴) برنامه *PAUSE*. این برنامه‌ای است که یک بازه زمانی انتظار قبل از انجام حرکت جدید تولید می‌کند. جزئیات به این ترتیب می‌باشد:

رجیستر A با مقدار FF هگزادسیمال (یا به شکل 25 دسیمال، یا به شکل باینری 1111111) بار می‌شود.

تاکنون رجیستر B برای ذخیره اطلاعات حالت تحریک بکار می‌رفت. بمنظور استفاده از این رجیستر برای مقاصد دیگری در اینجا، محتوای جاری برداشته شده و در آدرس حافظه مشخص شده توسط نشانگر پشته^۱ ذخیره می‌شود. در ریزپردازنده Z80، PUSH BC، محتوای جفت رجیستر BC را برداشت می‌کند.

رجیستر B با FF بار می‌شود.

محتوای B مکرراً کاهش می‌یابد تا به صفر برسد.

هدف از چهار فرمان پیوسته NOP (تعداد حالت=۴) افزایش تعداد حالت‌های برنامه LOOP5 می‌باشد، که در آنصورت تعداد حالت‌های ۱۴=۱۰+۴ برابر با ۳۰=۳۰+۱۰+۴ خواهد بود. چون ۳۰ تقریباً دو برابر ۱۴ است، زمان سپری شده برای ۲۲۵ (=0FFH) تکرار LOOP5 دو برابر خواهد شد.

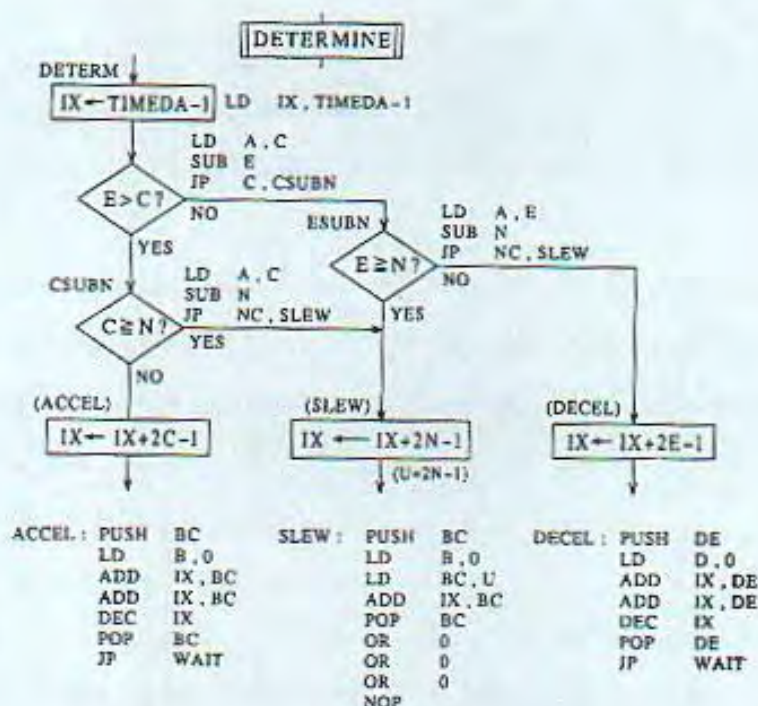
بعد از کاهش B به صفر، محتوای رجیستر A کاهش می‌یابد.

اگر A برابر با صفر نباشد، برنامه به LOOP6 برمی‌گردد، و FF را دوباره به B بار می‌کند و دوباره شروع به کاهش به صفر می‌کند. فرآیند کامل در مقایسه زمان زیادی طول می‌کشد.

بعد از استفاده از رجیستر B برای اجرای برنامه PAUSE، باید حافظه‌های قبلی، یعنی، حالت تحریک در رجیستر B و تعداد پله‌ها در C را دوباره ذخیره کنیم.

برنامه PAUSE با $1956133 (= 11 + 7 + 21 + 3 \times 225 + 10 + 225 \times 10)$ حالت انجام می‌گیرد. از اینرو، اگر زمان سپری شده در یک حالت ۲۵/۱۰۰ باشد، مجموع زمان سپری شده در برنامه در حدود ۴۹۸/۰ است. با بار کردن رجیستر B با عدد کمتری بجای ۲۲۵=0FFH، زمان کل PAUSE کوتاهتر خواهد شد.

(۵) تعیین آدرس حافظه برای داده فاصله پالس. اگر محتوای رجیستر E صفر نباشد، برنامه به مرحله بعد، برنامه DETERM، پیش می‌رود. در این برنامه، آدرس حافظه ذخیره‌کننده داده برای تولید بازه انتظار مناسب قبل از سیگنال سوئیچینگ بعدی از مقادیر رجیسترهای C و E محاسبه خواهد شد. جزئیات این برنامه در شکل ۵.۴۴ نشان داده شده است.

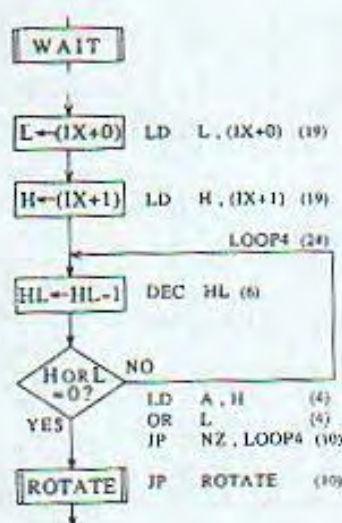


شکل ۵.۴۴. برنامه DETERMINE

رجیستر IX در ابتدا با مقدار TIMEDA-1 آغاز می‌شود، که TIMEDA اولین آدرس ناحیه حافظه شامل داده برای تولید فاصله پالس می‌باشد (شکل ۵.۳۹). آدرس حافظه را می‌توان با اضافه کردن عددی به مقدار اولیه (یعنی TIMEDA-1) مشخص کرد. این عدد از ۱ تا n انتخاب می‌شود، که n تعداد پله‌ها برای افزایش یا کاهش سرعت است. در اینجا، فرض می‌کنیم n برابر ۲۴ باشد، یعنی موتور برای افزایش یا کاهش سرعت ۲۴ پله طی خواهد کرد. عدد اضافه شونده که بین ۱ تا ۲۴ می‌باشد براساس اصول زیر محاسبه می‌شود:

- (i) ابتدا، مانند برنامه DETREM، باید ببینیم که آیا حرکت نیمه-کامل شده است. اگر $E > C$ ، حرکت در نیمه اول خود است، یا اگر $C \geq E$ ، در نیمه دوم خود است.
- (ii) در حالت نیمه اول حرکت (یعنی برنامه CSUBN)، باید ببینیم که آیا C بزرگتر یا مساوی ۲۴ است. در شکل ۵.۳۶ دیده می‌شود اگر $C > 24$ ، حرکت در حال افزایش سرعت است (یعنی برنامه ACCEL) و زیرنویس m در Δt_m برابر با C می‌باشد. از اینرو، عددی که به TIMEDA-1 اضافه می‌شود برابر با $2C$ می‌باشد.

- (iii) در حالت نیمه دوم حرکت (یعنی برنامه ESUBN)، باید بررسی کنیم که آیا E بزرگتر یا



شکل ۵.۴۵ برنامه WAIT.

مساوی ۲۴ است. دوباره از شکل ۵.۳۶، اگر $E < 24$ ، حرکت در حال کاهش سرعت می‌باشد (یعنی برنامه DECEL) و زیرنویس m (برای Δt_m) برابر E است. پس، عدد اضافه شونده به TIMEDA-1 برابر $2E$ می‌باشد.

(iv) در حالتی که در آن $C \geq 24$ در حرکت نیمه اول، یا $E \geq 24$ در نیمه دوم، حرکت چرخشی است (یعنی برنامه SLEW). در نتیجه، ما به TIMEDA-1 عدد $U = 2N - 1$ را اضافه می‌کنیم. در این برنامه، n را با N نشان می‌دهیم. در این برنامه می‌توانیم N را هر عددی بین ۱ تا ۱۲۸ قرار دهیم، و در اینجا $N = 24$ را انتخاب می‌کنیم. از اینرو $U = 2 \times 24 - 1 = 47$. توجه کنید که N هنگامیکه تصمیم می‌گیریم پالس‌های بیشتر (یا کمتری) در افزایش (یا کاهش) سرعت مورد استفاده قرار گیرد می‌تواند افزایش (یا کاهش) یابد.

(۶) برنامه WAIT. مرحله بعدی برنامه تولیدکننده فاصله پالس یا فاصله بین سیگنال سوییچینگ قبلی و بعدی می‌باشد. همانطور که در شکل ۵.۳۹ نشان داده شده است، ناحیه حافظه از TIMEDA تا $TIMEDA + 47$ برای ذخیره داده فاصله پالس مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از فلوچارت شکل ۵.۴۵، جزئیات این برنامه بدین ترتیب تشریح می‌شود:

داده ذخیره شده در آدرس حافظه $IX+0$ ، به رجیستر L منتقل می‌شود.

داده موجود در آدرس حافظه بعدی، یعنی $IX+1$ ، به رجیستر H منتقل می‌شود.

دو رجیستر با هم بصورت جفت رجیستر HL (رجیستر H بعنوان بایت بالارزش‌تر و رجیستر L

بعنوان بایت کم ارزش‌تر) مکرراً تا وقتی هر دو رجیستر H و L صفر شوند کاهش می‌یابد. وقتی هر دو H و L صفر می‌شوند، این برنامه تمام می‌شود و به برنامه ROTATE باز می‌گردد تا با فرستادن سیگنال سوئیچینگ بعدی موتور زاویه پله دیگری بچرخد.

۵.۵.۳ محاسبه اعداد برای تولید فواصل پالس

در این بخش خواهیم آموخت که چگونه داده‌های ذخیره‌شده در ناحیه حافظه که از TIMEDA شروع می‌شود را محاسبه و آماده کنیم. عدد داخل پراتر در کنار هر فرمان Z80، بطور مثال، در شکل ۵.۴۵ مخصوص همان فرمان است. این عددی است که ما آنرا 'عدد حالت‌ها' می‌نامیم و مدت زمان صرف شده توسط ریزپردازنده برای اجرای فرمان را نشان می‌دهد. یک عدد حالت برابر است با یک بازه ساعت که در این مورد $25\mu s$ می‌باشد. در یک مطالعه موردی، فرمان LD B,0 (یعنی رجیستر B را با صفر بارکن) را در نظر خواهیم گرفت. عدد حالت آن ۷ است. به این معنی که $7 \times 25\mu s = 175\mu s$ طول می‌کشد تا ریزپردازنده این فرمان را انجام دهد.

تمام اعداد حالت را برای برنامه WAIT جمع می‌کنیم. اگر Q_m داده انتقال یافته از دو بایت متوالی در ناحیه حافظه که با TIMEDA شروع می‌شود به جفت رجیستر HL باشد، عدد کل حالت‌ها برابر $24Q_m + 48$ است.

عدد حالت‌ها در برنامه ROTATE برابر ۷۲ و در برنامه DETERM برابر ۱۳۱ می‌باشد. توجه کنید که در برنامه SLEW، ما سه مرتبه 'OR 0' و یک NOP داریم. این امر بخاطر افزایش عدد کل حالت‌ها برای برنامه SLEW است تا با عدد حالت‌ها برای تمام سه مسیر ممکن، یعنی، برنامه‌های SLEW، ACCEL و DECEL برابر باشد. نتیجتاً، عدد کل حالت‌های S_m لازم برای یک فاصله پالس بین دو پله متوالی (یعنی زمان صرف شده برای برنامه از ROTATE، با گذر از DETERM و پایان آن در WAIT) برابر $72 + 24Q_m + 48 + 131$ می‌باشد، که عبارت است از

$$S_m = 24Q_m + 251 \quad (5.4)$$

همانطور که یک حالت $t_c = 25\mu s$ طول می‌کشد، فاصله پالس اینطور بدست می‌آید

$$\Delta t_m = (24Q_m + 251) \times 25 \times 10^{-6} \text{ (s)} \quad (5.5)$$

با مقایسه رابطه (۵.۳) با رابطه (۵.۵)، می‌بینیم که $a = 24$ و $b = 251$

جدول ۵.۳ یک برنامه کامل به زبان اسمبلی Z80، نوشته شده بر اساس مفاهیم بالا می‌باشد. یک

جدول ۵.۳. برنامه کلی به زبان اسمبلی Z80 برای درایو افزایش/کاهش سرعت

عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
DRIVE	ORG	8000H	از آدرس 8000H شروع می‌کند
	EQU	0FEH	پورت خروجی 0FDH برای درایو موتور
RESET:			مورد استفاده قرار می‌گیرد
	LD	A,33H	رجیستر A با 00110011 بار می‌شود
	OUT	(DRIVE),A	داده موجود در رجیستر A بیرون فرستاده می‌شود
ACCOM: LOOP0:	LD	B,A	داده موجود در A به B بار می‌شود
	LD	HL,58333	
	DEC	HL	
	LD	A,H	زمانی در حلقه ۰/۲۵٪ صرف می‌شود تا
	OR	L	موتور را در موقعیت اولیه جای دهد.
	JP	NZ,LOOP0	
	LD	IY,STEPDA	رجیستر شاخصه‌ای IY با آدرس STEPDA بار می‌شود
LOOP1:	LD	D,(IY + 0)	داده موجود در آدرس STEPDA+0 به D بار می‌شود
	LD	A,D	داده موجود در D به A بار می‌شود
	CP	2	A-2
	JP	Z,STOP	اگر A=2 به STOP پرش می‌کند
	LD	E,(IY + 1)	داده موجود در STEPDA+1 به E بار می‌شود
ROTATE:	LD	C,0	رجیستر C پاک می‌شود
	CP	0	A=0
	JP	Z,LEFT	اگر A=0 به LEFT پرش می‌کند
RIGHT:	LD	A,B	داده موجود در B به A بار می‌شود
	RRC	A	A به راست گردش می‌کند
LEFT:	JP	STEP	به آدرس STEP پرش می‌کند
	LD	A,B	A یا داده موجود در B بار می‌شود
	RLC	A	A به چپ گردش می‌کند
STEP:	JP	STEP	به آدرس STEP پرش می‌کند
	OUT	(DRIVE),A	محتوای A بیرون فرستاده می‌شود
COUNT:	LD	B,A	B با محتوای موجود در A بار می‌شود
	INC	C	داده موجود در C یک واحد افزایش می‌یابد
	DEC	E	داده موجود در E یک واحد کاهش می‌یابد
DETERM:	JP	Z,PAUSE	اگر E=0 به آدرس PAUSE پرش می‌کند
	LD	IX,TIMEDA - 1	رجیستر شاخصه‌ای IX با 1 - TIMEDA بار می‌شود
ESUBN:	LD	A,C	
	SUB	E	C-E
	JP	C,CSUBN	اگر C>E به CSUBN پرش می‌کند
	LD	A,E	
	SUB	N	E-N
	JP	NC,SLEW	اگر E>N به SLEW پرش می‌کند

جدول ۵.۳ (ادامه)

عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
DECEL:	PUSH	DE	$IX \leftarrow IX + 2E - 1$
	LD	D,0	
	ADD	IX,DE	
	ADD	IX,DE	
	DEC	IX	
	POP	DE	
CSUBN:	JP	WAIT	به WAIT پرش می‌کند
	LD	A,C	$C > N$ اگر $C > N$ ، به SLEW پرش می‌کند
	SUB	N	
	JP	NC,SLEW	
ACCEL:	PUSH	BC	$IX \leftarrow JX + 2C - 1$
	LD	B,0	
	ADD	IX,BC	
	ADD	IX,BC	
	DEC	IX	
	POP	BC	
SLEW:	JP	WAIT	$IX \leftarrow IX + 2N - 1$
	PUSH	BC	
	LD	B,0	
	LD	BC,U	
	ADD	IX,BC	
	POP	BC	
	OR	0	
	OR	0	
	OR	0	
WAIT:	NOP		برای تنظیم تعداد حالت‌ها هیچ عملی صورت نمی‌گیرد
	LD	L,(IX + 0)	داده موجود در TIMEDA-1 به L بار می‌شود
	LD	H,(IX + 1)	داده موجود در $TIMEDA \cdot 1 + 1 = TIMEDA$ به H بار می‌شود
	DEC	HL	داده موجود در رجیستر HL به اندازه یک واحد کاهش می‌یابد
LOOP4:	LD	A,H	A با داده موجود در H بار می‌شود
	OR	L	هر بیت از H با بیت متناظر در L، OR می‌شود
	JP	NZ,LOOP4	اگر بینی از H و L صفر نباشد، به LOOP4 پرش کن
PAUSE:	JP	ROTATE	به ROTATE پرش می‌کند
	LD	A,0FFH	A با 11111111 بار می‌شود

جدول ۵.۳ (ادامه)

عنوان	Op-code	Operand	توضیحات
	PUSH	BC	BC برای کاربرد دیگر حفظ می‌شود
LOOP6:	LD	B,0FFH	B بار 11111111 می‌شود
LOOP5:	DEC	B	داده موجود در B یک واحد کاهش می‌یابد
	NOP		برای تنظیم تعداد حالت‌ها می‌باید
			صورت نمی‌گیرد
	NOP		
	NOP		
	NOP		
	JP	NZ,LOOP5	اگر $B \neq 0$ به LOOP5 پرش می‌کند
	DEC	A	داده موجود در A یک واحد کاهش می‌یابد
	JP	NZ,LOOP6	اگر $A \neq 0$ به LOOP6 پرش می‌کند
	POP	BC	پایان زیربرنامه PAUSE
NEXT:	INC	IY	} $IY \leftarrow IY + 2$
	INC	IY	
	JP	LOOP1	به LOOP1 پرش می‌کند
STOP:	HALT		
N	EQU	24	N روی 24 تنظیم شده است
U	EQU	47	$U = 2N - 1 = 47$ وقتی که $N = 24$
	ORG	9000H	داده‌های حرکت از آدرس 9000H به بعد قرار دارند
STEPDA:	DB	0, 96	(۹۶ پله CW) اولین حرکت
	DB	1, 84	(۸۴ پله CCW) دومین حرکت
	DB	0, 36	(۳۶ پله CW) سومین حرکت
	DB	1, 96	(۹۶ پله CCW) چهارمین حرکت
	DB	2	پایان داده‌ها
	ORG	9100H	داده‌های بازه زمانی از آدرس 9100H به بعد قرار دارند
TIMEDA:	DW	1656, 1420, 1263, 1148	
	DW	1060, 989, 931, 881	
	DW	839, 803, 770, 741	
	DW	716, 692, 671, 652	
	DW	634, 617, 602, 588	
	DW	575, 562, 551, 545	
	END		

تئوری در مورد تعیین فواصل پالس Δt_m از نرخ راه‌اندازی، نرخ چرخش و تعداد پله‌ها برای افزایش سرعت در بخش ۶.۴ ارائه خواهد شد. یک برنامه نمونه برای محاسبه داده‌های فاصله پالس Q_m در جدول ۶.۲ داده شده است و داده‌های نمونه بکار رفته در نرم‌افزار جدول ۵.۳ در جدول ۶.۳ فصل بعد هم موجود می‌باشند.

مرجع [6] دارای نمونه دیگری است، که از دو بایت برای تعداد پله‌ها برای هر حرکت استفاده می‌کند.

مراجع فصل ۵

- [1] Maginot, J. and Oliver, W. (1974). Step motor drive circuitry and open loop control. *Proc. Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. B1-39.
- [2] Kenjo, T. and Niimura, Y. (1979). *Fundamentals and Applications of Stepping Motors*. (In Japanese.) p. 157. Sogo Electronics Publishing Co., Tokyo.
- [3] Pawletko, J. P. and Chai, H. D. (1976). Three-phase variable-reluctance step motor with bifilar winding. *Proc. Fifth Annual Symposium on Incremental Motor Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. F1-8.
- [4] Niimura, Y. (1974). Outer-rotor-type stepping motor. *Proc. Third Annual Symposium on Incremental Motor Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. H1-10.
- [5] Kenjo, T. (1990). *Power electronics for the microprocessor age*, Chapter 2. Oxford University Press.
- [6] Ibid, Chapter 6.

مشخصه‌های گشتاور و فواصل پالس اندازه‌گیری و بکارگیری در طراحی سیستم

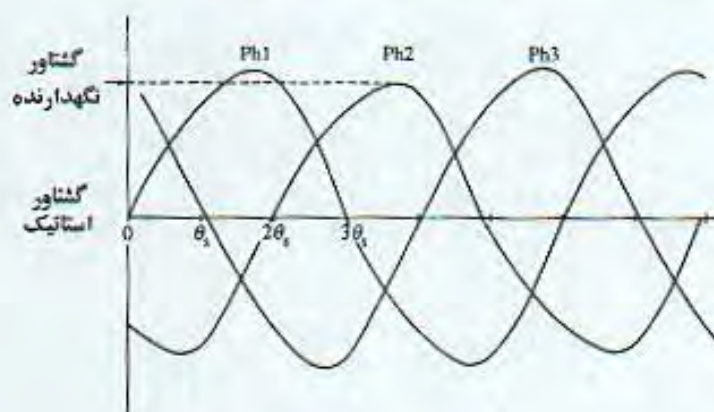
در این فصل، ابتدا روشهای اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌های گشتاور یک موتور پله‌ای ارائه خواهند شد، و سپس بحثی در مورد ارتباط بین منحنی‌های گشتاور، معادله دینامیک، و افزایش سرعت مطرح می‌شود. در پایان، تئوری‌های چندی در مورد تعیین فواصل پالس بمنظور افزایش کاهش سرعت مورد استفاده در طراحی سیستم ارائه شده‌اند.

۶.۱ اندازه‌گیری مشخصه‌های استاتیک

۶.۱.۱ مشخصه‌های T/θ و گشتاور نگهدارنده

موتور آزمایشی با اعمال جریان نامی در روش تحریک مشخصی، بطور مثال تحریک یکفار یا دوفاز، ساکن نگه داشته می‌شود. یکی از سه یا چهار فاز بطور اختیاری انتخاب می‌شود تا در طرح یکفار در تحریک به آن جریان اعمال شود. موقعیت روتور در بی‌باری 'تعادل' یا 'موقعیت سکون' تعریف می‌شود. حال می‌خواهیم رابطه بین گشتاور اعمال شده به محور و جابجایی از موقعیت تعادل را اندازه‌گیری کنیم. همانطور که در شکل ۶.۱ نشان داده شده است گشتاورهای خارجی توسط یک فرقه، یک ریسمان، و یک وزنه بوجود می‌آیند. هنگامیکه وزن صفر است، روتور در موقعیت تعادل در حال سکون است، و همچنانکه وزن تدریجاً به ترتیب W_1 ، W_2 ، W_3 ، ... افزایش می‌یابد روتور در جهت ساعتگرد به موقعیتهای θ_1 ، θ_2 ، θ_3 ... حرکت می‌کند. شکل ۶.۲ نموداری است که گشتاور $T_n = rW_n$ به جابجایی θ_n می‌رسد. مشخصه‌های T/θ برای جابجایی‌های بزرگتر از θ_M که توسط یک منحنی شکسته در شکل ۶.۲ نشان داده شده است، را نمی‌توان با ابزار ابتدایی نشان داده شده در شکل ۶.۱ اندازه‌گیری کرد، چون موقعیت روتور بعلت وزن و شیب منفی منحنی مشخصه ناپایدار است؛ هرچه روتور بیشتر توسط وزنه درایو شود، گشتاور تأخیر روتور کمتر می‌شود و این منجر به حرکت روتور بطرف موقعیت تعادل بعدی می‌شود.





شکل ۶.۴. منحنی‌های T/θ برای سه فاز.

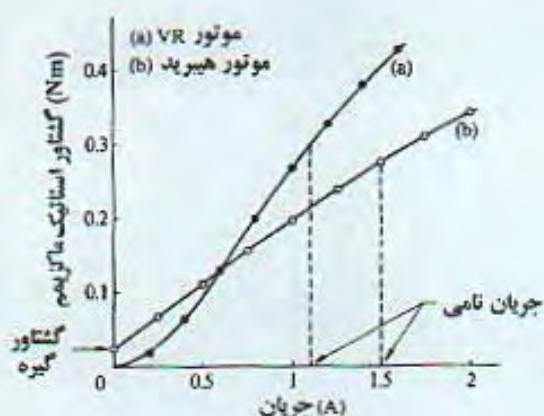
شکل ۶.۳ ترتیبی برای اندازه‌گیری این نوع از ناحیه مرده^۱ می‌باشد. روتور موتور آزمایش را می‌توان با قرار دادن استاتور آن روی یک دیواره و درایو روتور با موتور دیگری، بنام موتور درایو، از طریق یک تزویج^۲ و یک ترانس‌دیوسر^۳ در هر موقعیت دلخواهی قرار داد. موتور درایو ترکیبی از یک موتور پله‌ای و یک رشته دنده می‌باشد، که حرکت درایو موتور را چنان کند می‌کنند که روتور موتور آزمایش را بتوان با فواصل دقیق بین موقعیت‌های تعادل حتی در ناحیه مرده قرار داد. هنگامیکه هر دو موتور ساکن هستند، گشتاور تولید شده توسط موتور توسط گشتاور خروجی موتور درایو، که در جهت عکس عمل می‌کند، متعادل می‌شود. این گشتاور توسط ترانس‌دیوسر گشتاور بهبود می‌یابد.

پس موقعیت روتور را می‌توان توسط یک پتانسیومتر یا یک انکدر در این مجموعه آشکار کرد. اگر سیگنال‌های موقعیت و اطلاعات گشتاور به یک ثبت کننده XY داده شوند، نمودار گشتاور بر موقعیت را مطابق شکل ۶.۴ بدست می‌آوریم. این شکل تفاوت‌های بین فازهای تحریک شده مختلف را نشان می‌دهد؛ بطور ایده‌آل، منحنی مشخصه T/θ برای هر فاز (در تحریک تکفاز) یا هر ترکیبی از فازها (در تحریک دوفاز) باید متقارن باشد. هنگامیکه منحنی همانند این شکل متفاوت باشد، گشتاور نگهدارنده باید بعنوان حداقل مقدار گشتاور استاتیک ماکزیمم تعریف شود.

تنش سنج^۴ غالباً^۵ برای اندازه‌گیری گشتاور بکار می‌روند، بطور مثال همانطور که در اساس و ترکیب شکل ۶.۱۸ نشان داده شده است. این مفهوم را می‌توان همچنین در ترانس‌دیوسر گشتاور در شکل ۶.۳ بکار گرفت. این تعریف گشتاور نگهدارنده بصورت کار آمدی با تعریف داده شده در

1- dead zone
3- transducer

2- coupling
4- strain - gauges


 شکل ۶.۵ منحنی مشخصه T/I

بخش ۲.۶.۱ مطابقت دارد: گشتاور استاتیکی ماکزیمم که می‌توان به محور یک موتور تحریک شده بدون ایجاد حرکت پیوسته اعمال کرد. در شکل ۶.۴ موقعیت روتور نسبت به یک موقعیت تعادل در $Ph1$ در نظر گرفته شده است، و مشاهده می‌شود که موقعیت‌های تعادل برای دیگر فازها در موقعیت‌های نامی $2\theta_s$ ، $4\theta_s$ ، و غیره نیستند. تعاریف دقت تعیین موقعیت در بخش ۲.۲.۳ آورده شد.

یک انگشت نوری یا یک پتانسیومتر دقیق بدون اتصال را نیز می‌توان بعنوان روش دیگری برای اندازه‌گیری جابجایی مورد استفاده قرار داد.

۶.۱.۲ مشخصه‌های T/I

بطور کلی، گشتاور استاتیکی ماکزیمم با جریان افزایش می‌یابد. نمودارهای گشتاور استاتیکی ماکزیمم بر جریان در روش تحریک مشخصی مشخصه‌های T/I نامیده می‌شوند، و در شکل ۶.۵ نشان داده شده‌اند. این شکل یک موتور VR و یک موتور هیبرید، هر دو با زاویه پله $1/8^\circ$ را مقایسه می‌کند. گشتاور در یک موتور VR هنگامیکه تحریک نشده است صفر می‌باشد، و در محدوده‌های کم جریان بطور سهموی با جریان افزایش می‌یابد. نرخ افزایش در محدوده‌های بالای جریان باعث اشباع مغناطیسی در هسته‌ها اندک است. در یک موتور PM ، در صورت عدم تحریک هم یک گشتاور استاتیکی ظاهر می‌شود، و این گشتاور خاص به نام 'گشتاور گیره'^۱ خوانده می‌شود. نحوه افزایش گشتاور استاتیکی با جریان در یک موتور هیبرید و یک موتور PM به رابطه‌ای خطی نزدیک است.



شکل ۶.۶. تزویدج‌ها^۱

۶.۲ اندازه‌گیری مشخصه‌های دینامیک

مشخصه‌های دینامیک یک موتور پله‌ای شامل مشخصه‌های توقف و مشخصه‌های چته می‌شود.

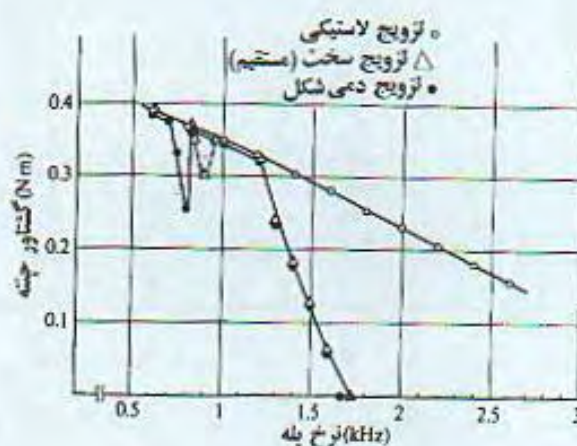
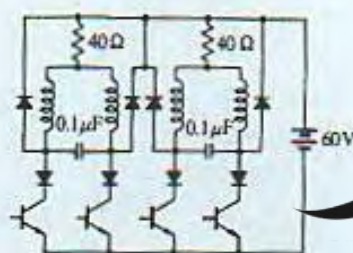
۶.۲.۱ اهمیت تزویدج‌ها در مشخصه‌های دینامیک

اندازه‌گیری مشخصه‌های دینامیک بشدت از شرایط الکترونیکی و مکانیکی دستگاه اثر می‌پذیرد، زیرا همانطور که در فصل ۴ بحث شد، رفتار دینامیک یک موتور پله‌ای با اینرسی بار و مکانیزم میراکنندگی، دخیل در هر دو ترکیب مکانیکی و الکترونیکی سیستم درایو، تغییر می‌کند. هنگامیکه دو شریک، بطور مثال یک سازنده و یک کاربر، جزئیات مشخصه‌های دینامیک یک موتور پله‌ای را بررسی می‌کنند، اول از همه لازم است روش اندازه‌گیری و مدار درایو مشخص شود.

یکی از مهمترین فاکتورهای مکانیکی در دستگاه اندازه‌گیری تزویدج بین محور موتور و گشتاور سنج^۲ می‌باشد. شکل ۶.۶ سه تزویدج نمونه را نشان می‌دهد: تزویدج لاستیکی^۳، تزویدج دمی شکل^۴، و تزویدج مستقیم^۵. شکل ۶.۷ تغییر ظاهر شده در منحنی‌های گشتاور چته با تزویدج‌های مختلف بکار رفته را نشان می‌دهد. موتور آزمایش یک موتور هیبرید چهارفاز بوده و با طرح دوفاز در تحریک با استفاده از درایو نشان داده شده در همان شکل درایو می‌شد. گشتاورسنج بکار رفته یک دینامومتر هیستریزیس^۶ (نشان داده شده در شکل ۶.۱۹) می‌باشد. مشخصه‌های چته بسیار خوب با استفاده از یک تزویدج لاستیکی در محدوده وسیعی از نرخ‌های پله بدست آمده‌اند، زیرا نوسانات روتور در لاستیک منعطف بکار رفته در تزویدج جذب می‌شوند. از طرف دیگر، هنگامیکه یک تزویدج سخت یا دمی شکل بکار می‌رود، گشتاور چته ناگهان در محدوده بعد از ۱۲۰۰ Hz کاهش می‌یابد، در حدود ۱۷۰۰ Hz صفر می‌شود. این مشخصه‌های ضعیف احتمالاً ناشی از مکانیزم تزویدج است که قادر به جذب نوسانات روتور نیست.

- 1- couplings
- 3- rubber
- 5- direct

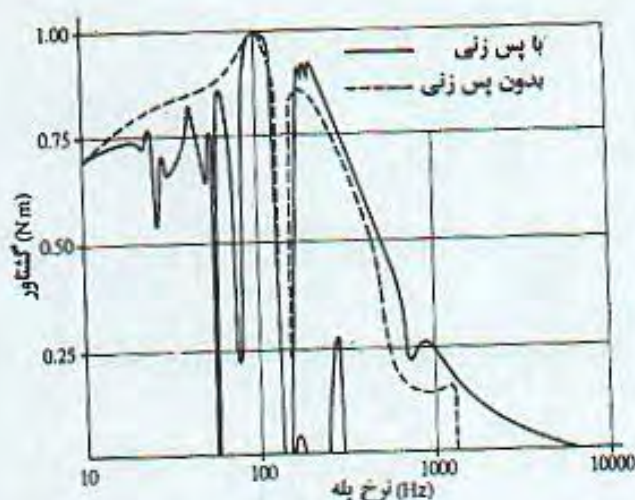
- 2- torque meter
- 4- bellows
- 6- hysteresis dynamometer



شکل ۶.۷. تغییرات منحنی‌های گشتاور چنته با اختلاف تزویدج‌ها.

پس‌زنی^۱ در تزویدج مکانیزم دیگری است که نوسانات را جذب می‌کند و فاکتور مهمی است که منحنی چنته را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثرات پس‌زنی روی پاسخ پله واحد و مشخصه‌های چنته را Ward و Lawrenson گزارش کردند. ^{///} نشان داده شده است که در پاسخ پله واحد با استفاده از پس‌زنی در کاهش جهش و در افزایش نرخ میرایی نوسان، پاسخی بهبود یافته حاصل می‌شود. در مقایسه تزویدج‌های سخت و تزویدج‌های با خاصیت پس‌زنی در مشخصه‌های چنته، شکل ۶.۸ را نشان دادند. که با استفاده از یک موتور VR بدست آمد. با یک تزویدج سخت در حدود نرخ پله ۱۴۰ Hz یک فرورفتگی مشاهده می‌شود که ناشی از نوسانات در فرکانس طبیعی می‌باشد، و پاسخ سرعت بالا در بالاتر از ۱۳۰۰ Hz خراب می‌شود. با پس‌زنی فرورفتگی‌های بیشتری در نرخ‌های پله پایین مشاهده می‌شود، و در حدود ۱۶۰ تا ۲۲۰ Hz، موتور آزمایش تا هنگامیکه گشتاور بار مشخصی اعمال نشود قادر به حرکت بصورت پایدار نیست. باید توجه کرد که نرخ پله چنته ماکزیمم بخاطر پس‌زنی بین موتور و بار افزایش می‌یابد.

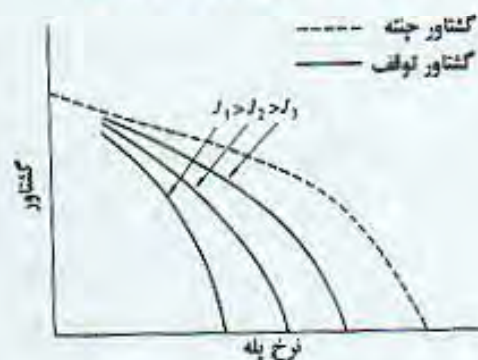
1- backlash



شکل ۶.۸. منحنی‌های گشتاور چنته بر سرعت در مقایسه دو حالت: با پس زنی و بدون پس زنی. (مطابق مرجع [۱]).



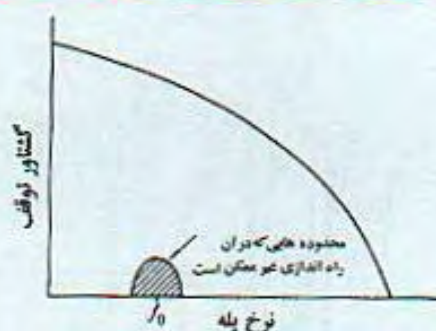
شکل ۶.۹. قطار پالس با فرکانس ثابت.



شکل ۶.۱۰. تغییر محدوده‌های توقف با اینرسی بار.

۶.۲.۲ مشخصه‌های گشتاور توقف

مشخصه‌های گشتاور توقف یا مشخصه‌های راه‌اندازی قسمت‌هایی از محدوده گشتاور بار اصطلاحاً هستند که در آنها موتور می‌تواند بدون از دست دادن همزمانی به ازای فرکانس‌های مختلف راه‌اندازی و متوقف شود. قطار پله بکار رفته در اندازه‌گیری مطابق شکل ۶.۹ می‌باشد و تعداد پالس‌های موجود معمولاً ۱۰۰ یا ۲۰۰ است. به هنگام اندازه‌گیری محدوده توقف، بسیار مهم است تا اینرسی تزویج شده به محور موتور همانند نوع تزویج و مدار درایور مشخص شود. محدوده توقف با اینرسی بار همانطور که در شکل ۶.۱۰ نشان داده شده است کاهش می‌یابد. در



شکل ۶.۱۱. محدوده‌ای که در آن یک موتور قادر به راه‌اندازی نیست.

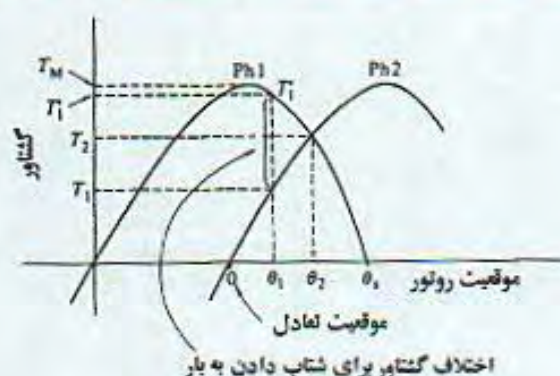


شکل ۶.۱۲. گشتاور ترمزکننده ثابت بعلمت نیروی جاذبه.

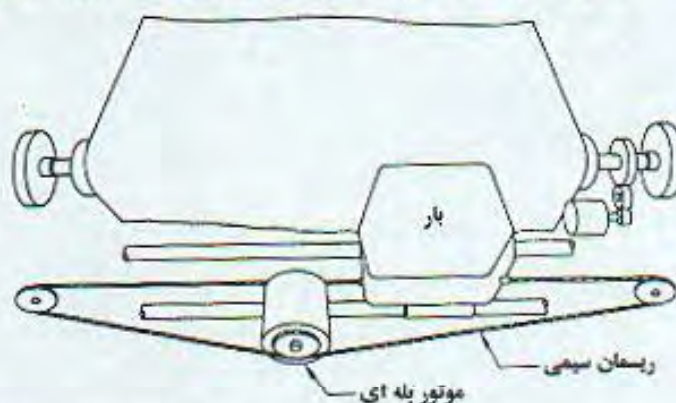
مشخصه‌های توقف، نه تنها گشتاورهای بار ماکزیمم بلکه گشتاورهای بار مینیمم نیز باید مشخص شوند. بطور مثال، در شکل ۶.۱۱، در نرخ پالس حدوداً f_0 ، موتور بعلمت نوسان قادر به راه‌اندازی نیست تا وقتی که گشتاور اصطکاکی مشخصی اعمال شود.

باید توجه کرد که منحنی‌های گشتاور توقف با چگونگی اعمال گشتاور ترمزکننده^۱ تغییر می‌کنند. در مورد شکل ۶.۱۲، نیروی جاذبه‌ای اعمال شده به شیء بار همواره گشتاوری خارجی به محور موتور می‌دهد. فرض می‌کنیم که در ابتدا تحریک شده است و یک گشتاور خارجی T_f به محور اعمال و باعث یک جابجایی θ_f از موقعیت تعادل (شکل ۶.۱۳) شده است. هر وقت اولین پالس به درایور اعمال شود، Ph1 خاموش و بجای آن Ph2 روشن می‌شود، و گشتاور موتور برابر T_f می‌شود که بزرگتر از T_f می‌باشد. اختلاف $T_f - T_f'$ برای افزایش سرعت موتور بکار می‌رود. اگر این اختلاف گشتاور به اندازه کافی بزرگ باشد تا بار را افزایش سرعت دهد و با پالس‌های بعدی همزمان شود، T_f در محدوده توقف می‌باشد. با افزایش T_f جابجایی θ_f بزرگتر می‌شود، و اختلاف

1- braking torque



شکل ۶.۱۳. گشتاور موتور که باعث راه‌اندازی موتور/بار در حالت بار جاذبه‌ای می‌شود.

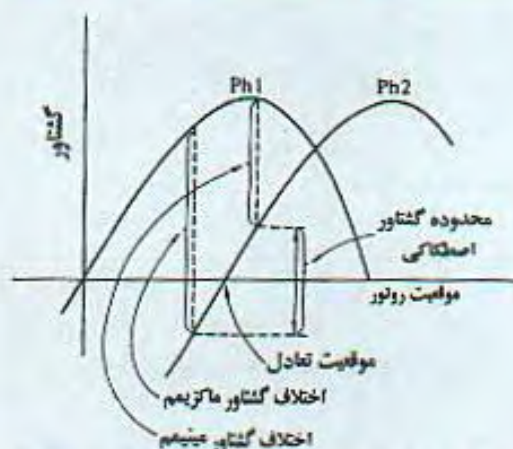


شکل ۶.۱۴. سیستمی که در آن گشتاور بار در راه‌اندازی یک گشتاور اصطکاکی استاتیکی است.

گشتاور کوچکتر می‌شود. در $\theta = \theta_2$ دو منحنی همدیگر را قطع می‌کنند. گشتاور تولید شده در این نقطه گشتاور توقف ماکزیمم است، زیرا اختلاف گشتاور صفر است و موتور تنها در یک نرخ پالس خیلی پایین می‌تواند راه‌اندازی شود. از شکل ۶.۱۳ نتیجه می‌شود که اختلاف قابل توجهی در گشتاور توقف ماکزیمم و گشتاور استاتیکی ماکزیمم یا گشتاور نگهدارنده وجود دارد. در مدل منحنی سینوسی نمودارهای گشتاور استاتیکی بر موقعیت روتور، نسبت گشتاور نگهدارنده به گشتاور توقف ماکزیمم $\sqrt{2}$ است.

در مورد بار نشان داده شده در شکل ۶.۱۴ گشتاور بار ظاهر شده در راه‌اندازی، گشتاور اصطکاکی استاتیکی می‌باشد. به این معنی که موقعیت اینرسی^۱ روتور می‌تواند در هر موقعیتی در محدوده‌ای به مرکزیت موقعیت تعادل، که در آن قدر مطلق گشتاور استاتیکی موتور کمتر از گشتاور اصطکاکی استاتیکی بار است (شکل ۶.۱۵)، باشد. در این شکل، هرچه موقعیت اینرسی از سمت چپ دورتر از

1- inertial position



شکل ۶.۱۵. گشتاور موتور برای راه‌اندازی موتور / بار در حالت بار اصطکاکی استاتیک.

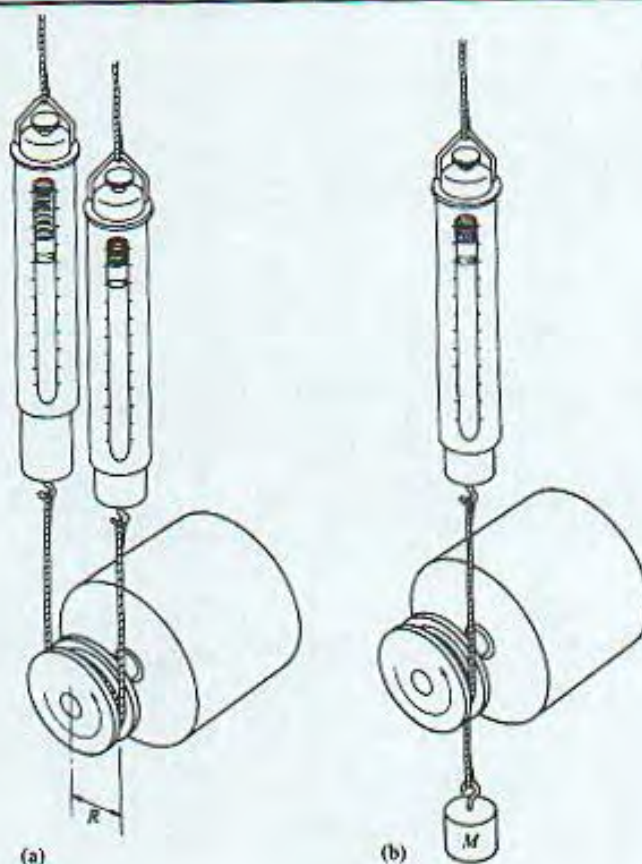


شکل ۶.۱۶. منحنی‌های گشتاور توقف و چنته.

موقعیت تعادل باشد، اختلاف گشتاوری که در سوئیچینگ تحریک مشاهده می‌شود بیشتر، و قابلیت توقف بالاتر است. از طرف دیگر، هرچه از سمت راست موقعیت اینرسی دورتر از موقعیت تعادل باشد، اختلاف گشتاور کمتر است. در دادن مشخصات استاندارد به گشتاور توقف، اندازه‌گیری‌ها بایستی در بدترین شرایط انجام شود که اختلاف‌های گشتاور کوچکتری تولید می‌کنند.

۶.۲.۳ منحنی‌های گشتاور چنته

موتور آزمایش در محدوده توقف راه‌اندازی می‌شود و با یک بار سبک تا نرخ پله‌ای افزایش سرعت پیدا می‌کند که در آن گشتاور چنته اندازه‌گیری می‌شود. هنگامیکه گشتاور بار در این سرعت تدریجاً افزایش می‌یابد، موتور نهایتاً همزمانی را از دست خواهد داد. این گشتاور بار گشتاور چنته در نرخ پله می‌باشد. اگر گشتاورهای چنته بر حسب نرخ پله رسم شوند، گرافی مانند شکل ۶.۷ با ۶.۸ بدست خواهد آمد. بطور کلی، گشتاورهای چنته در نرخ‌های پله بسیار پایین به گشتاورهای توقف، همانطور که در شکل ۶.۱۶ نشان داده شده، نزدیک می‌باشند.



شکل ۶.۱۷. اندازه‌گیری گشتاورهای موتور با استفاده از ترازوهای فنری. (a) روش دو ترازویی و (b) روش تک ترازویی.

روش‌های مختلفی برای اعمال گشتاورهای بار در اندازه‌گیری گشتاورهای چسته وجود دارند. اساسی‌ترین روش ترمز پرنی^۱ (یا ریسمان و قرقره) است و گشتاورهای بار با یک یا دو ترازوی فنری نشان داده شده در شکل (b) و (a) ۶.۱۷ اندازه‌گیری می‌شوند. گشتاورهای بار T_L برتریب از روابط زیر تعیین می‌شوند.

(a) روش دو ترازویی

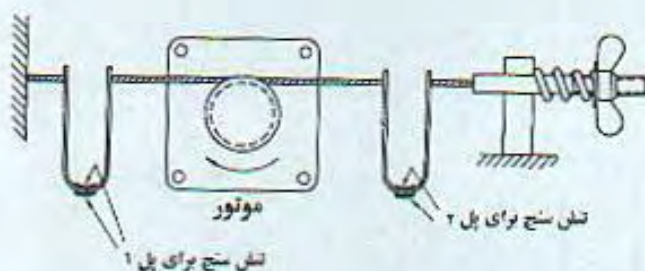
$$T_L = R(q_1 - q_2)(N_m) \quad (6.1)$$

که R = شعاع قرقره (m)

q_1 = عدد خوانده شده روی ترازوی ۱ (N)

q_2 = عدد خوانده شده روی ترازوی ۲ (N)

می‌باشند.



شکل ۶.۱۸ اندازه‌گیری گشتاورهای موتور با استفاده از محک‌های کششی.

(b) روش نک ترازویی

$$T_L = R(9.8M - q)(N_m) \quad (6.2)$$

M = جرم وزنه (kg)

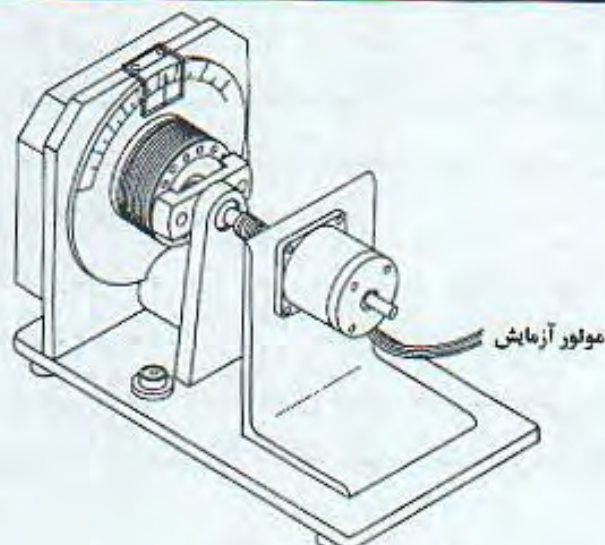
q = عدد خوانده شده روی ترازوی (N)

می‌باشند.

تشن‌سنج‌ها غالباً برای اندازه‌گیری گشتاور بکار می‌روند، بطور مثال همانطور که در مفهوم و ترکیب شکل ۶.۱۸ نشان داده شده است.^[2] این روش را در ترانس‌دیوسر گشتاور شکل ۶.۳ نیز می‌توان بکار برد.

پیچ دستی^۱ کشش ریسمانی که گشتاور اصطکاک را کنترل می‌کند را تنظیم می‌کند، و تشن‌سنجها در یک مدار پل برای خواندن اختلاف در کشش $T_1 - T_2$ متصل شده‌اند. این دستگاه برای اندازه‌گیری گشتاورهای توقف هم‌بکار می‌رود. این حالت بار اولیه مشابه به حالت شکل ۶.۱۴ می‌باشد.

دینامومتر هیستریزس (شکل ۶.۱۹) که ابزاری طراحی شده برای اندازه‌گیری گشتاور دینامیک می‌باشد، برای اندازه‌گیری گشتاورهای چپته در یک موتور پله‌ای بکار می‌رود. اما این گشتاور سنج همواره برای یک موتور پله‌ای دارای زاویه پله کوچک بعلت دندانه‌دار بودن مکانیزم تولید گشتاور با بهره‌گیری از پدیده هیستریزس مناسب نیست.^[2]



شکل ۶.۱۹. یک دینامومتر هیستریزس.

۶.۳ معادله دینامیک و افزایش سرعت

۶.۳.۱ معادله دینامیک

هنگامیکه یک موتور پله‌ای در حال سنکرون شدن با قطار پالسی می‌باشد، گشتاور تولید شده توسط موتور برابر و مخالف گشتاور باری است که مجموع گشتاور افزایشده سرعت روتور/اینرسی بار و گشتاور اصطکاکی می‌باشد. این عبارت بصورت معادله دینامیک اساسی بیان می‌شود:

$$\tau_M = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f \quad (۶.۳)$$

که τ_M = گشتاور تولید شده توسط روتور

J = اینرسی ترکیب روتور و بار

ω = سرعت زاویه‌ای روتور

D = ثابت اصطکاکی چسبندگی

T_f = گشتاور بار اصطکاکی مستقل از سرعت

می‌باشند.

گشتاور موتور τ_M تابعی از سرعت، نیروی محرکه مغناطیسی، زاویه گشتاور و دیگر پارامترهای ماشین می‌باشد، همانطور که در مبحث گشتاور پایدار در بخش ۴.۴.۱ بررسی شد. بهر حال در اینجا بعنوان گشتاوری بررسی می‌شود که توسط موتور مشخصی تولید و با مدار درایور مشخص در روش تحریک مشخص درایو می‌شود. در بکارگیری رابطه (۶.۳) فرض می‌کنیم که: (i) میراکننده مکانیکی بکار نرفته است؛ (ii) گشتاور موتور هیچ مولفه نوسانی در محدوده‌های سرعت مورد نظر ندارد.

جمله اول سمت راست گشتاور لازم برای افزایش سرعت اینرسی ترکیب روتور و بار است. هنگامیکه گشتاور روتور بوسیله دنده‌ها، تسمه‌ها، یا مشابه آنها، به بار منتقل می‌شود، اینرسی J اینرسی خودبار نیست، اما باید کمیت منعکس^۱ در محور باشد. چند فرمول برای اینرسی انعکاسی در ضمیمه ۶.۵.۱ این فصل نشان داده شده‌اند.

ما اساساً واحدهای SI را برای محاسبه بکار می‌بریم. جداول تبدیل دیگر سیستم‌های متریک و سیستم انگلیسی در ضمیمه ۶.۵.۲ آورده شده‌اند.

واحد SI برای سرعت دورانی ω برابر rad s^{-1} می‌باشد. در محاسبه عملی بهر حال، اغلب مناسب است تا آنرا بر حسب نرخ پله (پله بر ثانیه، Hz) f بیان کنیم، و معادله حرکت برای این حالت اینطور بیان می‌شود:

$$\tau_M = \theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df + T_f \quad (6.4)$$

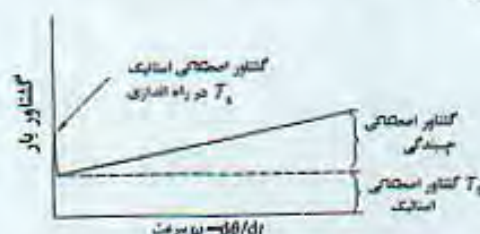
که θ_s = زاویه پله (رادیان)

f = نرخ پله (پله بر ثانیه)

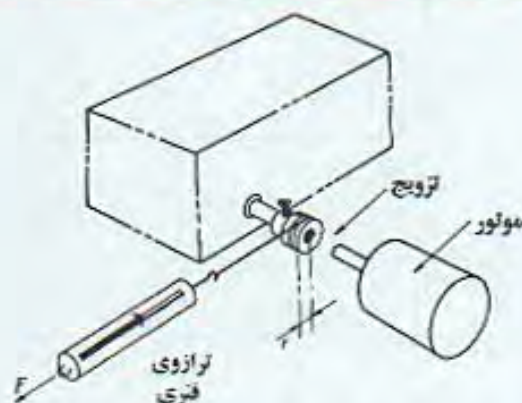
می‌باشند.

۶.۳.۲ گشتاورهای اصطکاکی^۲

گشتاور اصطکاکی ظاهر شده روی یک شی چرخان همانطور که در شکل ۶.۲۰ نشان داده شده نسبت به سرعت تغییر می‌کند. یک گشتاور اصطکاکی استاتیک T_s به هنگام راه‌اندازی ظاهر می‌شود، و ناگهان بعد از راه‌اندازی کمتر شده و سپس متناسب با سرعت افزایش می‌یابد. مولفه متناسب با سرعت با جمله دوم سمت راست رابطه (۶.۳) متناظر است، که ناشی از اصطکاک چسبندگی می‌باشد. قسمتی که با T_f در شکل نشان داده شده متناظر با جمله آخر در معادله ۶.۳ است. گشتاور اصطکاکی استاتیک T_s هیچ ربطی به رابطه (۶.۳) یا (۶.۴) ندارد، چون آنها روابطی هستند که حرکت موتور بعد از راه‌اندازی را در بر می‌گیرند. T_s فاکتور نسبتاً مهمی است که بر مشخصه‌های راه‌اندازی اثر می‌گذارد.



شکل ۶.۲۰: گشتاور بار اصطکاکی و چسبندگی بعنوان تابعی از سرعت.



شکل ۶.۲۱. اندازه‌گیری گشتاور اصطکاکی استاتیکی.

شکل ۶.۲۱ چگونگی اندازه‌گیری T_s و T_f را نشان می‌دهد. به این صورت که، ریسمان به‌دور قرقره‌ای توزیع شده به محور بار، پیچیده شده است، و از اینرو سر شل ریسمان توسط یک فنر تعادل اندازه‌گیری نیرو بر حسب kg کشیده می‌شود. اگر نیروی اندازه‌گیری شده قبل از چرخش محور F_s (kg) و نیروی قبل از راه‌اندازی F_f (kg) باشد، آنگاه T_s ، T_f اینطور بدست می‌آیند:

$$T_s = r F_s \quad (N_m) \quad (۶.۵)$$

$$T_f = r F_f \quad (N_m) \quad (۶.۶)$$

که r = شعاع قرقره (m) می‌باشد.

۶.۳.۳ افزایش سرعت

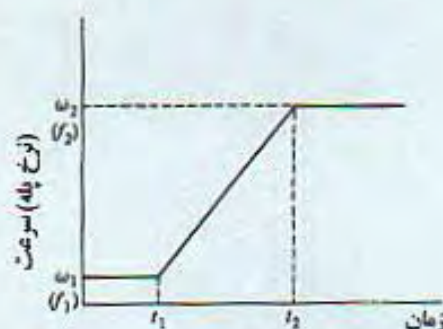
در اینجا رابطه گشتاور موتور با نرخ افزایش سرعت را با اشاره به چند مورد ساده بررسی خواهیم کرد. یک موتور باید بدون از دست دادن پله‌ها قبل از افزایش سرعت راه‌اندازی شود. اما این موضوع در بخش بعدی بررسی خواهد شد.

(۱) افزایش خطی سرعت. ابتدا، وقتی که جمله اصطکاک چسبندگی قابل صرف‌نظر است، رابطه (۶.۳) عبارت است از:

$$T_M - T_f = J \frac{d\omega}{dt} \quad (۶.۷)$$

اگر گشتاور موتور T_M در محدوده سرعت مورد نظر ثابت باشد، انتگرال‌گیری رابطه (۶.۷) برابر است با:

$$\omega = \left\{ (T_M - T_f) / J \right\} T + \omega_1 \quad (۶.۸)$$



شکل ۶.۲۲. افزایش خطی سرعت از ω_1 تا ω_2 در مدت t_1-t_2 .

یا نرخ پله برابر است با:

$$f = \frac{\tau_M - T_F}{\theta_M J} + f_1 \quad (6.9)$$

که ω_1 = سرعت زاویه‌ای قبل از آغاز افزایش سرعت

f_1 = نرخ پله قبل از آغاز افزایش سرعت.

از اینرو موتور را می‌توان همانطور که در شکل ۶.۲۲ نشان داده شده با نسبت ثابتی افزایش سرعت داد. این افزایش سرعت 'افزایش خطی سرعت' نامیده می‌شود.

مثال ۱. گشتاور موتور τ_M لازم برای افزایش سرعت اینرسی بار 10^{-2} kgm^2 از $\omega_1 = 100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ تا $\omega_2 = 300 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ در مدت 0.1 s چقدر است؟ T_F برابر 0.05 Nm است. محاسبه:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{300 - 100}{0.1} = 2 \times 10^3 \text{ rads}^{-1}, \quad (6.10)$$

$$\tau_M = J \frac{d\omega}{dt} + T_F = 10^{-2} \times 2 \times 10^3 + 0.05 = 0.25 \text{ Nm}. \quad (6.11)$$

مثال ۲. گشتاور موتور τ_M لازم برای افزایش سرعت اینرسی بار $2 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ از $f_1 = 500 \text{ Hz}$ تا $f_2 = 1500 \text{ Hz}$ در مدت 50 ms چقدر است؟ بار اصطکاکی 0.3 Nm و زاویه پله برابر $\theta_s = 1/8^\circ = 3/1416 \times 10^{-2} \text{ rad}$ می‌باشد.

محاسبه:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_2 - f_1}{\Delta t_1} = \frac{1500 - 500}{0.05} = 2 \times 10^4, \quad (6.12)$$

$$\tau_M = \theta_s J \frac{df}{dt} + T_s$$

$$= 3/1416 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-2} + 0.03 = 0.156 \text{ Nm} \quad (6.13)$$

مثال ۳. افزایش سرعت ماکزیمم اینرسی بار 10^{-2} kg m^2 که توسط گشتاور موتور 0.2 Nm درایو می‌شود چقدر است؟ بارهای اصطکاکی قابل صرفنظر هستند. زاویه پله برابر $2^\circ = 3/491 \times 10^{-2} \text{ rad}$ می‌باشد.

محاسبه:

$$\frac{d\omega}{dt} = \tau_M / J = \frac{0.2}{2 \times 10^{-2}} = 10^3 \text{ rads}^{-2}, \quad (6.14)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{\theta_s} \frac{d\omega}{dt} = \frac{10^3}{3/491 \times 10^{-2}} = 2/865 \times 10^4 \text{ steps s}^{-2}. \quad (6.15)$$

(۲) افزایش نمایی سرعت. هنگامیکه گشتاور اصطکاک چسبندگی قابل صرفنظر نیست معادله حرکت اینطور نوشته می‌شود.

$$\theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df - (\tau_M - \tau_f) = 0. \quad (6.16)$$

اگر گشتاور موتور تابعی از نرخ پله یا سرعت نباشد، یک جواب این معادله دیفرانسیل عبارت است از:

$$f = \frac{\tau_M - T_f}{\theta_s} - \left[\frac{\tau_M - T_f}{\theta_s} - f_1 \right] e^{-(D/J)t} \quad (6.17)$$

که $f_1 =$ نرخ پله در آغاز می‌باشد.

از اینرو نسبت ممکن افزایش سرعت با نرخ پله کاهش می‌یابد. این نوع از افزایش سرعت افزایش نمایی سرعت خوانده می‌شود.

هنگامیکه گشتاور موتور τ_M با نرخ پله بصورت خطی کاهش می‌یابد، مانند

$$\tau_M = T_{M0} - \alpha f \quad (6.18)$$

افزایش سرعت ماکزیمم ممکن در اینصورت نمایی است.

(۳) کاهش سرعت. هنگامیکه قطار پالس به هنگام کار موتور در سرعتی بالا ناگهان متوقف می‌شود، موتور در یک لحظه متوقف نمی‌شود و فرار^۱ می‌کند. بمنظور اینکه موتور بدون فرار متوقف شود، ابتدا با نرخ پله مناسبی کاهش سرعت پیدا می‌کند که از این طریق میتواند با ایمنی متوقف شود. هنگامیکه یک پالس پله بازماندگی کمی دیرتر از زمانبندی نرمال بکار رفته برای حفظ سرعت جاری داده می‌شود، گشتاور تولید شده τ_M منفی خواهد بود. پس حال معادله حرکت عبارت است از:

$$\theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df + (T_f - \tau_M) = 0 \quad (۶.۱۹)$$

$\tau_M < 0.$

هنگامیکه جمله مربوط به چسبندگی قابل صرف نظر باشد، سرعت بصورت خطی کاهش می‌یابد

$$f = f_s = \frac{T_f - \tau_M}{\theta_s J} t \quad (۶.۲۰)$$

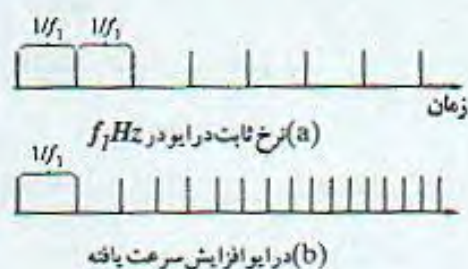
که f_s = نرخ پله قبل از آغاز کاهش سرعت در $t=0$.

۶.۴ تعیین زمانبندی‌ها و فواصل پالس

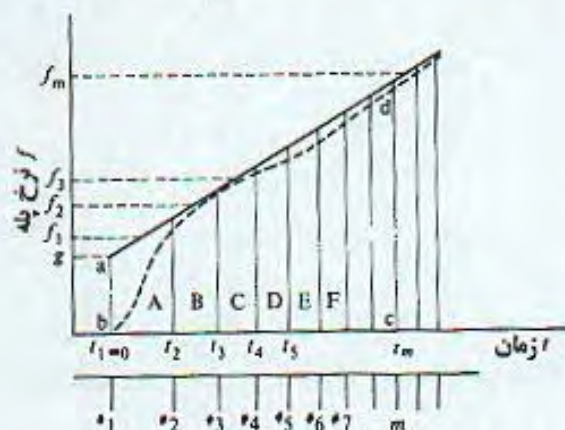
حال تئوری را برای تعیین زمانبندی‌ها و فواصل پالس بر مبنای ایده‌های قبلی ارائه خواهیم کرد.

۶.۴.۱ ملاحظه مشخصه‌های توقف

استفاده از رابطه (۶.۳) برای تحلیل عملکرد راه‌اندازی یک موتور پله‌ای آسان نیست، زیرا جریان گذرا و حرکت روتور در محاسبه گشتاور موتور باید به حساب آیند. در عوض، قابلیت راه‌اندازی یک موتور پله‌ای با استفاده از مشخصه‌های گشتاور توقف بررسی می‌شود. همانطور که در بخش ۶.۲.۲ بررسی شد، محدوده راه‌اندازی تابعی از اینرسی بار/موتور می‌باشد و با روش اعمال بار تغییر می‌کند. از اینرو، باید به منحنی مشخصه‌های توقف برای شرایط باری مراجعه کنیم که موتور بایستی در آن شرایط راه‌اندازی شود. فرض می‌کنیم که منحنی‌های گشتاور توقف نشان می‌دهند که موتور میتواند بدون نقص هنگامی که قطار پله‌ای با f_1 Hz داده می‌شود راه‌اندازی و متوقف شود، همانطور که در شکل ۶.۲۳(a) نشان داده شده است، فاصله پالس $1/f_1$ می‌باشد. در محاسبه زمانبندی‌های پالس برای افزایش سرعت در این مورد، معقول است تا اولین فاصله پالس مطابق شکل ۶.۲۳(b) به $1/f_1$ تنظیم شود، و فواصل پالس بعدی با توجه به مشخصه‌های چنته تعیین شوند.



شکل ۶.۲۳. درایو با نسبت ثابت و درایو افزایش سرعت یافته.



شکل ۶.۲۴. زمانبندی‌های پالس در افزایش خطی سرعت.

۶.۴.۲ تئوری مربوط به فواصل پالس در افزایش خطی سرعت

ابتدا حالت افزایش خطی سرعت را تحت دو شرط زیر بررسی خواهیم کرد.

۱. موتور پله‌ای مورد نظر قادر به راه‌اندازی در نرخ پالس f_1 می‌باشد.
 ۲. موتور می‌تواند در β پله برمجذور ثانیه تا نرخ چرخش f_s افزایش سرعت پیدا کند.
- شرط اول به مشخصه توقف و شرط دوم به مشخصه چتته مربوط می‌شود. مفهوم نرخ پله در حال تغییر f را اینطور بیان می‌کنیم

$$f = g + \beta t. \quad (۶.۲۱)$$

که در شکل ۶.۲۴ توسط یک خط پررنگ پیوسته نشان داده شده است. این کمیت بعنوان فرمان سرعت به موتور در نظر گرفته می‌شود، اما نمودار واقعی سرعت همانند منحنی خط چین نشان داده شده در همان شکل می‌باشد. زمانبندی‌های پالس اینطور نشان داده می‌شوند

$$t_1 = 0, t_2, t_3, t_4 \dots t_m \dots$$

بخاطر اینکه زاویه دورانی بوجود آمده برای هر پریود از m مین پالس تا $(m+1)$ مین پالس یک

زاویه پله است، مساحت هر ذوزنقه $A, B, C, D \dots$ باید برابر با یک پله باشد.

حال فواصل پالس Δt_m را اینطور تعریف خواهیم کرد.

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m \quad (6.22)$$

و فرکانس پالس متناظر با نرخ پله f_m برای Δt_m اینطور تعریف می‌شود.

$$f_m = 1/\Delta t_m. \quad (6.23)$$

این مقدار f در رابطه (۶.۲۱) در $t = t_m + \Delta t_m/2$ یا نقطه میانی هر فاصله پالس برابر می‌باشد.

حال کمیت g در رابطه (۶.۲۱) را طوری تعیین خواهیم کرد که f در $t = \Delta t/2$ با f_1 برابر باشد.

چون Δt_1 اولین فاصله پالس، باید $1/f_1$ باشد، رابطه (۶.۲۱) نتیجه می‌دهد:

$$f_1 = g + \beta \frac{\Delta t_1}{2} = g + \beta \frac{1}{2f_1}. \quad (6.24)$$

در نتیجه g اینطور تعیین می‌شود

$$g = f_1 - \frac{\beta}{2f_1}. \quad (6.25)$$

زمانبندی‌های پالس f_m تعیین می‌شوند، با توجه به اینکه مساحت مربع $abcd$ برابر $(m-1)$ پله

می‌باشد: معادله برابر است با

$$\{q + (g + \beta t_m)\} t_m = 2(m-1). \quad (6.26)$$

این رابطه معادله درجه دو را می‌دهد

$$\beta t_m^2 + 2gt_m - 2(m-1) = 0 \quad (6.27)$$

پس

$$t_m = \left[\sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta} - g \right] / \beta. \quad (6.28)$$

فاصله پالس Δt_m عبارت است از

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m = \left\{ \sqrt{g^2 + 2m\beta} - \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta} \right\} / \beta. \quad (6.29)$$

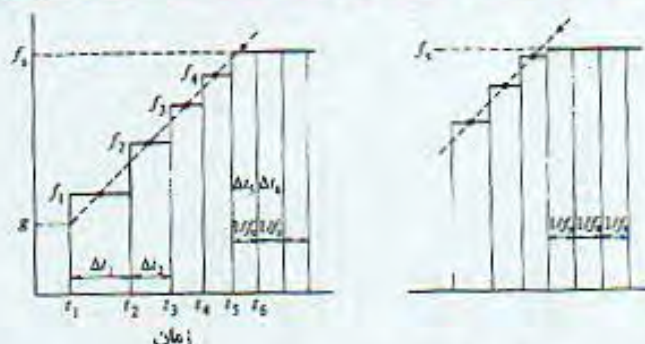
این رابطه از نظر ریاضی با رابطه زیر مساوی است

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{g^2 + 2m\beta} + \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta}} \quad (6.30)$$

که خطای کمتری را در محاسبات عددی نشان می‌دهد. از اینرو نرخ پله متناظر هر فاصله پالس

برابر است با:

$$f_m = \left[\sqrt{g^2 + 2m\beta} + \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta} \right] / 2 \quad (6.31)$$



شکل ۶.۲۵ چون f_s هنگامیکه از رابطه (۶.۳۱) محاسبه شود از f_s بیشتر می‌شود، مقادیر Δt_s ، Δt_6 ... روی $1/f_s$ تنظیم می‌شوند.

جدول ۶.۱ زمانبندی‌ها، فواصل، و نرخ پالس، هنگامیکه در $f_1 = 500 \text{ Hz}$ فرآه‌اندازی و در $f_s = 2000 \text{ Hz}$ تا $10^5 \text{ steps s}^{-2}$ افزایش سرعت پیدا کند.

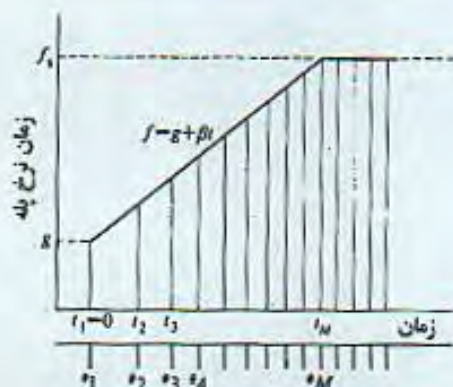
m	$t_m \text{ (ms)}$	$\Delta t_m \text{ (ms)}$	$f_m \text{ (Hz)}$
1	0	2.000	500
2	2.000	1.483	674
3	3.483	1.234	810
4	4.718	1.080	926
5	5.798	0.972	1028
6	6.770	0.892	1122
7	7.662	0.828	1208
8	8.490	0.776	1288
9	9.267	0.734	1363
10	10.000	0.697	1435
11	10.697	0.665	1503
12	11.362	0.638	1568
13	12.000	0.613	1631
14	12.613	0.591	1691
15	13.205	0.572	1749
16	13.776	0.554	1805
17	14.330	0.538	1860
18	14.868	0.523	1913
19	15.391	0.509	1965
20	15.900	0.500	2000
(21)	16.400		

مقادیر Δt_m و f_m به ازای $m = 1, 2, 3, \dots$ را می‌توان بترتیب از روابط (۶.۳۰) و (۶.۳۱) محاسبه کرد. اما اگر f_m با f_s در $m = M$ برابر، یا از آن بیشتر، باشد فاصله پالس Δt_m و نرخ پله f_m بترتیب با $1/f_s$ و f_s جایگزین می‌شوند، و فواصل پالس بعدی باید $1/f_s$ باشند. این موضوع با استفاده از مثالی در شکل ۶.۲۵ تشریح می‌شود.

مثال‌ها. جدول ۶.۱ فواصل پالس محاسبه شده برای شرایط زیر را نشان می‌دهد.

$$f_1 = 500 \text{ Hz}, \quad f_s = 2000 \text{ Hz}, \quad \beta = 10^5 \text{ step s}^{-2}$$

در اینجا بیست پله قبل از رسیدن به چرخش مورد استفاده قرار می‌گیرد.


 شکل ۶.۲۶ تغییر از افزایش سرعت به چرخش در t_M .

۶.۴.۳ محاسبه دستیابی به نرخ چرخش در M امین پالس

شکل ۶.۲۶ نمودار یک فرمان سرعت و زمانبندی‌های پالس را نشان می‌دهد. در این حالت فرمان سرعت بدست آمده از رابطه (۶.۲۱) به نرخ چرخش در M امین پالس می‌رسد، و فواصل پالس Δt_m به ازای $m \geq M$ برابر $1/f_s$ می‌باشند. حال فرمولی را مطالعه خواهیم کرد که در آن نرخ پله با نرخ اولیه معلوم f_1 راه‌اندازی می‌شود و به نرخ چرخش معلوم f_s در M امین پالس می‌رسد. فرمولی که بدست می‌آید برای تعیین زمانبندی‌ها و فواصل پالس برای افزایش خطی سرعت نیز مفید خواهد بود. از شکل ۶.۲۶ معلوم است که f در رابطه (۶.۲۱) در t_M برابر با نرخ چرخش f_s می‌شود؛ از اینرو

$$f_s = g + \beta t_M. \quad (6.32)$$

از رابطه (۶.۲۸)

$$\beta t_M = \sqrt{g^2 + 2(M-1)\beta} - g. \quad (6.33)$$

از اینرو

$$f_s = \sqrt{g^2 + 2(M-1)\beta}. \quad (6.34)$$

که از آن افزایش سرعت لازم اینطور بدست می‌آید

$$\beta = \frac{f_s^2 - g^2}{2(M-1)} \quad (6.35)$$

با حذف g از روابط (۶.۲۴) و (۶.۳۵) معادله درجه دو زیر بدست می‌آید

$$\frac{\beta^2}{4f_1^2} + (2M-3)\beta - (f_s^2 - f_1^2) = 0 \quad (6.36)$$

که از آن افزایش سرعت لازم β اینطور بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{2(f_s^2 - f_1^2)}{\sqrt{((2M - 3)^2 + (f_s/f_1)^2 - 1) + (2M - 3)}} \quad (۶.۳۷)$$

زمانبندی‌ها و فواصل پالس بترتیب از روابط (۶.۲۸) و (۶.۳۰)، با β معلوم از رابطه (۶.۳۷) و g از رابطه (۶.۲۵)، محاسبه می‌شوند. اما می‌توانیم روابط ساده‌تری که بجای g از f_s استفاده می‌کنند را بدست آوریم.

از رابطه (۶.۳۴) بدست می‌آوریم:

$$g^2 = f_s^2 - 2(M - 1)\beta. \quad (۶.۳۸)$$

با جایگذاری این رابطه در روابط (۶.۲۸)، (۶.۳۰)، و (۶.۳۱) روابط زیر حاصل می‌شوند:
زمانبندی‌های پالس:

$$t_m = \frac{2(m - 1)}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M - m)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M - 1)\beta)}} \quad (۶.۳۹)$$

فواصل پالس:

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M - m - 1)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M - m)\beta)}} \quad (۶.۴۰)$$

نرخ‌های پله:

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} = \left\{ \sqrt{(f_s^2 - 2(M - m - 1)\beta)} + \sqrt{(f_s^2 - 2(M - m)\beta)} \right\} / 2 \quad (۶.۴۱)$$

به ازای m از ۱ تا $M - ۱$

کمیت‌ها به ازای $m \geq M$ عبارتند از:

$$t_m = t_M + (m - M)/f_s \quad (۶.۴۲)$$

$$\Delta t_m = 1/f_s \quad (۶.۴۳)$$

$$f_m = f_s. \quad (۶.۴۴)$$

جدول ۶.۲. فهرست برنامه برای محاسبه زمانبندی‌ها، فواصل، نرخ‌های پالس و Q_m ‌ها برای افزایش سرعت

```

100 REM Calculation of pulse intervals
110 INPUT "Starting rate"; F1
120 INPUT "Slew rate"; FS
130 INPUT "Number of pulses for acceleration"; M
140 B=2*(FS^2-F1^2)/(SQRT((2*M-3)^2*(FS/F1)^2-1)+(2*M-3))
150 PRINT "Starting rate=";F1;" SLEW RATE=";FS
160 PRINT "Acceleration=";B
170 PRINT "Number of steps for acceleration M=";M
180 PRINT " "
190 PRINT " m   T(ms)   Interval(ms)   Freq(Hz)   Qm"
200 PRINT " "
210 FOR K=1 TO M STEP 1
220 TIME=2*(K-1)/(SQRT(FS^2-2*(M-K)*B)+SQRT(FS^2-2*(M-1)*B))
230 INTERVAL=2/(SQRT(FS^2-2*(M-K-1)*B)+SQRT(FS^2-2*(M-K)*B))
240 IF K=M THEN INTERVAL=1/FS
250 FREQ=1/INTERVAL
260 Q=INT((4*1E+06*INTERVAL-251)/24+.5)
270 PRINT USING "## ###.### ##.### ###" Q
      ;K, TIME*1000, INTERVAL*1000, FREQ, Q
280 NEXT K
290 END

```

مثال. جدول ۶.۲ فهرست برنامه‌ای با استفاده از زبان BASIC برای محاسبه زمانبندی‌ها، فواصل پالس و نرخ‌های پله بر اساس مفاهیم بالا می‌باشد. این نرم‌افزار برای محاسبه داده Q_m بکار رفته در برنامه افزایش سرعت ارائه شده در بخش ۵.۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۶.۳ نتایج بکار رفته در نمونه مورد بررسی در بخش ۵.۵ می‌باشد، که در آن حالت موتور با نرخ راه‌اندازی ۱۰۰ Hz راه‌اندازی شد و تا ۳۰۰ Hz با ۲۴ پله افزایش سرعت پیدا کرد. چنان حرکت آهسته‌ای فقط نمایشی^۱ است؛ در کاربردهای واقعی نرخ راه‌اندازی در حدود ۵۰۰ Hz قرار می‌گیرد و تا چندین هزار هرتز، همانطور که قبلاً بدست آمد، افزایش سرعت می‌یابد.

۶.۴.۴ کاهش خطی سرعت

ساده‌ترین راه برای تعیین فواصل پالس در کاهش سرعت مرتب کردن آنها بصورت مخالف با دسته فواصل پالس بکار رفته برای افزایش سرعت می‌باشد. بهرحال، بعلمت اینکه بطور کلی کاهش سرعت می‌تواند بیشتر از افزایش سرعت باشد و آخرین فاصله پالس می‌تواند از فاصله اول کوتاهتر باشد، اگر استفاده از فواصل پالس جدید برای کاهش سرعت مطلوب باشد بایستی آنها را محاسبه کنیم. در آن حالت نتایج رابطه (۶.۳۵) مربوط به شکل ۶.۲۷ را اعمال می‌کنیم.

نسبت کاهش سرعت γ که از N پالس استفاده می‌کند و آخرین فاصله پالس را برابر با $1/f_1$ قرار می‌دهد از رابطه زیر بدست می‌آید

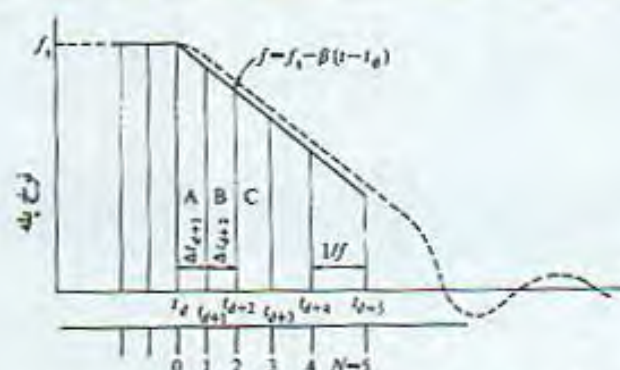
$$\gamma = \frac{2(f_s^2 - f_1^2)}{\sqrt{((2N-1)^2 + (f_s/f_1)^2 - 1) + (2N-1)}} \quad (6.45)$$

که f_1 آخرین نرخ پله

f_s = نرخ پله چرخش می‌باشند.

جدول ۶.۳. زمانبندی‌ها، فواصل، نرخ‌های پالس، و Q_m ؛ داماندازی در $f_0 = 100 \text{ Hz}$ و رسیدن به نرخ چرخش 300 Hz در ۲۴ امین پالس؛ افزایش سرعت برابر $1776/03 \text{ steps}^{-2}$ می‌باشد.

m	t_m	$\Delta t_m (\text{ms})$	$f_m (\text{Hz})$	Q_m
1	0.0000	10.0000	100	1656
2	10.0000	8.5835	117	1420
3	18.5835	7.6389	131	1263
4	26.2224	6.9510	144	1148
5	33.1735	6.4210	156	1060
6	39.5945	5.9964	167	989
7	45.5909	5.6464	177	931
8	51.2373	5.3513	187	881
9	56.5886	5.0981	196	839
10	61.6867	4.8778	205	803
11	66.5645	4.6839	214	770
12	71.2484	4.5113	222	741
13	75.7597	4.3565	230	716
14	80.1163	4.2167	237	692
15	84.3329	4.0895	245	671
16	88.4224	3.9732	252	652
17	92.3956	3.8662	259	634
18	96.2618	3.7675	265	617
19	100.0290	3.6760	272	602
20	103.7050	3.5908	278	588
21	107.2960	3.5113	285	575
22	110.8070	3.4368	291	562
23	114.2440	3.3669	297	551
24	117.6110	3.3333	300	545



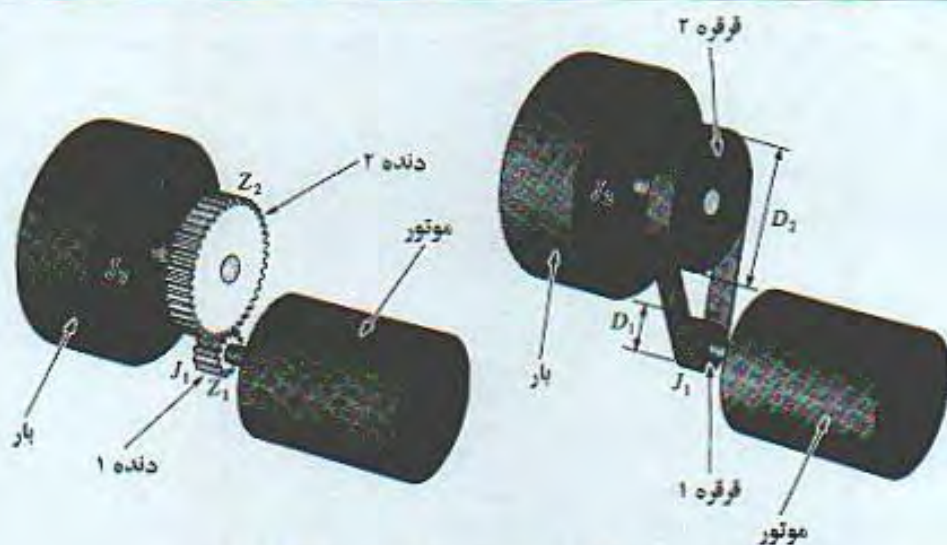
شکل ۶.۲۷. زمانبندی‌های پالس در کاهش خطی سرعت.

با استفاده از این γ ، فواصل پالس و نرخ پالس از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\Delta t_{d+n} = 2 / \left\{ \sqrt{f_s^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_s^2 - 2(n-1)\gamma} \right\} \quad (6.46)$$

$$f_{d+n} = \frac{1}{\Delta t_{d+n}} \left\{ \sqrt{f_s^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_s^2 - 2(n-1)\gamma} \right\} / 2 \quad (6.47)$$

که d برابر با عدد آخرین پالس در ناحیه چرخش می‌باشد.



شکل ۶.۲۸. انتقال گشتاور توسط دنده‌ها یا قرقره‌ها و تسمه.

۶.۵ ضمایم

۶.۵.۱ ضمیمه - اینرسی معادل در محور موتور

(۱) اینرسی انعکاسی از تسمه یا دنده‌ها، هنگامیکه گشتاور موتور توسط دنده‌ها یا تسمه و قرقره‌ها همانطور که در شکل ۶.۲۸ نشان داده شده منتقل می‌شود اینرسی کل انعکاسی در محور موتور برابر است با:

$$J = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 J_2 + J_1 \quad (۶.۴۸)$$

یا

$$J = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 J_2 + J_1 \quad (۶.۴۹)$$

که J = اینرسی معادل کل در محور موتور

J_1 = اینرسی دنده ۱ یا قرقره ۱

J_2 = اینرسی در محور بار؛ بار، محور، و دنده ۲ یا قرقره ۲

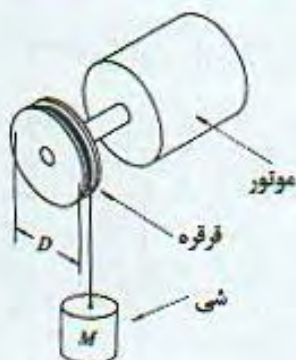
Z_1 = تعداد دندانه‌ها در دنده ۱

Z_2 = تعداد دندانه‌ها در دنده ۲

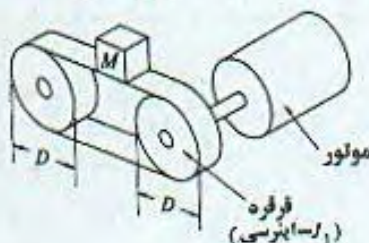
D_1 = قطر قرقره ۱

D_2 = قطر قرقره ۲

می‌باشند.



شکل ۶.۲۹. بلند کردن یک شی بوسیله یک تسمه.



شکل ۶.۳۰. حرکت خطی یک شی بوسیله یک تسمه.

(۲) بلند کردن یک شی (شکل ۶.۲۹). هنگامیکه موتوری جسمی به جرم M را توسط فرقه‌ای با اینرسی J_1 بلند می‌کند، اینرسی انعکاسی کل در موتور عبارت است از

$$J = J_1 + \frac{1}{4}MD^2 \quad (۶.۵۰)$$

(۳) درایو یک شی توسط یک تسمه (شکل ۶.۳۰)

$$J = 2J_1 + \frac{1}{4}MD^2 \quad (۶.۵۱)$$

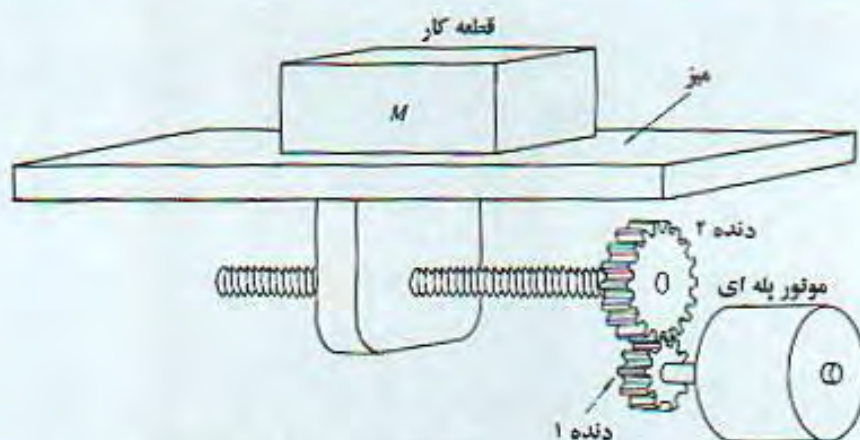
که J_1 = اینرسی هر فرقه (kg m^2)

D = قطر فرقه (m)

M = جرم شی و تسمه (kg)

می‌باشند.

(۴) حرکت خطی بوسیله یک پیچ هدایت^۱ و دنده‌ها. هنگامیکه قطعه کار و میزی توسط دنده‌ها و پیچ هدایتی همانطور که در شکل ۶.۳۱ نشان داده شده درایو می‌شوند، کل اینرسی انعکاسی در موتور عبارت است از



شکل ۶.۳۱. حرکت خطی یک میز و قطعه کار بوسیله یک پیچ هدایت و دنده‌ها.

$$J = J_1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 (J_2 + J_3) + M \left(\frac{p}{2\pi} \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \quad (۶.۵۲)$$

که J_1 = اینرسی دنده تزویج شده به روتور (kg m^2)

J_2 = اینرسی دنده تزویج شده به پیچ هدایت (kg m^2)

J_3 = اینرسی پیچ هدایت (kg m^2)

Z_1 = تعداد دندانه‌ها روی دنده تزویج شده به روتور

Z_2 = تعداد دندانه‌ها روی دنده تزویج شده به پیچ هدایت

M = جرم شی و میز (kg)

p = گام پیچ هدایت (m)

می‌باشند.

۶.۵.۲ ضمیمه - جداول تبدیل واحدها

(۱) وزن / جرم

اونس (oz)	پوند (lb)	کیلوگرم (kg)	
۳۵/۲۷۳۹	۲/۲۰۴۶۲	۱	kg
۱۶	۱	۰/۴۵۳۵۹۲	lb
۱	۰/۰۶۲۵	۰/۰۲۸۳۴۹	oz

(۲) طول

فوت (ft)	اینچ (in)	متر (m)	
۳/۲۸۰۸۹	۳۹/۳۷۰۷	۱	m
۰/۰۸۳۳۳	۱	۰/۰۲۵۳۹۹	in
۱	۱۲	۰/۳۰۴۷۹۴	ft

(۳) گشتاور

نیوتن متر (Nm)	پوند اینچ (lb in)	اونس اینچ (oz in)
۱	۸/۸۵۰۷۵	۱۴۱/۶۱۲
۰/۱۱۲۹۸۵	۱	۱۶
۰/۰۰۷۰۶۱۵۵	۰/۰۶۲۵	۱

(۴) سرعت دورانی

رادیان بر ثانیه (rad s^{-1})	دور بر ثانیه (r.p.s.)	دور بر دقیقه (r.p.m.)
۱	۰/۱۵۹۱۵۵	۹/۵۴۹۲۹
۶/۲۸۳۱۹	۱	۶۰
۰/۱۰۴۷۱۹	۰/۰۱۶۶۶۶۷	۱

(۵) ممان اینرسی

kg m ²	oz in s ²	lb in s ²
۱	۱۴۱/۶۱۲	۸/۸۵۰۷۳
۰/۰۰۷۰۶۱۵۵	۱	۰/۰۶۲۵
۰/۱۱۲۹۸۵	۱۶	۱

مراجع فصل ۶

- [1] Ward, P. A. and Lawrenson, P. J. (1977). Backlash, resonance and instability in stepping motors. *Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. 73-83.
- [2] Kordic, K. S. (1976). Dynamic torque measurements for step motors. *Proc. Fifth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. E1-21.

کنترل حلقه - بسته موتورهای پله‌ای



۷.۱ محدودیتهای عملکرد حلقه - باز^۱ و نیاز به عملکرد حلقه - بسته^۲

در سیستم‌های درایو تشریح شده در فصل ۵ پالس‌های فرمان - پله از یک منبع خارجی داده می‌شدند، و انتظار می‌رفت که موتور پله‌ای قادر به دنبال کردن هر پالس باشد. این نوع از عملکرد به نام درایو حلقه - باز خوانده می‌شود. درایو حلقه - باز جالب بوده و بطور گسترده‌ای در کاربردهای کنترل سرعت و موقعیت مقبولیت دارد. بهرحال، عملکرد یک موتور پله‌ای در درایو حلقه - باز محدود است. بطور مثال یک موتور پله‌ای درایو شده به روش حلقه - باز هنگامیکه فرکانس قطار پله خیلی بالاست یا اینرسی بار خیلی سنگین است قادر به دنبال کردن فرمان پالس نیست. به‌علاوه حرکت موتور در درایوهای حلقه - باز تمایل به نوسانی شدن دارد.

عملکرد یک موتور پله‌ای با استفاده از فیدبک موقعیت و یا فیدبک سرعت برای تعیین فازهای مناسب برای سوئیچینگ در زمانبندی‌های مناسب تا حد بسیار زیادی بهبود می‌یابد. این نوع از کنترل به نام درایو حلقه - بسته خوانده می‌شود. در کنترل حلقه - بسته، برای تشخیص موقعیت روتور نیاز به یک سنسور موقعیت می‌باشد. بعنوان یک سنسور معمول، امروزه، انکدر نوری^۳ بکار می‌رود و معمولاً به محور موتور تزویج می‌شود. مکانیزم و اساس یک انکدر نوری بعداً با استفاده از شکل‌های ۷.۱۰ و ۷.۱۱ تشریح خواهد شد. در یک سیستم پیشرفته‌تر، بجای یک سنسور مکانیکی اضافی، موقعیت روتور با مشاهده شکل موجهای جریان سیم‌پیچی‌های موتور تشخیص داده می‌شود.

کنترل حلقه - بسته نسبت به کنترل حلقه - باز نه تنها در اینکه هیچگاه نقص در پله اتفاق نمی‌افتد بلکه در اینکه حرکت سریعتر و روان‌تر است، نیز مزیت دارد.

۷.۲ مفهوم زاویه پیش^۴

قبل از بررسی جزئیات سیستم حلقه - بسته مفهوم زاویه پیش را مطالعه خواهیم کرد.

1- open-loop operation

2- closed-loop operation

3- optical encoder

4- lead angle

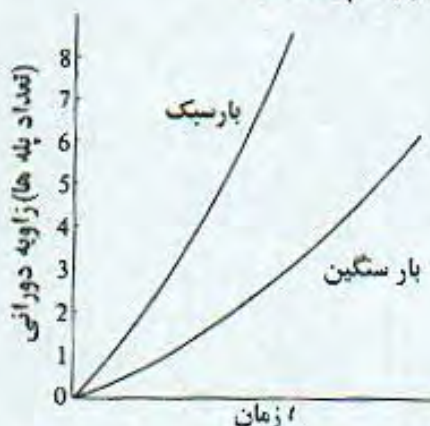


شکل ۷.۱. عملکرد ساده حلقه - بسته یک موتور پله‌ای.

۷.۲.۱ زاویه پیش تک پله و زوایای پیش بزرگتر

فرض می‌کنیم که در سیستم حلقه - بسته شکل ۷.۱ یک موتور پله‌ای در حال حرکت یا در آستانه راه‌اندازی است. انکدرنوری تزویج شده به روتور موقعیت روتور را تشخیص داده و اطلاعات خود را توالی ساز منطقی می‌دهد. سپس، توالی ساز منطقی فازهای مناسبی که باید تحریک شوند را، با توجه به اطلاعات موقعیت، تعیین می‌کند. رابطه بین موقعیت جاری روتور و فازهایی که باید تحریک شوند بصورت زاویه پیش مشخص می‌شود. در این مثال موتور سه‌فاز و ترتیب تحریک در روش یک‌فاز در تحریک $Ph \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph3$ می‌باشد. $PH1$ حالا تحریک شده و روتور در حال توقف در یک موقعیت تعادلی از $Ph(N)$ رسیده است، توالی ساز منطقی تنظیم شده برای عملکرد زاویه پیش تک پله سیگنالی را برای روشن کردن $Ph(N+1)$ برای ادامه حرکت تولید می‌کند. از اینرو یک موتور پله‌ای در سیستمی حلقه - بسته مانند یک موتور DC بدون جاروبک که در آن سیم‌پیچی‌های مناسب برای تحریک بطور خودکار توسط یک سنسور موقعیت داخلی یا تزویج شده به موتور انتخاب می‌شوند، عمل می‌کند.

سرعت یک موتور پله‌ای درایو شده به روش حلقه - بسته همانطور که در شکل ۷.۲ نشان داده شده با بار تغییر می‌کند. هرچه بار بزرگتر باشد، سرعت کمتر است. بهر حال، زاویه پیش تک‌پله همواره بکار برده نمی‌شود، زیرا هنگامیکه یک بار اصطکاکی انتقال می‌یابد تضمینی برای چرخش پیوسته نیست. علت آن اینطور بیان می‌شود. فرض کنید که موتوری به سمت موقعیت تعادلی از فاز تحریک شده در حرکت است. بعلا اینک گشتاور استاتیک با نزدیک شدن روتور به موقعیت تعادل کاهش می‌یابد، موتور، قبل از رسیدن به موقعیت تعادل، در موقعیتی که گشتاور اصطکاکی و گشتاور استاتیک برابر و مخالف می‌باشند، متوقف می‌شود. حال چون زاویه پیش برابر یک پله است، فاز بعدی تحریک نمی‌شود، به معنی اینکه روتور نمی‌تواند بیشتر حرکت کند. اگر سوئیچینگ تحریک



(a) ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 with $\phi_2 = \phi_1 + \frac{2\pi}{3}$ and $\phi_3 = \phi_1 + \frac{4\pi}{3}$. The diagram shows three sine waves. The first wave (Ph1) is at a peak. The second wave (Ph2) is at a zero-crossing. The third wave (Ph3) is at a trough. The phase difference between Ph1 and Ph2 is $\frac{2\pi}{3}$, and between Ph1 and Ph3 is $\frac{4\pi}{3}$.

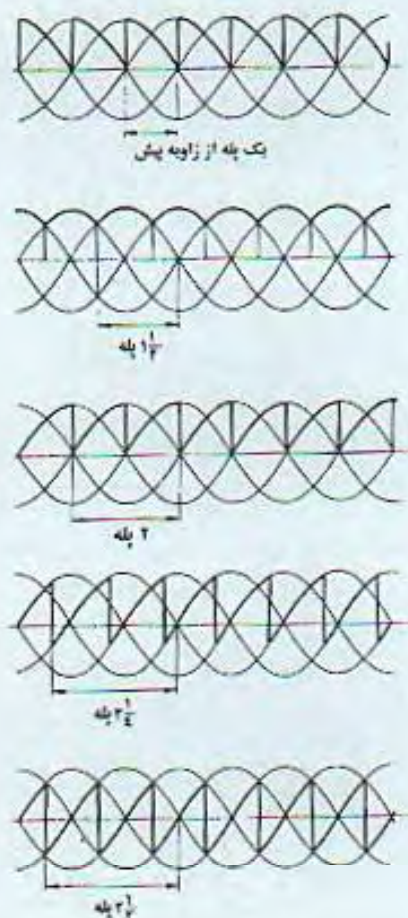
(b) The waves are shifted by $\frac{1}{3}$ of a cycle. The phase difference between Ph1 and Ph2 is $\frac{2\pi}{3}$, and between Ph1 and Ph3 is $\frac{4\pi}{3}$.

(c) The waves are shifted by $\frac{2}{3}$ of a cycle. The phase difference between Ph1 and Ph2 is $\frac{2\pi}{3}$, and between Ph1 and Ph3 is $\frac{4\pi}{3}$.

(d) The waves are shifted by 1 full cycle. The phase difference between Ph1 and Ph2 is $\frac{2\pi}{3}$, and between Ph1 and Ph3 is $\frac{4\pi}{3}$.

(e) The waves are shifted by 1.5 full cycles. The phase difference between Ph1 and Ph2 is $\frac{2\pi}{3}$, and between Ph1 and Ph3 is $\frac{4\pi}{3}$.

شکل ۷.۳. رابطه بین زاویه پیش و گشتاور استاتیکی در یک موتور سه فاز. (a) مشخصه های هر فاز؛ (b) - (e) به ازای زوایای پیش مختلف از ۱ تا ۲ پله.

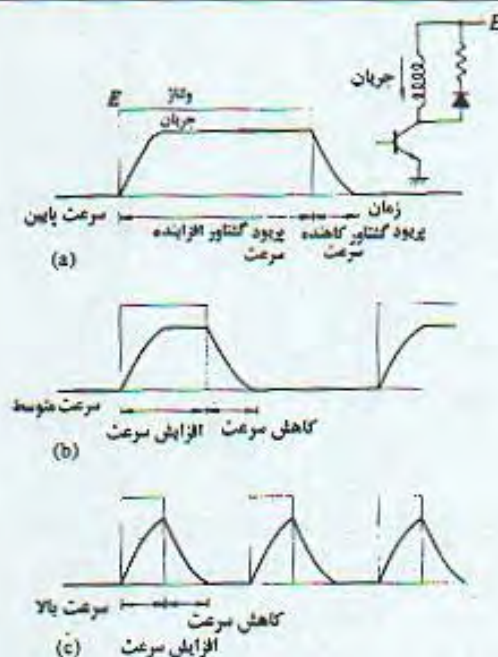


شکل ۷.۴. رابطه بین زاویه پیش و گشتاور استاتیک در یک موتور چهار فاز.

۷.۲.۲ زاویه پیش و گشتاور استاتیک

منجنی‌های گشتاور برجایابی برای یک موتور سه فاز را می‌توان با موجهای سینوسی نشان داده شده در شکل (a) ۷.۳ تقریب زد. هنگامیکه موتور به روش یکفاز در تحریک با زاویه پیش تک پله در حال کار کردن است، گشتاور استاتیک مطابق مسیر منحنی‌های پر رنگ شکل (b) ۷.۳ با زمان تغییر خواهد کرد. توجه کنید که روتور به یک موقعیت تعادل از فاز از قبل تحریک شده می‌رسد، این فاز خاموش می‌شود و فاز بعدی روشن می‌شود. شکل (c) ۷.۳ حالت زاویه پیش $1\frac{1}{4}$ پله را نشان می‌دهد که بیشترین گشتاور متوسط را در سینوسی می‌دهد. اگر زاویه پیش بیشتر افزایش یابد، گشتاور استاتیک متوسط کاهش خواهد یافت [به (d) و (e) مراجعه کنید].

حالت موتور چهار فاز در شکل ۷.۴ نشان داده شده است، که نشان می‌دهد گشتاور میانگین هنگامیکه زاویه پیش $1/5$ پله است بیشترین مقدار را داراست.

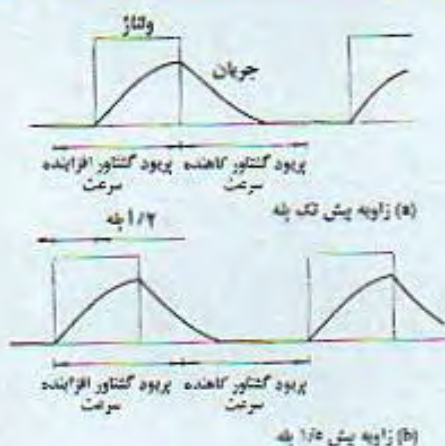


شکل ۷.۵. رابطه بین ولتاژ و جریان در عملکرد زاویه پیش تک پله.

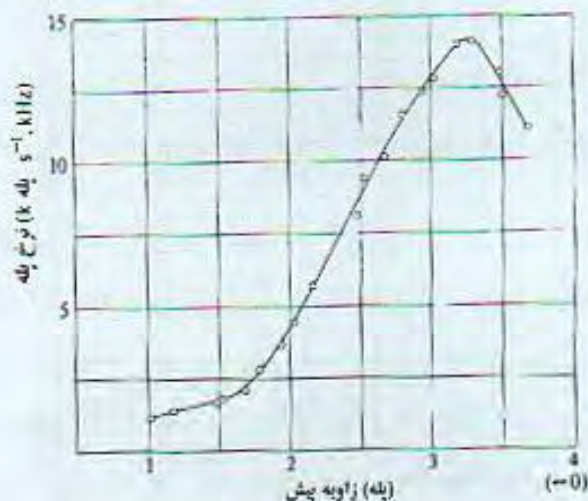
۷.۲.۳. زوایای پیش بزرگ برای سرعت‌های بالا

دوباره در شکل (e) ۷.۳، دیده می‌شود که گشتاور استاتیک متوسط بوجود آمده در یک موتور سه‌فاز اگر زاویه پیش روی ۲ پله تنظیم شود برابر صفر است. به همین صورت، یک موتور چهار فاز با زاویه پیش تنظیم شده روی ۲/۵ پله گشتاور استاتیک متوسط صفر تولید می‌کند. این عبارات تنها برای حالتی صادق می‌باشند که سرعت بشدت کم است. هنگامیکه موتوری در حال حرکت است، آن زوایای پیش گشتاورهای متوسط کافی برای افزایش یا حفظ سرعت تولید می‌کنند. این امر بستگی به ثابت زمانی الکتریکی سیم‌پیچی‌ها دارد. منحنی‌های گشتاور - جابجایی در شکل‌های ۷.۳ و ۷.۴ با این فرض رسم شده‌اند که جریان با روشن شدن ترانزیستور با مقدار ماکزیمم خود ظهور می‌کند. در واقع یک تأخیر زمانی قبل از اینکه جریان به ماکزیمم خود برسد بعلت اندوکتانس سیم‌پیچی وجود دارد.

د شکل ۷.۵ رابطه بین ولتاژ و جریان به ازای سه نرخ پله مختلف نشان داده شده است: (a) سرعت کم؛ (b) سرعت متوسط؛ (c) سرعت بالا. جریان گذرنده از داخل سیم‌پیچی‌ها در پریود ON ترانزیستور، گشتاور مثبت مفید برای افزایش سرعت موتور تولید می‌کند. از طرف دیگر، جریانی که در سیم‌پیچی و دیود حذف‌کننده بعد از خاموش شدن ترانزیستور گردش می‌کند می‌تواند دلیل گشتاور تأخیر باشد. هنگامیکه سرعت کم است، اثر گشتاور تأخیر قابل صرف‌نظر می‌باشد. با افزایش سرعت، بهر حال، همانطور که در شکل (c) و (b) ۷.۵ آشکار است، پریود گشتاور



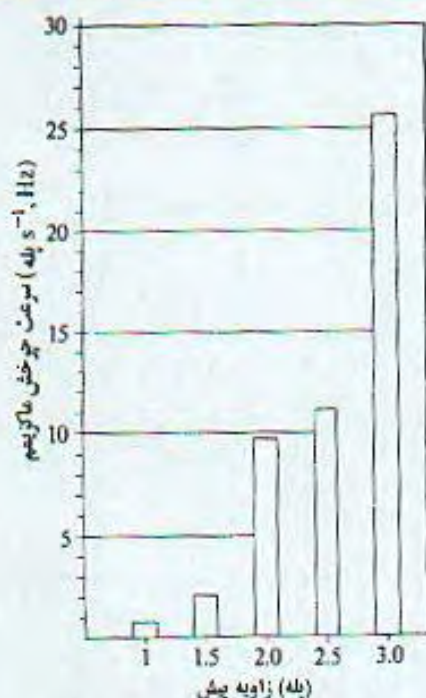
شکل ۷.۶. گشتاور متوسط با افزایش زاویه پیش در محدوده‌های بالاتر سرعت افزایش می‌یابد.



شکل ۷.۷. نرخ چرخشی ماکزیمم بر زاویه پیش اندازه‌گیری شده روی یک موتور پله‌ای هیبرید ۱/۸ با درایو به روش دوفاز در تحریک.

ماکزیمم تا وقتی که زاویه پیش روی مقداری نزدیک به ۰/۱ پله تنظیم شده خیلی بزرگ نیست. گشتاور متوسط و سرعت ماکزیمم با افزایش زاویه پیش افزایش می‌یابند، زیرا تاخیر زمانی در ظهور جریان همانطور که در شکل ۷.۶ نشان داده با زودتر روشن کردن ترانزیستور جبران می‌شود. Kataoka, Shimotani^[۱] تحلیلی نظری از این موضوع برای یک موتور VR چند پشته‌ای انجام دادند.

شکل ۷.۷^[۲] مثالی از مشخصه‌های نرخ چرخش ماکزیمم بر زاویه پیش را نشان می‌دهد که روی یک موتور پله‌ای هیبرید چهارفاز با درایو در روش دوفاز در تحریک اندازه‌گیری شده‌اند. در این حالت نرخ چرخش ماکزیمم با زاویه پیش ۰/۱ پله در حدود ۱۰۰۰ Hz می‌باشد، اما با زاویه پیش ۳/۲ پله

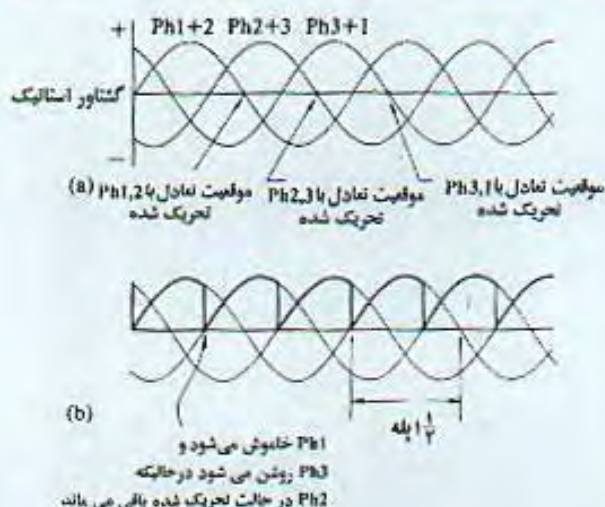


شکل ۷.۸. نرخ چرخش ماکزیمم بر زاویه پیش اندازه‌گیری شده روی یک موتور هیبرید $1/8$ در روش ترکیبی یک و دوفاز در تحریک

تا 14000 Hz افزایش می‌یابد. شکل ۷.۸ مثال دیگری را نشان می‌دهد، که در آن زاویه پیش بطور پیوسته تغییر نمی‌کند، بلکه بصورت گسسته از $1/1$ تا $3/1$ پله با نموهای $0/5$ پله می‌باشد. تحریک تکفاز با زوایای پیش $1/5$ و $2/5$ بکار می‌رود، در حالیکه تحریک دوفاز با زوایای پیش 1 ، 2 ، و 3 پله بکار می‌رود. سرعت ماکزیمم هنگامیکه زاویه پیش روی 3 پله تنظیم شده در حدود 25 KHz است. مفاهیم مهندسی مورد آخر در بخش ۷.۲.۵ بررسی خواهد شد.

۷.۲.۴ تعریف زوایای پیش برای عملکرد دوفاز در تحریک

بحث زاویه پیش تاکنون روی درایو تکفاز متمرکز بود. زوایای پیش را می‌توان برای روش دوفاز در تحریک هم تعریف کرد. شکل ۷.۹(a) منحنیهای گشتاور استاتیک را بعنوان توابعی از جابجایی (= موقعیت زاویه‌ای)، با تقریب موجهای سینوسی، هنگامیکه دوفاز از سه‌فاز تحریک شده‌اند، نشان می‌دهد. برخی موقعیت‌های تعادل در همان شکل نشان داده شده‌اند. هنگامیکه روتور به یک موقعیت تعادل، با $Ph1$ و $Ph2$ تحریک شده، می‌رسد، $Ph1$ خاموش و $Ph3$ روشن می‌شود، این عمل درایو زاویه پیش تک‌پله می‌باشد. منحنی گشتاور استاتیک در شکل ۷.۹(b) در حالت زاویه پیش $1/5$ پله است.



شکل ۷.۹. تعریف زاویه پیش در تحریک دوفاز در موتور سه فاز.

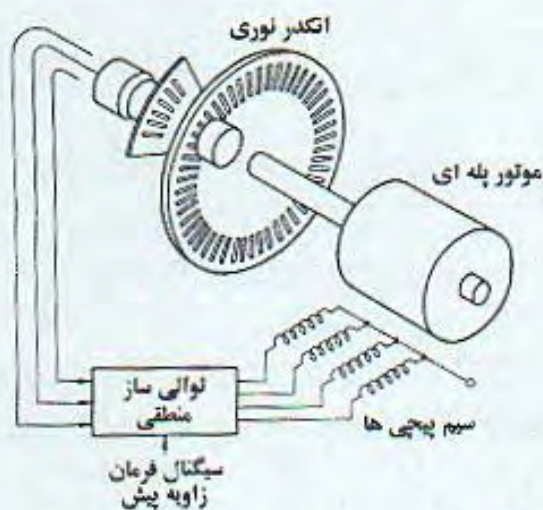
۷.۲.۵ ترکیب تحریک تکفاز و دوفاز

در اکثر موارد عملی عملکرد حلقه - بسته، یک انگدر نوری یا نوع دیگری از سنسور موقعیت به روتور تزویج شده تا موقعیت روتور را تشخیص دهد. اگر تعداد پالس‌های خروجی انگدر بر دور بسیار بیشتر از پله بر دور نباشد، تغییر پیوسته زاویه پیش مشکل می‌شود. در بسیاری از کاربردها، زوایای پیش ممکن محدود هستند. برای مثال، اگر تفکیک^۱ انگدر ۲۰۰ پالس بر دور باشد و تعداد پله بر دورهای ممکن یک موتور پله‌ای هم ۲۰۰ باشد، مجموعه ممکن از زوایای پله‌ها ۰، ۱، ۲، ۳ و پله خواهد بود. انتخاب ممکن دیگر مجموعه ۰/۵، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ پله می‌باشد. اینکه کدام زاویه از مجموعه اول یا دوم انجام می‌شود به تزویج روتور / انگدر، و به انتخاب درایو تکفاز یا دوفاز بستگی دارد. اگر هر دو عملکرد تکفاز و دوفاز مورد استفاده قرار گیرند، به‌رحال، سیستم می‌تواند از هشت زاویه پیش مختلف استفاده کند.

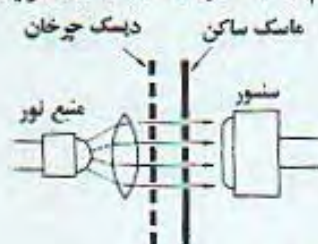
این ایده توسط Fredriksen در مقاله‌ای^[۳] در سال ۱۹۶۷ مطرح شد. انگدر موقعیت نشان داده شده در این مقاله مجموعه‌ای از یک دیسک مات با ۵۰ سوراخ کوچک با فاصله ۷/۲° و چهار جفت ترانزیستور نوری^۲ / منابع نوری می‌باشد. امروزه، انگدرهای نوری مکانیکی بطور گسترده به این منظور بکار برده می‌شوند. بحث در مورد زاویه پیش در روش ترکیبی عملکرد یکفاز در تحریک و دوفاز در تحریک در اینجا با استفاده از یک انگدر نوری سه کاناله با تفکیک ۲۰۰ پله بر دور انجام می‌گیرد. شکل ۷.۱۰ مدلی از یک انگدر نوری که بطور مستقیم به محور تزویج شده را نشان می‌دهد، که برای سادگی تنها یک کانال نشان داده شده است.

1- resolution

2- photo - transistor



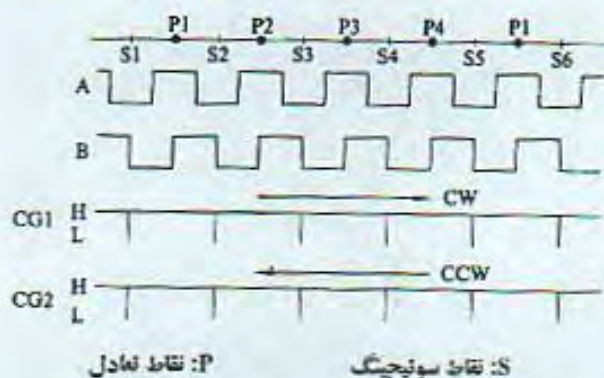
شکل ۷.۱۰. ترکیب مکانیزم فیدبک موقعیت با استفاده از یک انکدر نوری.



شکل ۷.۱۱. اساس انکدر نوری.

اساس انکدر نوری در شکل ۷.۱۱ نشان داده شده است. این انکدر از یک منبع نوری، یک سنسور، یک دیسک چرخان، و یک ماسک ساکن^۱ ساخته شده است. دیسک قسمت‌های مات و شفاف متوالی دارد. با چرخش دیسک با موتور، ماسک رد می‌شود و متناوباً جلوی نور را می‌گیرد. سیگنال خروجی سنسور طوری شکل می‌یابد تا بتوان یک سیگنال دیجیتال مناسب باشد.

یکی از روابط ممکن بین سیگنال خروجی انکدر و موقعیت‌های تعادل روش تحریک تک‌فاز در شکل ۷.۱۲ نشان داده شده است. انکدر طوری به موتور تزویج شده است که موقعیت‌های تعادل در مرکز بازه‌های سطح H- در خروجی کانال A- واقع می‌شوند. کانال A- برای تشخیص جهت چرخش بکار می‌رود. سیگنال B-، که در مقایسه با سیگنال کانال A- ۹۰° درجه شبیهت^۲ داده شده است، برای تولید پالس‌های ساعتی بکار می‌رود که به عنوان سیگنال‌های سونجینگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اینجا دو مولد ساعت، CG1 و CG2، بکار رفته‌اند. CG1 هرگاه که سیگنال کانال B- در بازه سطح H- ای از سیگنال کانال A- کاهش می‌یابد یک پالس ساعت منطقی منفی را



شکل ۷.۱۲. رابطه بین سیگنالهای خروجی آنکدر و موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک

می‌فرستد. CG2 پالسی را در ظهور سیگنال کانال B- در بازه سطح بالای از سیگنال کانال A- می‌فرستد. به عبارت دیگر، CG1 به هنگام حرکت ساعتگرد (CW) پالس‌های ساعت تولید می‌کند در حالیکه CG2 هنگامیکه حرکت در جهت عکس ساعتگرد (CCW) می‌باشد کار می‌کند. موقعیت‌های روتور که در آنها پالس‌های ساعت تولید می‌شوند در اینجا به عنوان نقاط سوئیچینگ^۱ خوانده می‌شوند.

رابطه‌ای بین زوایای پیش ممکن، موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک، و فازهایی که باید تحریک شوند در جدول ۷.۱ برای هر دو جهت آورده شده است. بعنوان مثال، سطر زاویه پیش ۱/۵ پله را دنبال می‌کنیم. هنگامیکه روتور از نقطه سوئیچینگ S2 می‌گذرد، Ph2 خاموش و Ph3 روشن می‌شود. فاصله S2 تا موقعیت تعادل بعدی به ازای Ph3 تحریک شده برابر ۱/۵ پله می‌باشد. اگر Ph4 در S2 روشن شود، زاویه پیش ۲/۵ پله است، که در سطر ششم قرار دارد. از اینرو تحریک تکفاز شامل زوایای پیش ۰/۵، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ پله می‌شود. زاویه پیش ۳/۵ پله ممکن است بعنوان زاویه پیش ۰/۵- در نظر گرفته شود. اگر Ph2 و Ph3 در S2 و در جهت CW همانطور که در سطر سوم آمده روشن شوند، زاویه پیش ۱ پله می‌باشد، زیرا موقعیت تعادل بعدی که Ph2 و Ph3 بطور مساوی تحریک می‌شوند در نقطه سوئیچینگ S3 می‌باشد که ۱ پله از S2 فاصله دارد. تحریک دوفاز شامل زوایای پیش ۰، ۱، ۲، و ۳ می‌شود.

در جدول ۷.۱ نقاط سوئیچینگ در موقعیت‌های تعادل دوفاز در تحریک قرار دارند. اگر آنکدر طوری تزویج شده باشد که نقاط سوئیچینگ در موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک واقع شوند، رابطه بین زوایای پیش و فازهای تحریک شونده مطابق جدول ۷.۲ می‌باشد.

1- switching points

رابطه بین زوایای پیش و فازهای تحریک شونده مطابق جدول ۷.۲ می‌باشد.

جدول ۷.۱. رابطه زوایای پیش، موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک، و فازهای تحریک شونده در یک موتور چهارفاز با این ترتیب که سوئیچینگ در موقعیت‌های تعادل دوفاز در تحریک انجام می‌شود.

CW Lead angle	S1 S2 S3 S4 S5 S6						CW
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	
0	4, 1	1, 2	2, 3	3, 4	4, 1	#1	Stop, CW
0.5	1	2	3	4	1	#2	
1.0	1, 2	2, 3	3, 4	4, 1	1, 2	#3	Revs, CW
1.5	2	3	4	1	2	#4	
2.0	2, 3	3, 4	4, 1	1, 2	2, 3	#5	Accel, CW
2.5	3	4	1	2	3	#6	
3.0	3, 4	4, 1	1, 2	2, 3	3, 4	#7	Decel, CW
3.5 (= -0.5)	4	1	2	3	4	#8	

CCW lead angle	S1 S2 S3 S4 S5 S6						CCW
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	
0	1, 2	2, 3	3, 4	4, 1	1, 2	#1	Stop, CCW
0.5	1	2	3	4	1	#2	
1.0	4, 1	1, 2	2, 3	3, 4	4, 1	#3	Revs, CCW
1.5	4	1	2	3	4	#4	
2.0	3, 4	4, 1	1, 2	2, 3	3, 4	#5	Accel, CCW
2.5	3	4	1	2	3	#6	
3.0	2, 3	3, 4	4, 1	1, 2	2, 3	#7	Decel, CCW
3.5 (= -0.5)	2	3	4	1	2	#8	

توجه (۱) P1, P2, P3 و P4 موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک هستند.

(۲) S1, S2... نقاط سوئیچینگ در این آرایش می‌باشند.

#1: ترمز مؤثر: تعویض جهت را تضمین نمی‌کند

#2: ترمز ضعیف: مورد استفاده در تعیین موقعیت نهایی

#3: برای حرکت مناسب نیست

#4: راه اندازی خوب، چرخش کند

#5: راه اندازی / افزایش سرعت خوب

#6: موتور راه اندازی نمی‌کند، مانع چرخش بالایی فراهم می‌کند

#7: موتور در جهت مخالف راه اندازی می‌کند، بیشترین چرخش را در جهت نرمال ایجاد می‌کند

۷.۲.۶ زاویه پیش راه اندازی و زاویه پیش حرکت

هنگامیکه سیستمی طوری طراحی شده است تا روتور را در یک نقطه میانی بین دو نقطه سوئیچینگ متوالی قرار دهد، زاویه پیش در توقف یا راه اندازی به اندازه ۰/۵ پله از زاویه پیش حرکت کمتر است. این امر، بطور مثال در جدول ۷.۱، اگر تعیین موقعیت نهایی در روش یکفاز در تحریک انجام شود، رخ می‌دهد. بمنظور قرار دادن روتور در P1، تنها باید Ph1 تحریک شود، و به همین ترتیب، Ph2 برای

جهت CW و CWW متناظر می‌باشند. هنگامیکه موتور در این حالت توقف می‌کند، زاویه پیش برابر ۰/۵ پله است. اختلاف ۰/۵ پله در روش‌های دیگر هم مشاهده می‌شود. فرض کنید موتور در ابتدا در P1 قرار گرفته و Ph1 تحریک شده است. سپس موتور در جهت CW در حالت مطابق با سطر پنجم، با فرض زاویه پیش حرکت ۲/۵ پله، راه‌اندازی می‌شود. فازهایی که هم اکنون تحریک شده‌اند عبارتند از Ph2 و Ph3، و موقعیت تعادل در این تحریک موقعیت S3 می‌باشد که ۱/۵ پله از P1 فاصله دارد. زاویه پیش راه‌اندازی از این‌رو به اندازه ۰/۵ پله از ۲ پله کمتر است.

اختلاف زوایای پیش بین راه‌اندازی و حرکت این مزیت را دارد که یک موتور چهارفاز می‌تواند در جهت دلخواه در حالت زاویه پیش ۲ پله راه‌اندازی شود. اگر زاویه پیش هم روی حالت نرمال ۲ پله در راه‌اندازی تنظیم شود، جهت چرخش معلوم نیست.

جدول ۷.۲. رابطه بین زوایای پیش، موقعیت‌های تعادل، و فازهای تحریک شونده در یک موتور چهارفاز به این ترتیب که سوییچینگ در موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

CW lead angle	S200		S1		S2		S3		S4		CW
	P4	P ₄₁	P1	P ₁₂	P2	P ₂₃	P3	P ₃₄	P4		
0		4		1		2		3			
0.5		4, 1		1, 2		2, 3		3, 4			
1.0		1		2		3		4			
1.5		1, 2		2, 3		3, 4		4, 1			
2.0		2		3		4		1			
2.5		2, 3		3, 4		4, 1		1, 2			
3.0		3		4		1		2			
3.5 (= -0.5)		3, 4		4, 1		1, 2		2, 3			

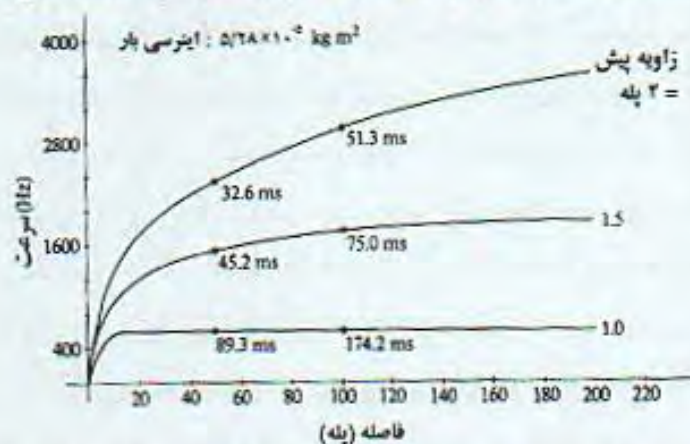
CCW lead angle	S200		S1		S2		S3		S4		CCW
	P4	P ₄₁	P1	P ₁₂	P2	P ₂₃	P3	P ₃₄	P4		
0		1		2		3		4			
0.5		4, 1		1, 2		2, 3		3, 4			
1.0		4		1		2		3			
1.5		3, 4		4, 1		1, 2		2, 3			
2.0		3		4		1		2			
2.5		2, 3		3, 4		4, 1		1, 2			
3.0		2		3		4		1			
3.5 (= -0.5)		1, 2		2, 3		3, 4		4, 1			

توجه (۱) P1، P2، P3، P4 موقعیت‌های تعادل یکفاز در تحریک هستند.

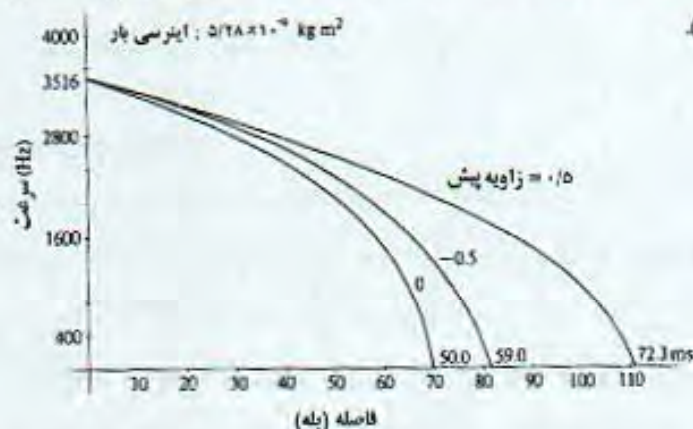
(۲) P₄₁، P₃₄، P₂₃، P₁₂ موقعیت‌های تعادل دوفاز در تحریک می‌باشند.

(۳) S1، S2... نقاط سوییچینگ در این آرایش می‌باشند، که از نقاط سوییچینگ در جدول ۷.۱ متفاوت می‌باشند.

(۳) S1, S2 نقاط سوئیچینگ در این آرایش می‌باشند، که از نقاط سوئیچینگ در جدول ۷.۱ متفاوت می‌باشند.



شکل ۷.۱۳. نمودارهای سرعت بر تعداد پله‌ها بر اساس جدول ۷.۱، با زوایای پیش ۰، ۱/۵، و ۲ پله (برای افزایش



شکل ۷.۱۴. نمودارهای سرعت بر تعداد پله‌ها بر اساس جدول ۷.۱، با زوایای پیش ۰/۵، ۰، و ۰/۵ پله (برای کاهش سرعت).

۷.۲.۷ زوایای پیش برای افزایش و کاهش سرعت

هنگامیکه یک موتور پله‌ای باید افزایش سرعت یابد، زاویه پیش بایستی بزرگتر از ۱ پله باشد. شکل ۷.۱۳ چند نمونه از مشخصه‌های سرعت بر فاصله را به ازای سه زاویه پیش مختلف ۰، ۱/۵، و ۲ پله نشان می‌دهد. این مشخصه‌ها منحنی‌های اندازه‌گیری شده روی ترکیب مشابه موتور / درایور بکار رفته در بدست آوردن مشخصه‌های سرعت چرخش ماکزیمم در شکل ۷.۸ می‌باشند. واضح است که زاویه پیش ۱ پله موتور را با کارایی کمتری افزایش سرعت می‌دهد، در حالیکه زاویه پیش ۲ پله افزایش سرعت خوبی فراهم می‌کند. اگر بعد از اینکه موتور با زاویه پیش ۲ پله به سرعت معینی افزایش پیدا کرد زاویه پیش به مقدار بزرگتری تغییر کند، افزایش سرعت کارتر خواهد بود.

برای کاهش سرعت موتور، زاویه پیش باید روی صفر یا مقدار کوچک مثبت یا منفی تنظیم شود.

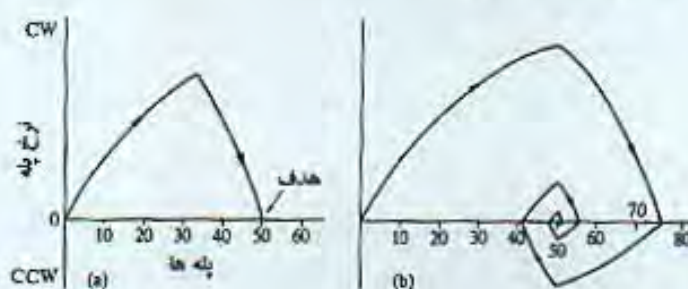
شکل ۷.۱۴ نمودارهای سرعت بر تعداد پله‌ها را با زوایای پیش ۰/۵، ۰ و ۰/۵ پله نشان می‌دهد.

۷.۳ سیستم با عملکرد حلقه - بسته با استفاده از یک ریزپردازنده

در مقاله ^[3] Freriksen که قبلاً اشاره شد، کاربرد یک کامپیوتر کوچک یا بزرگ برای کنترل حلقه - بسته موتورهای پله‌ای پیشنهاد می‌شود. بعلا اینک امروزه، ریزپردازنده‌ها با کمترین هزینه در دسترس می‌باشند، بکارگیری یک ریزپردازنده در کنترل موتورهای پله‌ای یک مسئله جالب مهندسی می‌باشد. این بخش یک سیستم حلقه - بسته با کنترل ریزپردازنده‌ای طراحی شده توسط Kenjo و همکارانش [4] برای درایو یک موتور پله‌ای هیبرید چهارفاز $1/8^{\circ}$ را بررسی می‌کند. ریزپردازنده بکار رفته از نوع 8080A می‌باشد. انتخاب زوایای پیش و ترتیب نقاط سوئیچینگ بر اساس جدول ۷.۱ می‌باشند. آشکارساز موقعیت بکار رفته یک انکدر نوری سه کاناله می‌باشد. دو کانال، A و B، برای همان منظوری که در بخش ۷.۲.۵ توصیف شد بکار می‌روند. سومین کانال، R، یک پالس بر دور تولید می‌کند، و برای تشخیص موقعیت مرجع بکار می‌رود.

۷.۳.۱ هدف از ریزپردازنده

شکل ۷.۱۵ دو منحنی از نمودارهای سرعت بر فاصله تحت کنترل حلقه - بسته یک موتور پله‌ای را نشان می‌دهد. منحنی (a) الگویی بسیار خوب است که در آن موتور با زاویه پیش مناسبی راه‌اندازی می‌شود، با زاویه پیش دیگر افزایش سرعت یافته، و در بهترین زمانبندی شروع به کاهش سرعت می‌کند که در آن سرعت سریعتر کاهش یافته و در موقعیت هدف صفر می‌شود. برای راه‌اندازی و افزایش سرعت موتور، زاویه پیش بزرگتر از یک پله بکار می‌رود، در حالیکه زاویه پیش صفر یا منفی برای کاهش سرعت بکار برده می‌شود. در منحنی (b)، که یک منحنی نامناسب می‌باشد، کاهش سرعت به هنگام تشخیص موقعیت هدف آغاز می‌شود. اما موتور در یک لحظه نمی‌تواند متوقف شود و بعلا اینرسی فرار خواهد کرد. برای قرار دادن روتور در موقعیت صحیح، موتور با تنظیم زاویه پیش روی یک مقدار مناسب به حرکت به سمت عقب مجبور می‌شود. مکان هندسی سرعت بر فاصله همانطور که در شکل نشان داده شده ممکن است نوسانی باشد.



شکل ۷.۱۵. دو منحنی از نمودارهای سرعت بر فاصله. (a) منحنی بسیار خوب؛ (b) منحنی نامناسب.



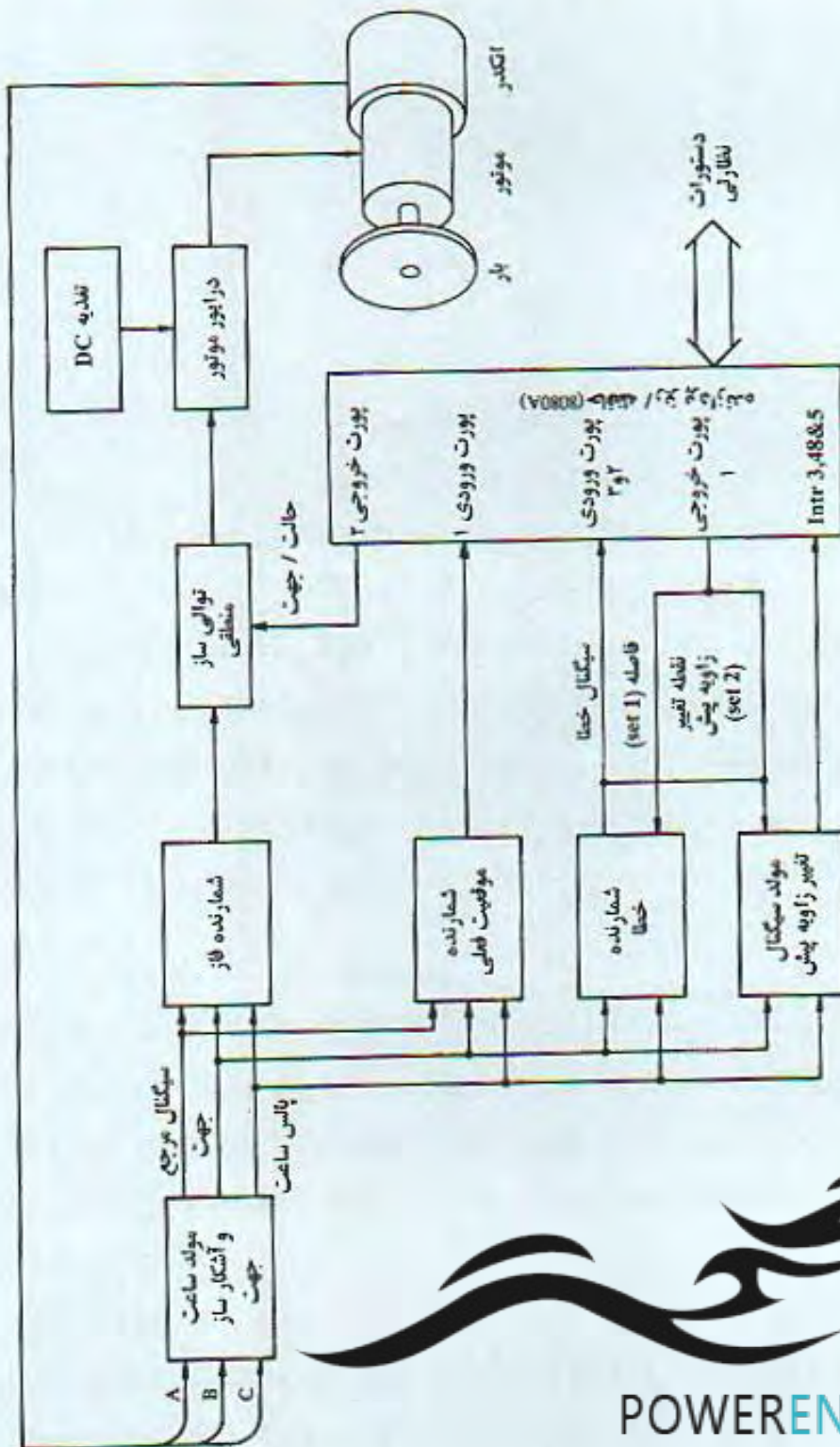
شکل ۷.۱۶. طرح کلی سیستم.

در اینجا یک سیستم ریزپردازنده برای پیدا کردن بهترین زمانبندی برای تغییر زوایای پیش در رسیدن به حرکت نوع (a)، با شروع از الگوی (b)، بکار می‌رود. شکل ۷.۱۶ طرح کلی سیستم را نشان می‌دهد، که دارای یک توالی ساز منطقی مخصوص خارج از ریزپردازنده می‌باشد. یک سیگنال موقعیت یخ یک بلوک سخت افزاری فیدبک می‌شود که حرکت روتور را تحت نظر دارد و اطلاعات را با ریزپردازنده مبادله می‌کند. نرم افزار باید طوری برنامه ریزی شود تا ریزپردازنده زمانبندی‌های بهتری را برای تغییر زوایای پیش، بر اساس تجربه قبلی و داده موقعیت / سرعت جاری، تعیین کند. ریزپردازنده بالاخره، بعد از چند عمل، زمانبندی‌های بهینه برای هر حرکت انجام شده را تعیین خواهد کرد.

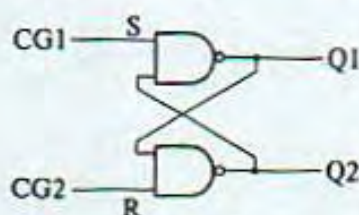
۷.۳.۲ جزئیات سیستم و سخت افزار

سیستم کنترل در بلوک دیاگرامی در شکل ۷.۱۷ نشان داده شده است. هنگامیکه دستوری، بطور مثال برای چاپ یک کاراکتر یا برای قرار گرفتن در نقطه‌ای مشخص، توسط یک کامپیوتر ناظر یا سیستم دیگری داده می‌شود، ریزپردازنده فاصله تا هدف و جهت چرخش را محاسبه می‌کند. ریزپردازنده در تعیین زمانبندی برای تنظیم زوایای پیش مناسب هم با بررسی موارد اطلاعات زیر بکار گرفته می‌شود:

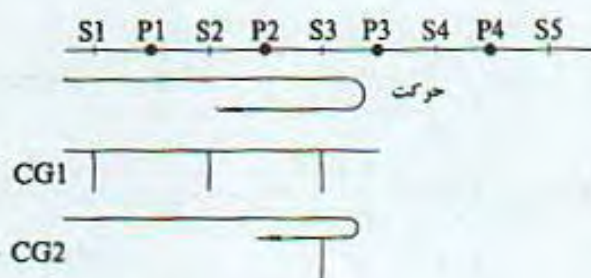
- (i) موقعیت فعلی؛
- (ii) خطاهای پله از هدف؛
- (iii) سیگنالی که نشان می‌دهد روتور از نقطه‌ای نیم پله مانده به موقعیت هدف عبور کرده است؛
- (iv) سیگنالی که نشان می‌دهد حرکت عکس شده است؛
- (v) سرعت. (این مورد در مثال تشریح شده بکار گرفته نشده است.)



شکل ۷.۱۷. بلوک دیانگرام سخت افزار سیستم.

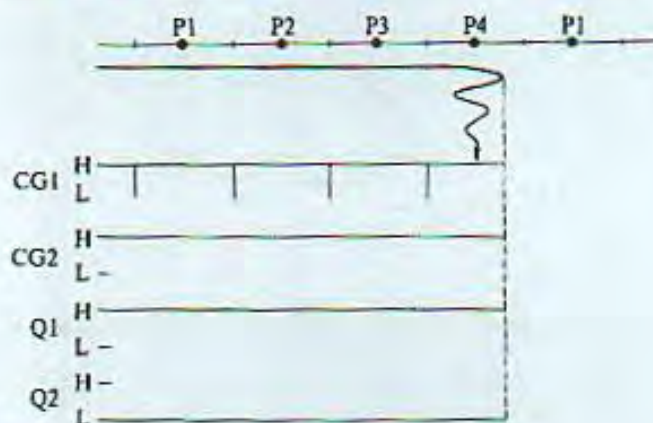


شکل ۷.۱۸. فلیپ فلاب set-reset بکار رفته در یک تشخیص دهنده جهت.



شکل ۷.۱۹. معکوس شدن جهت حرکت و پالس های ساعت.

(۱) مولد ساعت / آشکارساز جهت. این بلوک سیگنال سه کاناله را از انکدر موقعیت دریافت می کند، و پالس های ساعت برای بکار انداختن سخت افزار خارج از ویزپردازنده تولید می کند. رابطه بین سیگنالهای انکدر و زمانبندی های پالس در بخش ۷.۲.۵ یا استفاده از شکل ۷.۱۲ تشریح شده اند. یک آشکارساز جهت که یک فلیپ فلاب set-reset می باشد در شکل ۷.۱۸ نشان داده شده و در این بلوک بکار رفته است. سیگنال های ساعت از CG1، که به هنگام ساعتگرد بودن جهت فرستاده می شوند، به ترمینال \bar{S} داده می شوند، به ترمینال \bar{R} داده می شوند. اگر پالس ساعتی از CG1 حالت Q1 و Q2 را تغییر نمی دهند. در وضعیت نشان داده شده در شکل ۷.۱۹، جایی که موتور تا نزدیکی موقعیت تعادل P3 در جهت CW پیش رفته است و در آستانه تغییر جهت است، ترمینال Q1 فلیپ فلاب تا وقتی که موتور از نقطه سوئیچینگ S3 در جهت CCW عبور نکند در سطح H- باقی می ماند. هنگامیکه موتور از نقطه S3 می گذرد، پالس ساعتی توسط CG2 تولید می شود تا حالت های خروجی به $Q1=L$ و $Q2=H$ تغییر کند. این امکان وجود دارد که موتور در حوالی یک موقعیت تعادل همانطور که در شکل ۷.۲۰ نشان داده شده نوسان کند. اما آشکارساز جهت تا هنگام عبور از نقاط سوئیچینگ تغییر نمی کند.



شکل ۷.۲۰. نوسان اندک در حوالی یک موقعیت تعادل حالت آشکارساز جهت را تغییر نمی‌دهد.

(۲) شمارنده فاز. این بلوک چهار ناحیه P1, P2, P3, یا P4 را که موتور از آنها می‌گذرد یا در آنها توقف می‌کند را مشخص می‌کند.

(۳) توالی ساز منطقی. این بلوک فازهای تحریک شونده را معین می‌کند، دستورات زاویه پیش و جهت را از ریزپردازنده دریافت می‌کند، و به اطلاعات شمارنده فاز رجوع می‌کند. این قاعده در جدول ۷.۱ آورده شده است. ویژگیهای هر حالت زاویه پیش در زیرنویس جدول خلاصه شده‌اند.

(۴) حالت توقف زاویه پیش و تعیین موقعیت نهایی. زاویه پیش توسط سخت‌افزار هنگامیکه موتور در ناحیه هدف، که به فاصله یک پله به مرکزیت هدف می‌باشد، قرار دارد روی ۰/۵ پله یا حالت توقف تنظیم می‌شود، اگر سرعت موتور هنگامیکه موتور به ناحیه هدف وارد شده به اندازه کافی کم باشد، کاهش سرعت یافته و ناگهان در نقطه تعادل هدف متوقف می‌شود. از اینرو، در این سیستم تعیین موقعیت نهایی توسط تحریک تک‌فاز انجام می‌گیرد. اگر موتور از ناحیه هدف عبور کند و موفق به توقف نشود، زاویه پیش توسط نرم‌افزار تنظیم می‌شود. همانطور که اشاره خواهد شد، زاویه پیش هم قبل از ورود به ناحیه هدف توسط نرم‌افزار تنظیم می‌شود.

(۵) درایو موتور. مدار قدرت برای درایو موتور می‌تواند هر یک از انواع بررسی شده در بخش ۴.۳ باشد.

(۶) شمارنده موقعیت فعلی. این شمارنده برای ثبت موقعیت فعلی می‌باشد. هنگامیکه موقعیت مرجع به هنگام چرخش در جهت CW تشخیص داده می‌شود، شمارنده با صفر reset می‌شود و هر وقت که پالس ساعتی از CG1 دریافت می‌کند یک شماره بالا می‌رود. هنگامیکه موقعیت مرجع در طول چرخش CCW تشخیص داده می‌شود، شمارنده روی ۲۰۰ تنظیم می‌شود تا شمارش بعدی ۱۹۹ باشد، شمارنده در جهت CCW پایین شمار است.

(۷) شمارنده خطا. این بلوک فاصله بین موقعیت فعلی و موقعیت هدف را می‌شمارد، و این مورد از اطلاعات را به پورت‌های ورودی ۲ و ۳ ریزپردازنده می‌فرستد. موقعیت هدف توسط ریزپردازنده هدایت می‌شود.

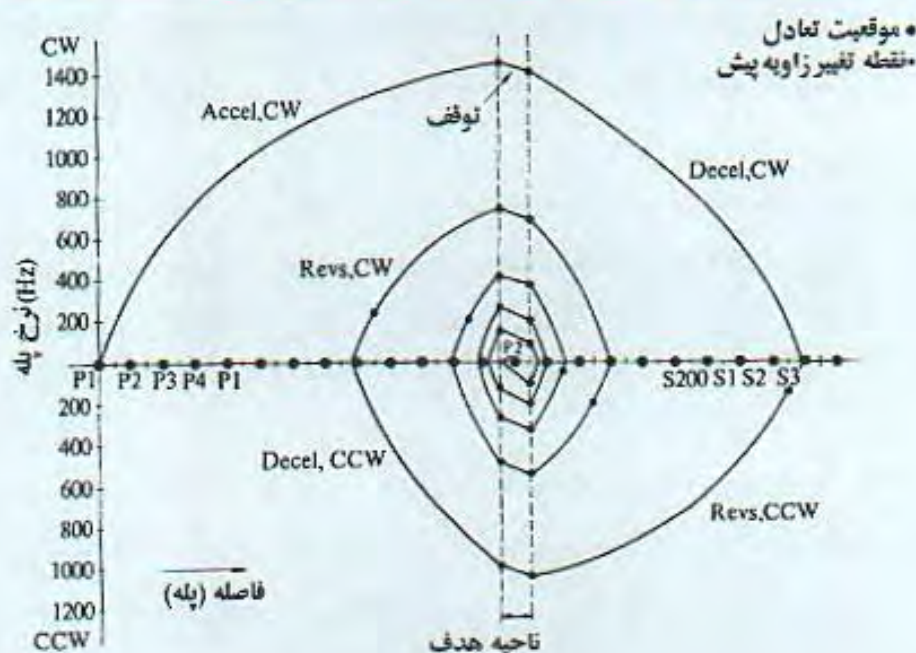
(۸) مولد پالس تغییر زاویه پیش. موقعیتی که در آن زاویه پیش باید از یک مقدار به مقدار دیگری تغییر کند از ریزپردازنده به این بلوک فرستاده می‌شود. هنگامیکه به این موقعیت می‌رسد، سیگنالی تولید و بعنوان سیگنال وقفه^۱ به ریزپردازنده فرستاده می‌شود.

۷.۳.۳ نرم‌افزار

ایده‌های بسیاری برای نرم‌افزار وجود دارد. بعنوان یک مثال ساده در مقایسه، در اینجا برنامه‌ای برای درآپو کردن یک گردونه کاراکتر در یک کلمه پرداز^۲ آورده شده است. فلوچارت در شکل ۷.۲۱ نشان داده شده و جزئیات آن به این ترتیب می‌باشند.



شکل ۷.۲۱. فلوچارت برنامه.

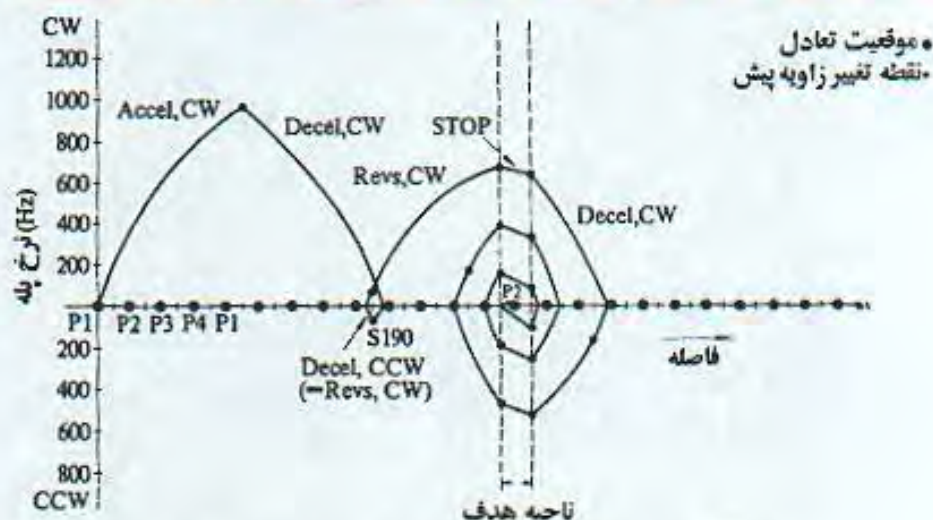


شکل ۷.۲۲. نمودارهای سرعت بر فاصله برای حرکت ۱۳ - پله‌ای در اولین اجرا.

(۱) تنظیم اولیه. در ابتدا، موتور در حالت حلقه - باز معمولی کار می‌کند تا یک دور، یا کمی بیشتر، در جهت CW درایو شود. هدف از این کار reset کردن شمارنده موقعیت فعلی می‌باشد؛ هنگامیکه سیگنال مرجع، که در هر دور ایجاد می‌شود، می‌آید، شمارنده صفر می‌شود.

(۲) حرکت با پیش آموزش^۱. در این فرایند، هر نوع حرکتی که ممکن است در مراحل کار فرمان داده شود، قبل از اینکه زمانبندی‌های تغییر زاویه پیش برای حصول به الگوهای سرعت بهینه به ازای بار معلوم توسط سیستم فراگرفته شود، چندین مرتبه بمنظور آموزش سیستم ریزپردازنده اجرا می‌شود. چون کاربرد فعلی برای درایو یک گردونه ۲۰۰ - کاراکتری می‌باشد، حرکات از یک تا صد پله در دو جهت بمنظور حصول زمانبندی‌های بهینه در تغییر زوایای پیش فرمان داده می‌شوند. عدد دویست برای توزیع پیرامون یک گردونه با ممان اینرسی کم واقعا^۲ عدد بزرگی است. در یک ماشین واقعی با ۱۲۸ یا ۱۳۲ کاراکتر، یک گردونه دیزی^۲ دویل بکار برده می‌شد. برای داشتن نرم‌افزاری ساده، در اینجا فرض می‌شود که گردونه سطر واحد است.

روش آموزش در شکل‌های ۷.۲۲ تا ۷.۲۴ نشان داده شده است، که همگی حرکات ۱۳ - پله در جهت CW را نشان می‌دهند. فاصله با تعداد پله‌ها تا هدف جدید از پورت خروجی 01 به شمارنده



شکل ۷.۲۳. نمودارهای سرعت بر فاصله برای حرکت ۱۳ - پله‌ای.

خطا فرستاده می‌شود. سپس حالت (Accel, CW) از زاویه پیش و جهت از پورت خروجی 02 به توالی ساز منطقی داده می‌شود تا موتور را راه‌اندازی کند. از اینرو موتور با زاویه پیش ۲ پله تا وقتی که به نزدیکترین نقطه سوییچینگ به نقطه تعادل هدف برسد افزایش سرعت می‌یابد. هنگامیکه موتور در ناحیه هدف می‌باشد زاویه پیش بطور خودکار توسط نرم‌افزار روی حالت توقف تنظیم می‌شود. موتور شروع به کاهش سرعت می‌کند. اگر موتور از ناحیه هدف جلوتر برود و از نقطه سوییچینگ بعدی عبور کند، یک سیگنال قطع پیشروی توسط مولد LACS (سیگنال تغییر زاویه پیش)^۱ فرستاده می‌شود. با دریافت این سیگنال، ریزپردازنده فرمان تغییر زاویه پیش به حالت (Decel, CW) یا حالت ۰/۵ - پله را برای کاهش موثر سرعت حرکت توسط گشتاور CCW (ناشی از این حالت زاویه پیش) صادر می‌کند. موتور نهایتاً متوقف شده و شروع به حرکت در جهت عکس می‌کند. هنگامیکه موتور از نقطه سوییچینگ S3 در حال حرکت در جهت عکس عبور می‌کند، یک سیگنال قطع تغییر جهت توسط مولد LACS فرستاده می‌شود. با دریافت این سیگنال، ریزپردازنده تعداد پله‌های جهش شده را پیدا می‌کند، که در شکل ۷.۲۲ هشت عدد می‌باشند. توجه کنید که حالت زاویه پیش بعد از تغییر جهت حرکت بطور خودکار (Revs, CCW) یا ۱/۵ - پله در جهت CCW می‌شود. این مطلب را می‌توان به در جهت CCW می‌شود. این مطلب را می‌توان با استفاده از جدول ۷.۱ بترتیب زیر درک کرد: فرض کنید موقعیت موتور، بطور مثال، هنگامیکه موتور در حالت (Decel, CW) درایو می‌شود در ناحیه P3 باشد. فازی که اکنون باید تحریک شود همانطور که در بخش CW در جدول مشخص شده فاز ۲ می‌باشد. از طرف دیگر، در بخش CCW همان جدول، این عدد '۲'، در ستون P3، در سطر

1- Lead Angle Change Signal



شکل ۷.۲۴. نمودارهای سرعت بر فاصله بهینه برای حرکت ۱۳ - پله‌ای

(Revs , CCW) برای زاویه پیش ۱/۵ پله مشاهده می‌شود. از اینرو، موتور بعد از تعویض جهت حرکت، با زاویه پیش ۱/۵ پله افزایش سرعت پیدا خواهد کرد.

هنگامیکه موتور دوباره وارد ناحیه هدف می‌شود، زاویه پیش روی حالت توقف تنظیم می‌شود تا موتور را در موقعیت تعادل هدف قرار دهد. اما این بار بعلمت اینرسی بار یک توقف سریع ممکن نیست و اگر از ناحیه هدف باز هم پیش روی شود، سیگنال قطع پیشروی دیگری برای تغییر زاویه پیش به حالت (Decel , CCW) فرستاده می‌شود تا دوباره سرعت کاهش یافته و جهت حرکت عوض شود. بعد از بازیابی حرکت CW، زاویه پیش بطور خودکار به حالت (Revs , CW) تغییر می‌کند. افزایش سرعت تا ناحیه هدف باز هم بعلمت زاویه پیش کوچکتر ۱/۵ پله مناسب نیست. زاویه پیش در ناحیه هدف توسط سخت‌افزار روی صفر تنظیم می‌شود. از روی شکل دیده می‌شود که یک سیکل نوسان یا بیشتر قبل از تعیین موقعیت نهایی در هدف انجام خواهد شد.

هنگامیکه دوباره دستور یکسانی، برای حرکت ۱۳ پله در جهت CW، داده می‌شود، کاهش سرعت در نقطه سوئیچینگ هشت پله مانده به ناحیه هدف آغاز می‌شود. در این حالت، سرعت قبل از رسیدن به هدف نشان داده شده در شکل ۷.۲۳ صفر خواهد شد. هنگامیکه از نقطه سوئیچینگ S190 رد می‌شود، یک سیگنال قطع تغییر جهت فرستاده می‌شود و تعداد پله‌هایی که باید تکمیل شوند توسط شمارنده خطا شمارش می‌شود (چهار عدد در این شکل). این مورد بعنوان یک جهش متغی ۴ پله‌ای در نظر گرفته می‌شود. حافظه جهش حال به $4-4=8$ تصحیح می‌شود. باز هم در شکل ۷.۲۳، زاویه پیش یا مقدار حالت (Decel , CCW)، برابر با حالت (Revs , CW)، در سیگنال قطع برابر می‌شود تا حرکت CW را بازیابی کند.

ما تکرار چندین باره این فرایند، زمانبندی بهینه برای تغییر زاویه پیش برای حصول به منحنی نشان داده شده در شکل ۷.۲۴ بدست می‌آید.

(۳) آیا داده چاپ موجود است؟ بعد از اینکه ۲۰۰ نوع حرکت فرا گرفته شد، سیستم آماده است در مراحل کار عملی بکار گرفته شود. اگر ریزپردازنده داده‌هایی برای چاپ دریافت کند، آنها در حافظه RAM ذخیره می‌شوند.

(۴) محاسبه تعداد پله‌ها و جهت. فاصله بین موقعیت فعلی و هدف محاسبه می‌شود، و نتیجه به شمارنده خطا فرستاده می‌شود. موقعیتی که در آن زاویه پیش باید از accel به decel تغییر کند هم به مولد LACS فرستاده می‌شود.

(۵) برنامه اصلی. حالت accel زاویه پیش و جهت تنظیم می‌شود و از پورت خروجی ۲ به گیت فرستاده می‌شود تا موتور راه‌اندازی شود. انتظار می‌رود که هر حرکتی در کوتاهترین زمان انجام شود. بهر حال، اگر تغییری در شرایط بار رخ دهد، جهش مثبت یا منفی روی خواهد داد، و زمانبندی تغییرات در زاویه پیش همواره تصحیح می‌شوند.

۷.۴ سرو موتور درایو مستقیم^۱

هنگامیکه یک موتور پله‌ای در روش حلقه - بسته بکار گرفته می‌شود، می‌توان آنرا بعنوان یک سرو موتور در نظر گرفت. بهر حال، سعی در استفاده از یک موتور پله‌ای معمولی در این روش، بطور مثال به روشی که در مرجع [۵] تشریح شده، بعلا بازدهی نسبتاً کم در مقایسه با یک سرو موتور بدون جاروبک با آهنربای دائمی معمولی موفقیت‌آمیز نیست.

یک نمونه موفقیت‌آمیز، موتور هیبرید بزرگ طراحی شده برای درایو مستقیم جسمى با استفاده از گشتاوری بزرگ می‌باشد. آهنرباهای کمیاب در زمین درون هسته استاتور قرار داده شده‌اند، و روتور شامل فولاد سیلیکون متورق با ۱۲۴ تا ۲۰۰ دندان می‌شود. این موتور اساساً یک موتور گشتاور - بالا سرعت - پایین می‌باشد؛ بزرگترین موتور ساخته شده توسط Yokogawa Precision Corporation گشتاور ماکزیمم ۴۰۰ Nm با سرعت ماکزیمم ۰/۸ r.p.s. از خود نشان می‌دهد. یک نوع کوچک با گشتاور ماکزیمم ۱۵ Nm از خود سرعت ماکزیمم ۲/۴ r.p.s. را نشان می‌دهد. در ساختار قطب / سیم‌پیچی‌ها از یک ترکیب سه‌فاز برای کاهش ریبیل‌های گشتاور ناشی از آثار گیره استفاده می‌شود؛ سیم‌پیچی‌ها بصورت ستاره متصل شده‌اند و جریان هر فاز نسبت به موقعیت روتور کنترل می‌شود. این مدلاز یک نوع تجزیه‌گر^۲ بعنوان سنسور موقعیت استفاده می‌کند، که از اثر الکترومغناطیسی بین کلاف‌ها و مدار مغناطیسی بهره می‌برد. برتری‌های تجزیه‌گر قدرت مکانیکی و عدم حساسیت به دما می‌باشند. دقت موقعیتی در سنسور بین $\pm 3^\circ$ و $\pm 9^\circ$ می‌باشد. برای دقت‌های بالاتر $\pm 15^\circ$ ، از ابزارهای اپتوالکترونیکی^۳ بعنوان سنسور موقعیت استفاده می‌شود. سنسور نوری

1- direct - drive servomotor

2- resolver

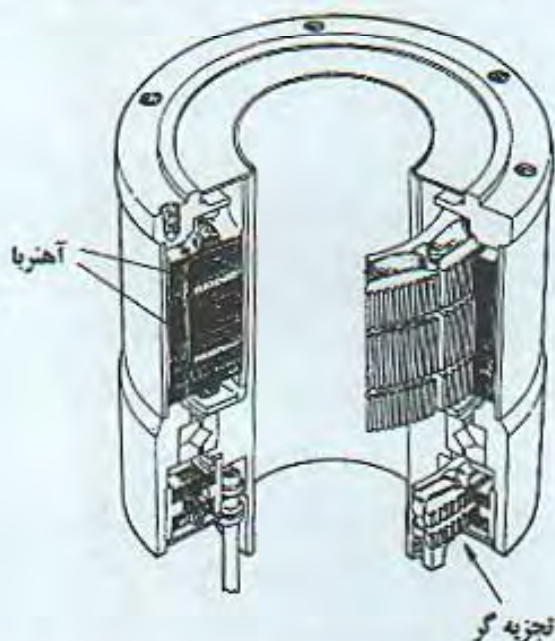
3- optoelectronic

دارای چند مشکل می‌باشد؛ با هر فشاری شکسته می‌شود، بعلت تاریکی ناخواسته ناشی از آب و هوا عمل نمی‌کند، و در دمای بالا اعمال الکترونیکی نامطمئن می‌شوند.

در کنترل حلقه - بسته موتور حلقه فیدبک سرعت نیز مانند فیدبک موقعیت ضروری می‌باشد، و اطلاعات سرعت برای این منظور معمولاً از اطلاعات سیگنال موقعیت محاسبه می‌شود.

یک مشکل فنی این نوع موتور تشدید مکانیکی است که می‌تواند بعلت اثر محور و بار روی دهد. راه مقابله با این مشکل ساختار بازویی بسیار سخت متصل به محور می‌باشد. مشکل بزرگ دیگر در این واقعیت دیده می‌شود که در کاربردهایی نظیر روبات اسکالا^۱، اینرسی بار در حین کار در محدوده‌ای از ۱ تا ۱۰۰ برابر تغییر می‌کند. (توجه کنید که برای موتوری که باری را از طریق یک دنده کاهش سرعت درایو می‌کند، تغییر اینرسی بار تأثیر کمتری روی محور موتور می‌گذارد). برای عملکرد پایدار سیستم کنترل با چنان تغییرات زیاد اینرسی بار، تخمین اینرسی و تنظیم پارامترهای سیستم ضروری می‌باشند. چنین مشکلاتی در مرجع [6] مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

کاربرد این موتور پله‌ای خاص شامل کاربردهای گسترده‌ای می‌شود؛ برای مثال، روبات‌های اسکالا در خطوط مونتاژ، میزهای راهنما که گاهی با یک میز X-Y مطابق شکل (b) ۸.۱۲ ترکیب شده‌اند، کاغذرسان^۲، کنترل رادار، نصاب تراشه^۳، پولک‌بر^۴، ماشین‌های چاپ، و ماشین اندازه‌گیری سه بعدی.



شکل ۷.۲۵. سروموتور درایو مستقیم با استفاده از ساختار موتور پله‌ای هیبرید سه‌فاز.

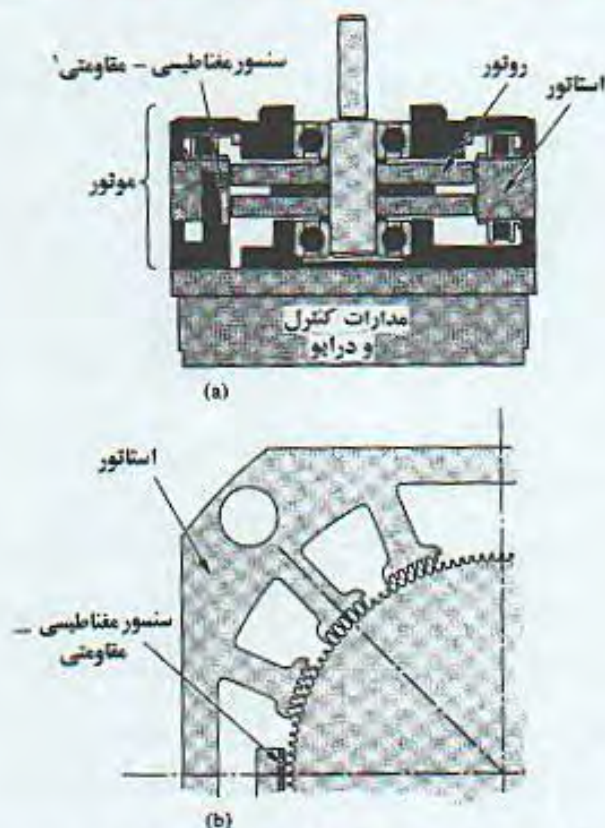
1- scala

2- roll feeder

3- chip mounter

4- wafer cutter

POWEREN



شکل ۷.۲۶. موتور هیبرید سه فاز طراحی شده برای کنترل موقعیت حلقه - بسته هد مغناطیسی در یک درایو دیسک سخت

۷.۵ ساخت مدارهای مجتمع برای عملکرد حلقه - بسته

Amaratunga و همکارانش^[۱] در سال ۱۹۸۹ طراحی مدارهای مجتمع برای عملکرد حلقه - بسته یک موتور پله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. دو سال قبل از آن، پیشرفت‌های زیادی^[۸] (در ژاپن) در طراحی موتوری ویژه و ICهایی بمنظور تعیین موقعیت هد مغناطیسی در یک درایو دیسک سخت گزارش شده بود، که بعدها توسط Matsushita Electric Industries ساخته شد. موتور، که از نوع هیبرید سه فاز با ۱۲ قطب روی استاتور و ۱۳۶ دندانه روی روتور می‌باشد و در شکل ۷.۲۶ نشان داده شده است، برای اینکار ساخته شده بود. زاویه پله آن برابر $15/34^\circ$ می‌باشد. یک سنسور مغناطیسی - مقاومتی^۱ برای تشخیص موقعیت روتور به موتور اضافه شده است. سه مدار مجتمع برای کنترل و درایو ساخته، و برای نصب روی صفحه فلزی موتور طراحی شده بودند. IC اول برای کنترل و دومی بای تنظیم زوایای پیش بر حسب سرعت و سومی برای طبقه قدرت می‌باشد. تکنیک ریزپله در

1- magneto - resistive sensor

این طرح برای دستیابی به تفکیک بالا مورد استفاده قرار گرفته بود. گزارش شده است که زمان دستیابی متوسط^۱ ۲۵ms و زمان نشست ۵ms بدست آمد. بهرحال باید متذکر شد که حتی در کنترل حلقه - باز مرسوم با تنظیم دقیق فواصل پالس عملکرد مشابهی حاصل می‌شود. برای رسیدن به زمان دستیابی سریع مطلوب موتورهای پله‌ای در کاربردهای سرعت بالا با موتورهای با کلاف متحرک جایگزین شده‌اند.

۷.۶ درایو رلوکتانس سوئیچ شده^۲

گفته می‌شود که عملکرد حلقه - بسته یک موتور با رلوکتانس متغیر نوع اقتصادی‌تری از سرو موتورها فراهم می‌آورد، که امکان جایگزینی با موتورهای القایی در کاربردهای صنعتی را دارد، و این نوع به نام^۳ موتور رلوکتانس سوئیچ شده^۴ شناخته می‌شود. مطالعه زوایای پیش روی یک موتور VR توسط چندین مولف گزارش شده است. [99]، [100] مطالعات روی موتور رلوکتانس سوئیچ شده هم بخوبی توسط Miller گردآوری شده‌اند. [111] یک مثال کاربردی هم برای یک سرو موتور درایو مستقیم ارائه شده است. [112] بزرگترین مشکل در مورد درایو رلوکتانس سوئیچ شده سطح نویز صوتی بالای ناشی از ریبیل‌های گشتاور بزرگ می‌باشد.

۷.۷ استفاده از شکل موجهای جریان بعنوان سنسور موقعیت

کنترل حلقه - بسته، اساساً، به برخی از انواع انکدر که موقعیت‌های مکانیکی را به سیگنالهای الکتریکی تبدیل می‌کند نیاز دارد. انکدرهای بکار رفته برای این منظور، همانطور که قبلاً دیده شد، از نوع نوری، الکترومغناطیسی، و مغناطیسی - مقاومتی می‌باشند. چنین قطعاتی عناصری هستند که سیستم را بر هزینه می‌کنند. بجای استفاده از یک انکدر نصب شده بر روی موتور، امکان تشخیص موقعیت جریان روتور با شکل موجهای ولتاژ یا جریان وجود دارد، همانگونه که بطور گسترده در مکانیزم کموتاسیون^۳ موتورهای DC بدون جاروبک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات بسیار زیادی در این مورد انجام شده است. Kuo^[113] روش‌های مختلف تشخیص جریان را مورد بررسی قرار داد و تئوری برای کنترل حلقه - بسته موتور VR با استفاده از تشخیص جریان پیشنهاد کرد. Kidd, Langley^[114] در سال ۱۹۷۹ روشی برای یک موتور هیبرید خطی ارائه کردند. در سال ۱۹۸۵، Acarnely و همکارانش^[115] روشی قابل استفاده در یک درایو برشگر را ارائه کردند.

1- average access time

2- switched reluctance motor

3- commutation

مراجع فصل ۷

- [1] Shimotani, K. and Kataoka, T. (1973). Characteristics of stepping motor driven by position feedback pulses (in Japanese). *Trans. Japanese Institute of Electrical Engineers* 93B, (8), 347-54.
- [2] Kenjo, T. and Niimura, Y. (1979). *Fundamentals and applications of stepping motors*. (In Japanese.) p. 208. Sogo Electronics Publishing Co., Ltd., Tokyo.
- [3] Fredriksen, T. R. (1968). Applications of the closed loop stepping motor. *IEEE Trans. Automatic Control* AC13, (5), 464-74.
- [4] Kenjo, T., Takahashi, H., and Takahara, T. (1980). Microprocessor controlled self-optimization drive of a step motor. *Proc. Ninth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Incremental Motion Control Systems Society, Champaign, Illinois, pp. 115-24.
- [5] Kenjo, T., Takahashi, H., Marushima, K., and Cheang-Wee, K. S. (1985). Brushless DC drives of a hybrid stepping motor for low-cost applications, *Proc. Drives/motors/controls publication* 85, pp. 183-7. Peter Peregrinus, London.
- [6] Ono Y. (1992). A direct-drive motor control system and its features. *Advanced Robotics* 6, (2), 243-53.
- [7] Amaratunga, G., Kwan, K., Tso, M., and Crawley, D. (1989). A single-chip CMOS IC for closed-loop control of step motors. *IEEE Trans. Industrial Electronics* 36, (4), 539-44.
- [8] Tamae, H., Fukuda, Y., Ashizaki, Y., Suzuki, Y., and Yamashita, S. (1987). Rotary servo actuator (In Japanese.) *National Technical Report* 32, (5), 594-602.
- [9] Shimotani, K. and Kataoka, T. (1976). Improvement of the performance of a closed loop stepping motor by excitation methods. (In Japanese.) *Trans. Japanese Institute of Electrical Engineers* 96B, (6), 299-306.
- [10] Acarnley, P. P. and Gibbons, P. (1982). Closed-loop control of stepping motors: prediction and realisation of optimum switching angle. *Proc. IEE* 129, PtB, (4), 211-16.
- [11] Miller, T. J. E. (1993). *Switched reluctance motors and their controls*. Oxford University Press.
- [12] Welburn, R. (1984). Ultra high torque motor system for direct drive robotics. In *Proc. Motor-con '84*, pp. 17-24. Intertech Communications, Ventura, CA.
- [13] Kuo, B. C. (1979). Incremental motion control—step motors and control systems, p. 256. SRL Publishing Co., Champaign, Illinois.
- [14] Langley, L. W. and Kidd, H. K. (1979). Closed-loop operation of a linear stepping motor under microprocessor control. *Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems*, University of Leeds, pp. 32-6.
- [15] Acarnley, P. P., Hill, R. J., and Hooper, C. W. (1985). Detection of rotor position in stepping and switched motors by monitoring of current waveforms. *IEEE Trans. Industrial Electronics* 32, (3), 215-22.

کاربرد موتورهای پله‌ای



برخی از نمونه‌های کاربرد موتور پله‌ای در بخشهای مختلف فصول قبل آمده بود. کاربرد موتورهای پله‌ای با کنترل عددی ماشین‌های تولید آغاز شد و بعدها به لوازم جانبی کامپیوتر و تجهیزات اداری انتقال یافت، و موتورهای DC یا DC بدون جاروبک^۱ جایگزین موتورهای پله‌ای در ماشین‌های NC شدند. در این فصل کاربردهای مختلف موتورهای پله‌ای بررسی خواهد شد.

۸.۱ لوازم جانبی کامپیوتر

این زمینه بعنوان حوزه اصلی کاربردهای موتور پله‌ای منظور می‌شود. انواع بسیاری از لوازم جانبی کامپیوتر وجود دارد. ازدیاد کامپیوترهای رومیزی و قابل حمل در دهه ۱۹۸۰ توسعه موتورهای کوچک برای استفاده در دیسک گردان‌ها و چاپگرها را برانگیخت. چند وسیله مهم که از موتورهای پله‌ای بهره می‌برند را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۸.۱.۱ چاپگرها

چندین نوع از چاپگرها که در آنها موتورهای پله‌ای به منظورهای مختلفی بکار رفته وجود دارند. دیگر انواع موتور هم در آنها بکار رفته‌اند؛ بطور مثال، موتورهای DC بدون جاروبک برای اسکنرهای چند گوشه^۲ در چاپگرهای لیزری. بهرحال، این چاپگرها از موتورهای پله‌ای برای کاغذرسان، چرخش استوانه حساس به نور، و بخش تکان دهنده^۳ تونر استفاده می‌کنند. شکل ۸.۱ ساختار و اساس کاربردهای موتور در چاپگر سریال نوع ضربه - کاراکتر^۴ را نشان می‌دهد. یک گردونه کاراکتر نمونه در شکل ۲.۷ نشان داده شده بود. انواع قلم‌ها^۵ و تعداد کاراکترها محدود می‌باشند و سطح نویز در این نوع چاپگرها بالاست. چاپگرهای جوهرافشان^۶ در سالهای اخیر ترجیح داده شده‌اند (شکل ۸.۲ ساختار اساسی آن را نشان می‌دهد). چاپگرهای جوهرافشان سرعت بالای چاپ و نویز کم از خود نشان می‌دهند، و قادر به چاپ انواع قلم‌ها می‌باشند. هزاران کاراکتر چینی و ژاپنی قابل چاپ هستند، با اینکه کیفیت چاپ تا حدی از چاپگرهای لیزری کمتر است. موتورهای پله‌ای در انتقال هد و مکانیزم کاغذرسانی در چاپگرهای حباب افشان^۷ مورد استفاده قرار می‌گیرند، حرکت موتور توسط یک ردیف دنده به محور صفحه‌ای^۷ منتقل می‌شود (شکل ۸.۳).

1- brushless

3- character- impact

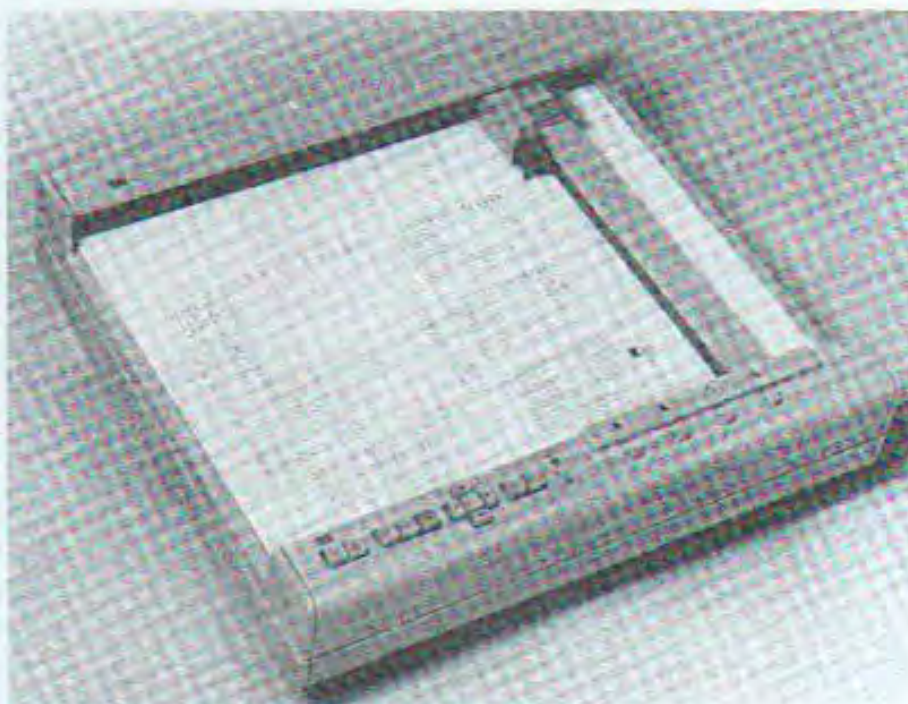
5- ink-jet

7- platen shaft

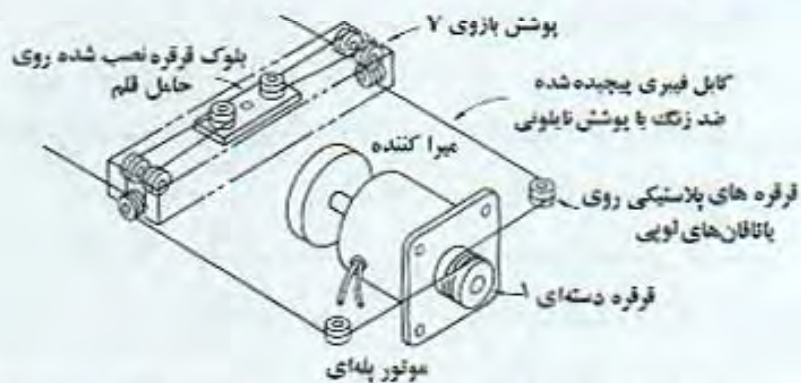
2- polygon

4- fonts

6- bubble-jet



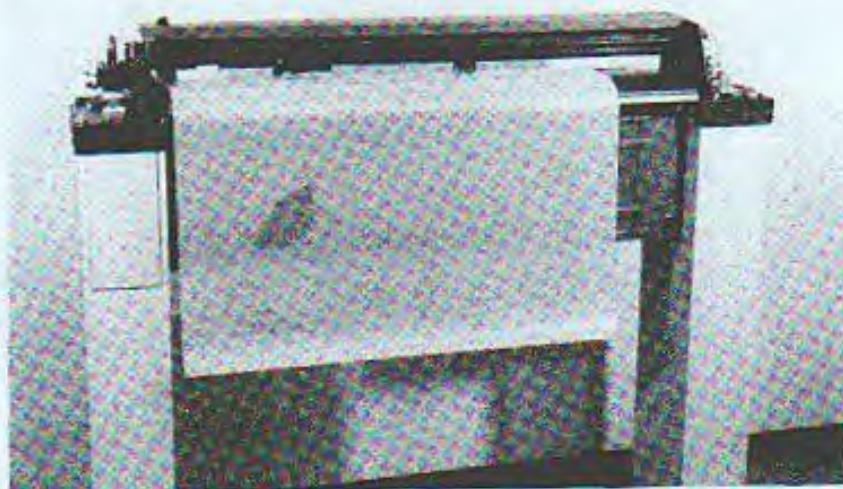
شکل ۸.۴ رسام گراف Hewlett Packard HP9872B



شکل ۸.۵ مکانیزم درایو یک رسام گراف با استفاده از دو موتور پله‌ای (مطابق مرجع [1]).

۸.۱.۲ رسام‌های گراف

شکل ۸.۴ یک رسام گراف فشرده، که به نام رسام X-Y هم خوانده می‌شود، ساخت اوایل دهه ۱۹۸۰، و شکل ۸.۵/۱ سیستم درایو قلم بکار رفته در این رسام برای یک محور را نشان می‌دهد. یک کابل فیبر فولاد ضدزنگ با پوشش نایلونی برای انتقال حرکت موتور پله‌ای به قلم مورد استفاده قرار



شکل ۸.۶ رسام گراف ورقه - A1

گرفته است. در این سیستم هیچ فعالیت مکانیکی وجود ندارد و سطح نويز در مقایسه با یک ردیف دنده اندک است. برای رسیدن به یک کیفیت خط خوب و وضوح بالا، درایو ریز-پله تشریح شده در بخش ۲.۴.۷ بکار برده می‌شود. [2]

شکل ۸.۶ رسامی را برای ورقه‌های کاغذ در اندازه A1 نشان می‌دهد. چنین ورقه‌های بزرگی برای نقشه‌های معماری، نقشه‌های ماسک^۱ برای مدارات مجتمع، و دیاگرام‌های مدار الکترونیکی مورد نیاز می‌باشند. یک دیاگرام شماتیک برای این رسام در شکل ۸.۷ نشان داده شده است. ورقه کاغذ در جهت Y (جلو یا عقب) توسط یک موتور پله‌ای درایو می‌شود، و قلم توسط موتور پله‌ای دیگری در جهت X درایو می‌شود. حرکت بالا - پایین قلم توسط یک محرک ساده‌تر انجام می‌شود. موتور پله‌ای سومی برای درایو مکانیزم جابجایی محفظه‌های جوهر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۸.۱.۳ تمایلات جدید به موتورهای پله‌ای خطی / سطحی

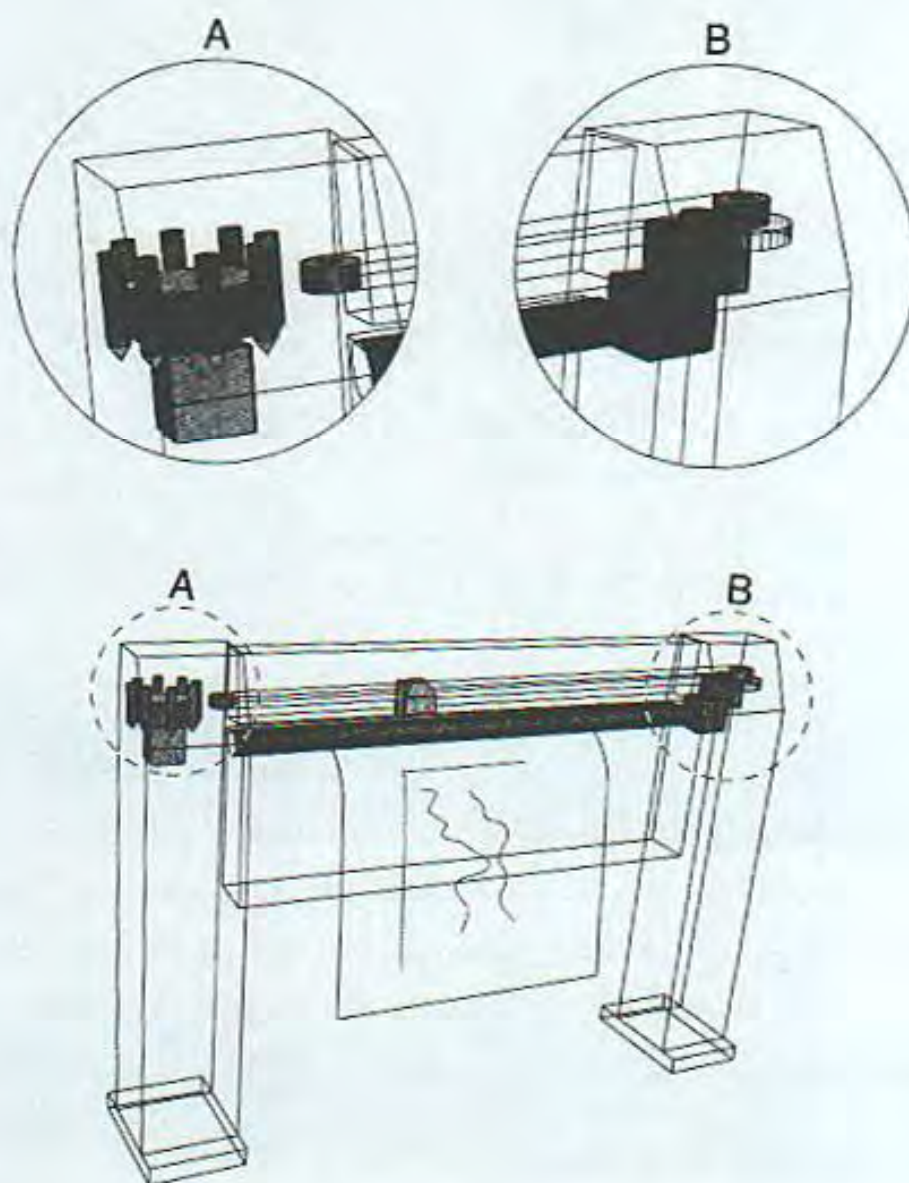
قبل از اینکه نوع عمودی ظهور کند، یک موتور سطحی^۲ (نشان داده شده در شکل ۲.۴۸) برای انتقال قلم طراحی بکار می‌رفت. این موتور (یا حرکت دهنده) از یک تکیه‌گاه ثابت معلق شده است، که سطح آن برای تشکیل دندانه‌های استاتور در هر دو جهت X و Y بشکل یک کلوچه^۳ علامت گذاری شده است. علامت گذاری‌ها با مواد غیرمغناطیسی پر شده تا سطحی هموار نمودار شود. موتور سطحی، که ۱/۵kg وزن دارد در جای خود توسط نیروی مغناطیسی نگهداشته شده است اما به هنگام تغییرات

1- mask patterns

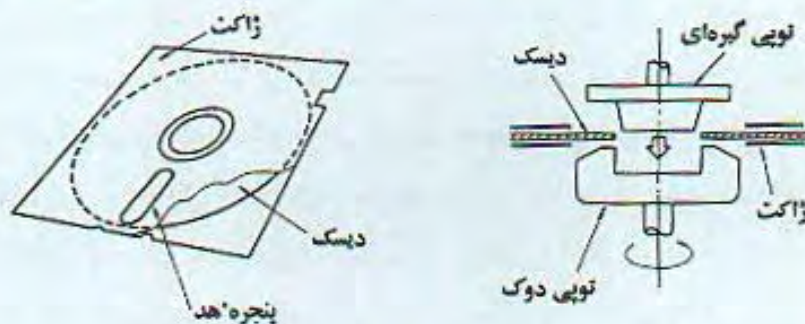
2- planar

3- waffle

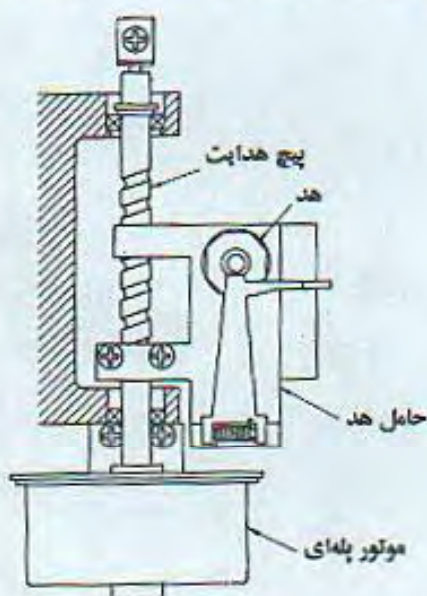
هنگام تغییرات موقعیت بعلت لایه نازک حدوداً $10\text{ }\mu\text{m}$ از هوای فشرده آزادانه حرکت می‌کند. موتورهای پله‌ای خطی زمینه چالشی برای مهندسين موتور در گذشته بوجود آورده بودند، ولی تاکنون تنها کاربرد محدودی داشته‌اند. برخی از آنها با موتورهای چرخان سطح، مانند رسام‌های گراف، جایگزین شدند. به این خاطر که موتورهای پله‌ای خطی بزرگ هستند، و فاصله‌های هوایی باریک بین استاتور و روتور به سختی بدست می‌آید. از نظر ساختاری، ایجاد یک ساختار محفوظ از هوا برای موتورهای خطی مشکل است، و این مشکل دیگری را نشان می‌دهد.



شکل ۸.۷. مکانیزم اساسی یک رسام گراف عمودی.



شکل ۱.۸ ساختار فلاپی دیسک و مکانیزم نصب.



شکل ۱.۹ مکانیزم درایو هد در یک درایو فلاپی دیسک.

۱.۱.۴ درایوهای دیسک سخت/فلاپی

درایوهای دیسک سخت^۱ و فلاپی دیسک^۲ بعنوان یک قطعه حافظه کمکی برای تمام انواع کامپیوتر، از قابل حمل^۳ تا مادر^۴، بکار می‌روند. فلاپی دیسک، به نام دیسک منعطف هم خوانده می‌شود، و دیسکی بالای میلار^۵ است، که هر دو طرف آن با ماده مغناطیسی پوشیده شده که روی آنها داده‌ها ذخیره می‌شوند. همانطور که در شکل ۸.۸ نشان داده شده، دیسک داخل یک پوشش یا محفظه پلاستیکی، روی واحد درایوی با سرعت ۵ یا ۶ دور بر ثانیه سوار می‌شود. هنگامیکه روی واحد درایو قرار گرفت،

1- hard disk
3- laptop
5- Mylar

2- floppy disk
4- mainframe

درایو قرار گرفت، تنها دیسک به تویی^۱ درایو تزویج شده است، در حالیکه پوشش یا محفظه بدون حرکت باقی می‌ماند. برای استقرار هد در یک درایو فلاپی دیسک یک موتور پله‌ای دندانه پنجه‌ای، همانطور که در طرح شکل ۸.۹ نشان داده شده، استفاده می‌شود.

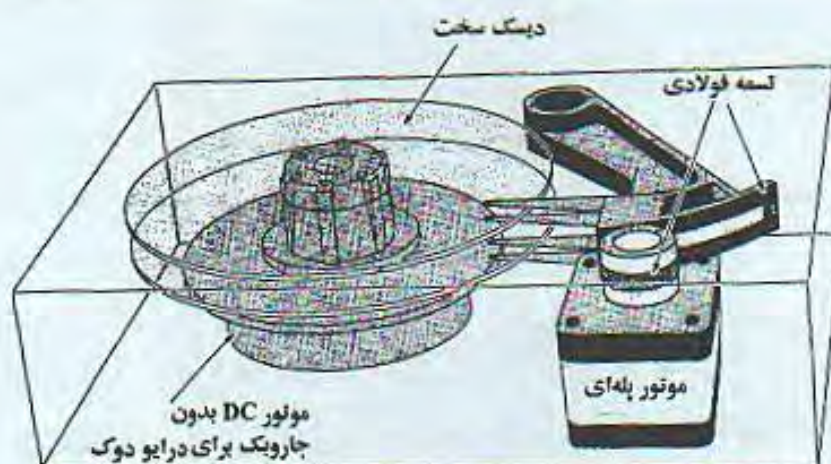
یک دیسک سخت، که دیسکی آلومینیومی یا شیشه‌ای پوشیده از ماده مغناطیسی می‌باشد، ظرفیت‌های ذخیره اطلاعات بیشتر و زمان دستیابی کوتاه‌تر از یک فلاپی دیسک را فراهم می‌کند. چگالی بیت می‌تواند به ۳۰۰۰۰ بیت در اینچ برسد، و در حدود ۷۰۰ سیلندر در یک دیسک ۳/۵ اینچی فراهم می‌شود. شکل ۸.۱۰ یک درایو دیسک سخت ۵/۵ اینچی را نشان می‌دهد. مکانیزم درایو - هد از یک موتور پله‌ای هیبرید همانند شکل ۸.۱۱ بهره می‌برد. در اینجا، چرخ نصب شده روی محور موتور به بازوی هد از طریق تسمه فولادی که بشکل آلفا انحناء یافته متصل است. در این ساختار، یک زاویه پله موتور، حرکتی در حدود ۴۰-۳۰ μm در هد مغناطیسی ایجاد می‌کند. مقدار حرکت موتور کمتر از یک دور است.

زمان جستجوی متوسط، که بعنوان زمان لازم برای حرکت از یک شیار به شیار دیگر تعریف می‌شود، برابر با ۱۹ms می‌باشد. این زمان با انتخاب دقیق فواصل پله برای افزایش و کاهش سرعت حاصل می‌شود. برای جستجوی سریع‌تر از یک موتور با کلاف متحرک استفاده می‌شود.

انواع مختلفی از موتورها برای درایو دوک^۲ دیسک بکار می‌روند، اما برای کامپیوترهای شخصی از یک موتور DC بدون جاروبک استفاده می‌شود (رجوع کنید به درایو شکل ۸.۱۱). برای طراحی فشرده‌تر موتور درون تویی قرار داده می‌شود.



شکل ۸.۱۰ درایو دیسک سخت.



شکل ۸.۱۱. مکانیزم انتقال حرکت موتور پله‌ای به هد مغناطیسی، و یک موتور DC بدون جاروبک گرداننده دوک نگهدارنده دیسک سخت.

۸.۲ کاربردها در کنترل عددی

قبلاً، ابزارهای ماشین با کنترل عددی زمینه کاربردی مهمی برای موتورهای پله‌ای بودند. امروزه، سروموتورها، که موتورهای DC و DC بدون جاروبک با کنترل فیدبکی می‌باشند، هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با اینکه یک سروموتور بدون جاروبک به کنترل موقعیت نقطه به نقطه بهتری در فاصله طولانی دست می‌یابد، مزیت یک موتور پله‌ای در کنترل حلقه - باز آن نهفته است.

(۱) میزهای X-Y و میزهای راهنما^۱. وسیله کنترل کننده موقعیت‌های X و Y روی یک صفحه با استفاده از دو موتور یک میز XY نامیده می‌شود. موتورهای پله‌ای همانطور که در شکل ۸.۱۲(a) نشان داده شده بکار می‌روند. ترکیبی از یک میز XY و یک میز راهنما در (b) دیده می‌شود. در اینجا، میز راهنما توسط درایو مستقیم حلقه-بسته یک موتور هیبرید سه فاز درایو می‌شود.

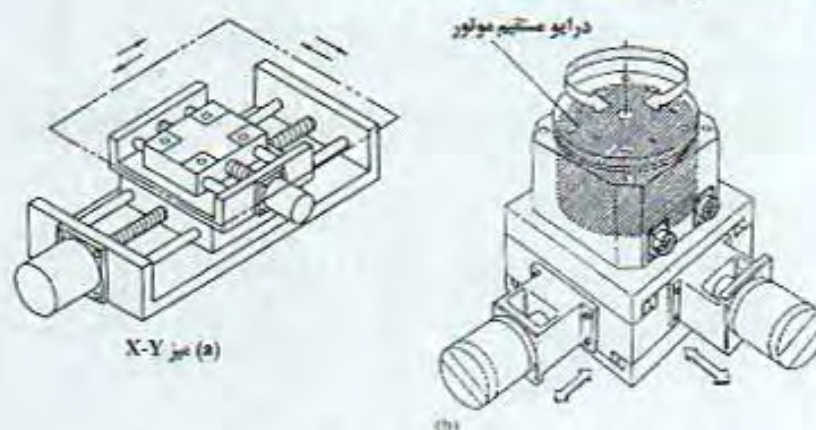
(۲) ماشین‌های فرزکاری^۲. حرکت سه محوری قطعه کار را می‌توان با سه موتور پله‌ای کنترل کرد. در شکل ۸.۱۳، سومین موتور کنترل کننده محور-Z زیر میز پنهان است. تیغه فرزکاری توسط یک موتور القایی درایو می‌شود.

(۳) ماشین‌های دوزندگی. موتورهای پله‌ای بطور گسترده در هر دو ماشین دوزندگی صنعتی و خانگی مورد استفاده می‌گیرند، که مزیت ویژگی‌های خاص موتور پله‌ای همچون گشتاور بالا، پاسخ سریع در فاصله‌ای کوتاه، و تعیین موقعیت دقیق با کنترل حلقه-باز ساده را در خود دارند و نمونه مطرح شده در اینجا یک ماشین قلابدوزی صنعتی است، که در آن دو موتور پله‌ای حرکت‌های X و Y

1- index tables

2- milling

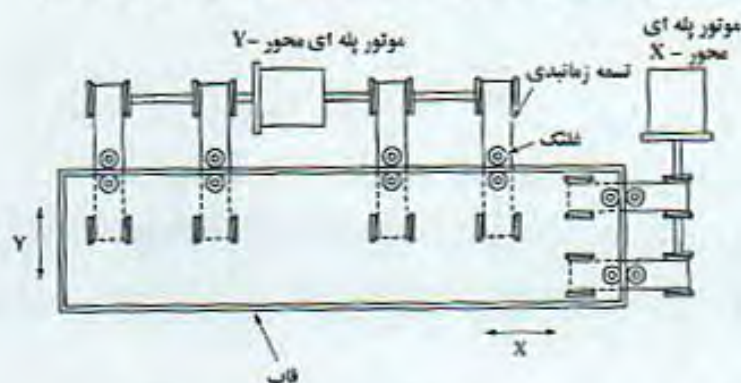
چارچوب نگهدارنده لباس را برای فلایدوزی کنترل می‌کنند. شکل ۸.۱۴ چگونگی کنترل چارچوب را نشان می‌دهد، و شکل ۸.۱۵ چند هد دوزندگی در حال کار را نشان می‌دهد. در این تصویر، هر هد ۱۲ سوزن، هر کدام با یک نخ رنگی متفاوت، به همراه دارد.



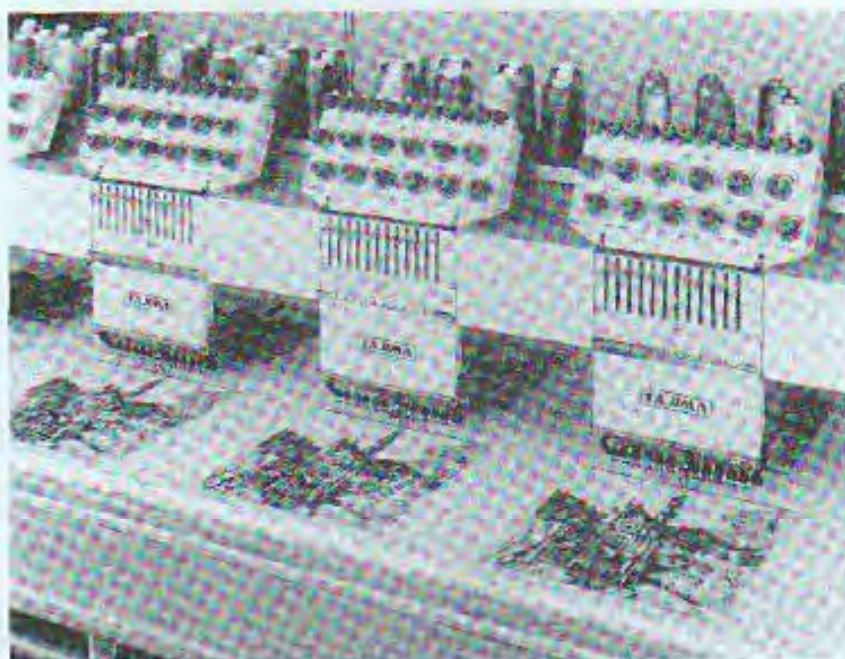
شکل ۸.۱۲ (a) میز XY با کنترل عددی و (b) میز راهنما.



شکل ۸.۱۳ اساس ماشین فرزکاری با کنترل عددی با استفاده از سه موتور پله‌ای.



شکل ۸.۱۴ درایو چارچوب در یک ماشین دوزندگی فلایدوزی خودکار.

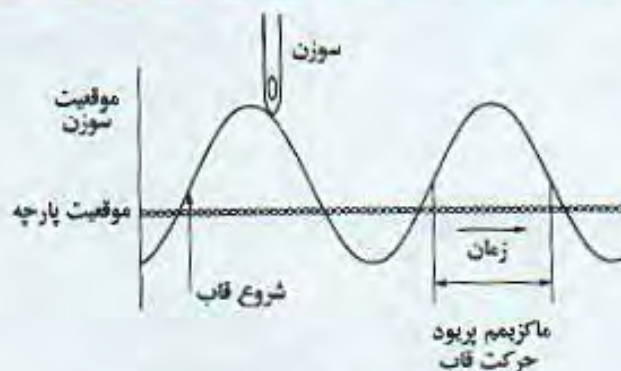


شکل ۸.۱۵ (a) ماشین قلابدوژی خودکار چندسر؛ (b) در حال کار.

محور اصلی توسط یک موتور القایی درایو می‌شود و سوزن‌ها، یانتوگراف‌ها^۱ (اهرم‌هایی برای تنظیم کشش نخ بالایی)، لفافه‌های پارچه، و هدایتگرهای حلقه ساز نخ^۲ را از طریق تزویج جریان‌های ادی و برخی تزویج‌های مکانیکی کنترل می‌کند. یک موتور قابل برگشت^۳، نوعی از موتور القایی با گشتاور راه‌اندازی بالا و کلید برگشت ساده با ویژگی راه‌اندازی / توقف سریع، برای انتخاب سوزن مناسب برای هر هد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتباط حرکتی بین محور اصلی و موتورهای پله‌ای در شکل ۸.۱۶ نشان داده شده است. در اینجا نوک سوزن نسبت به زمان بصورت سینوسی حرکت می‌کند؛ در حالیکه سوزن از پارچه بیرون کشیده می‌شود چارچوب درایو می‌شود.

1- pantographs
3- reversible

2- looper-thread guides



شکل ۸.۱۶ حرکت همزمان بین محور اصلی (موتور القایی) و حرکت چارچوب (دوموتور پله‌ای).

در این ماشین طول کوک، یعنی حرکت بدست آمده در یک سبکل، می‌تواند از $1/10$ تا $12/7 \text{ mm}$ با فواصل $1/1 \text{ mm}$ تغییر کند. محور اصلی دارای یک انگشت نوری است، که سیگنال خروجی آن بعنوان سیگنال همزمانی، و سیگنال کنترل سرعت اعمال شده به تزویج جریان ادی بکار می‌رود. ترتیب حرکت موتورهای پله‌ای و موتورهای قابل برگشت برای بوجود آوردن الگوهای رنگی مختلف در یک حافظه ذخیره می‌شود؛ گاهی اوقات تمام هدها بطور همزمان الگوی یکسانی بوجود می‌آورند؛ در مواقع دیگر برخی هدها الگوهای مختلفی بوجود می‌آورند تا طرح کلی پیچیده‌ای شکل گیرد. اندازه چارچوب می‌تواند به بزرگی $5 \text{ m} \times 7/10$ ، با جایگیری 30° هدها، باشد. برای حرکت دادن چنین چارچوب بزرگی با کنترل دقیق، موتورهای پله‌ای بایستی گشتاوری بیش از 10 Nm از خود نشان دهند، و در اینجا موتورهای پنج فاز بکار می‌روند.

۸.۳ کاربردها در ماشین‌های اداری^۱

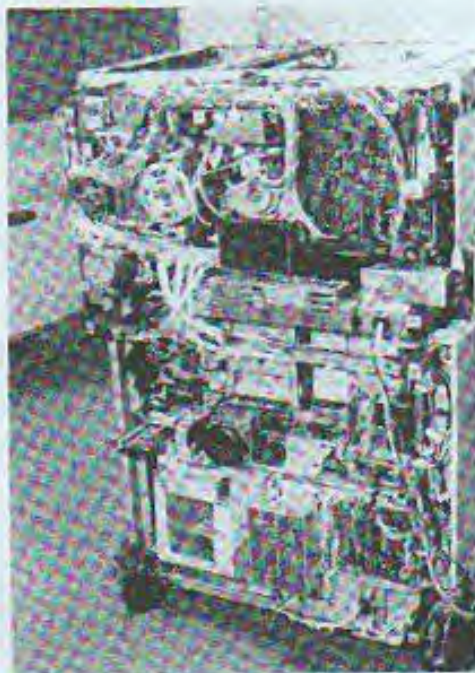
ماشین‌های بسیاری با استفاده از موتورهای پله‌ای را می‌توان در ادارات مشاهده کرد، به دو مثال نظر می‌افکنیم.

(۱) کپی‌کننده‌ها^۲، همانطور که در تصویر شکل ۸.۱۷ نشان داده شده، چندین موتور پله‌ای در یک کپی‌کننده صفحه مسطح بکار می‌روند. شکل ۸.۱۸ اعمال برخی از موتورها را نشان می‌دهد. در ماشین‌های بسیاری مکانیزم تولید کپی‌های بزرگ شده یا کوچک شده توسط حداقل دو موتور پله‌ای درایو می‌شوند؛ اغلب طرح ریز پله، که در بخش ۲.۴.۷ بررسی شد، برای بهبود وضوح محصول بکار گرفته می‌شود، با وجود اینکه کنترل افزایش / کاهش سرعت توسط ریزپردازنده انجام می‌شود. هنگامیکه نسبت بزرگ‌کنندگی یا کوچک‌کنندگی مشخص می‌شود، CCD (ابزار تزویج شارژ شده^۳ یا

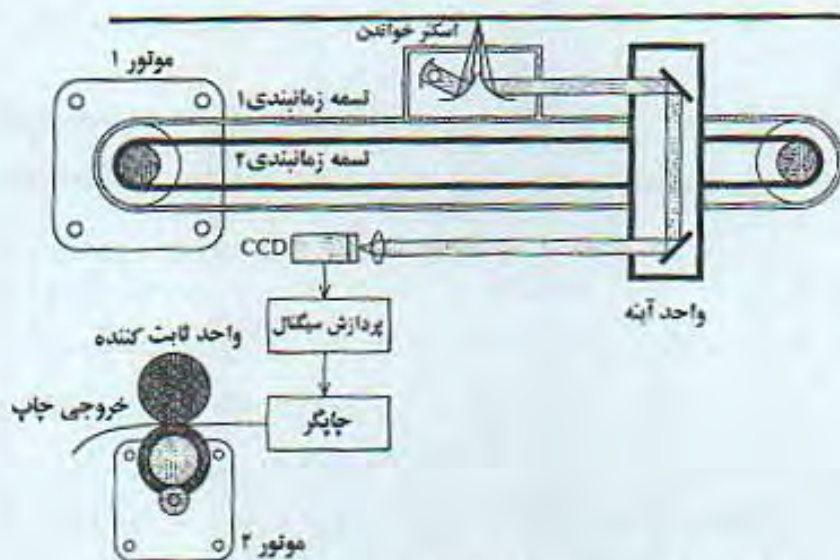
1- office machines
3- charged couple device

2- copiers

یا نوعی از سنسور نوری) به حرکت در می‌آید و توسط یک موتور پله‌ای در موقعیت مناسب قرار داده می‌شود. خواندن دستورات بعداً انجام می‌شود. در این مورد، سرعت خواندن اسکنر و واحد آینه^۱ توسط موتور پله‌ای دیگر (موتور ۱) و تسمه‌های زمانبندی، بسته به نسبت بزرگ / کوچک کنندگی، کنترل می‌شود.



شکل ۸.۱۷ تصویر موتورهای پله‌ای بکار رفته در یک کپی کننده صفحه مسطح



شکل ۸.۱۸ موتورهای پله‌ای در کپی کننده صفحه مسطح.



شکل ۸.۱۹. اساس یک ماشین فاکسی مایل.

همانطور که در شکل نشان داده شده است، سرعت خواندن هد بایستی دو برابر واحد آینه باشد تا فاصله مسیر نور حفظ شود. موتورهای دیگر برای آینه چندگوشه اسکتر لیزری، استوانه حساس به نور، غلتک ظهور^۱، واحد (ثبوت) چاپ، و غیره در سرعت‌های ثابت مربوط به آنها درایو می‌شوند. موتور مربوط به واحد ثبوت در شکل نشان داده شده است.

(۲) ماشین‌های فاکسی مایل (فاکس)^۲. اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ شاهد گسترش سریع ماشین فاکسی مایل (یا فاکس) بود، وسیله‌ای که برای انتقال اسناد یا نقشه‌ها به مکان‌های دور از طریق خطوط تلفن طراحی شده است. اصول اساسی یک ماشین فاکسی مایل در شکل ۸.۱۹ نشان داده شده است. سند قرار داده شده روی استوانه در جهت‌های عمودی (اصلی) و چرخش (فرعی) اسکن^۳ می‌شود. سند یا نقشه به پیکسل‌ها^۴ یا عناصر گرافیکی تقسیم می‌شود که توسط یک هد خواندن فستو الکتریک به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. سیگنال‌ها از طریق خطوط تلفن به واحد گیرنده فرستاده می‌شوند، تا توسط یک قلم ثبت‌کننده بازسای شوند. موتورهای پله‌ای برای درایو استوانه و قلم بکار می‌روند.

۸.۴ کاربردها در تکنولوژی نیمه‌هادی

موتورهای پله‌ای بسیاری در تجهیزات علمی مورد استفاده در تحقیقات حالت-جامد و مهندسی و تولید مدار مجتمع بکار گرفته می‌شوند. نگاه مختصری به این زمینه می‌اندازیم.

(۱) موتورهای پله‌ای بکار رفته در خلاء شدید^۵. برای رسیدن به تعیین موقعیت دقیق در خلاء شدید (به شدت 10^{-10} پاسکال که در صنعت نیمه‌هادی مورد نیاز است) یک موتور پله‌ای مخصوص

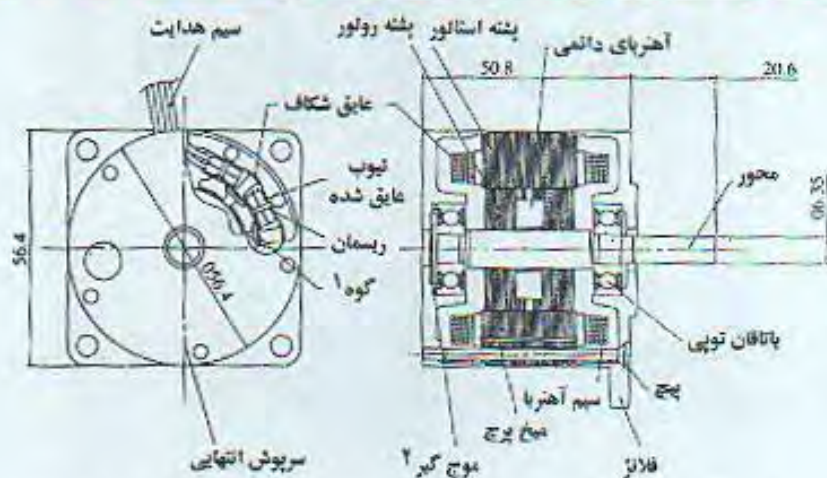
1- development roller

2- facsimile (fax)

3- scan

4- pixel

5- high vacuums



شکل ۸.۲۰. ساختار موتور پله‌ای طراحی شده برای استفاده در پی‌های شیب‌دار.

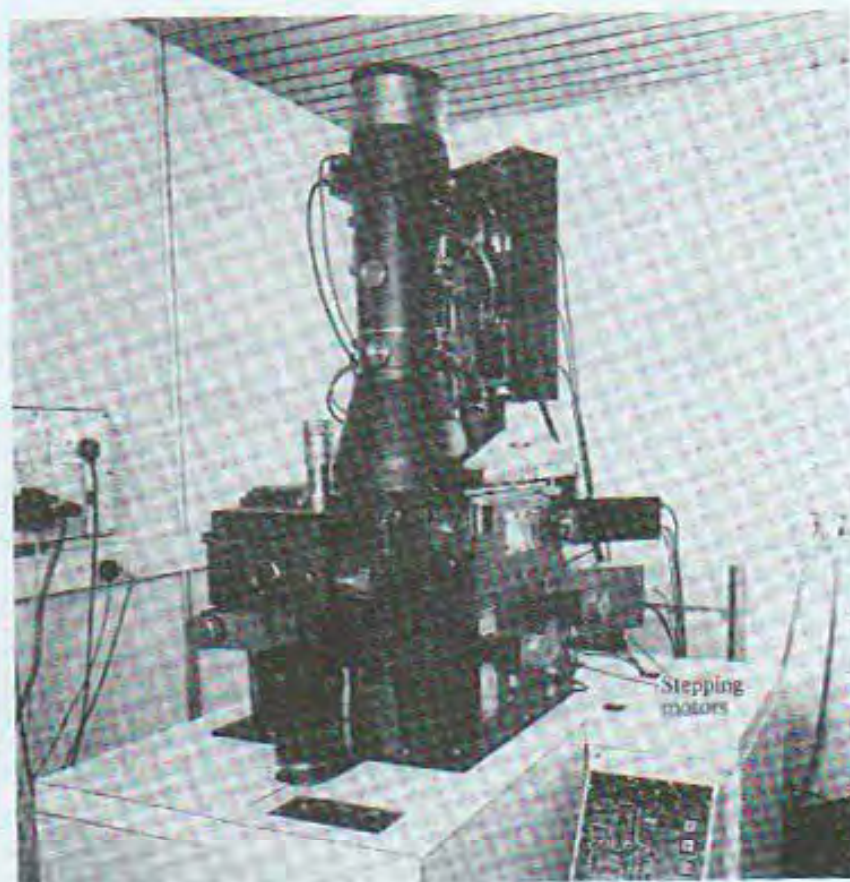
ساخته شده است. همانطور که در شکل ۸.۲۲ دیده می‌شود، تفاوت‌های مشخصی در ساختار با موتور پله‌ای معمولی وجود ندارد. به‌رحال، مواد و روش ساخت خاصی برای اجتناب از رها شدن گازهای بیرونی به سطوح قطعه بکارگرفته می‌شوند. مهمترین فرایند در دمای بالا انجام می‌گیرد. سوراخ بزرگ در صفحه آخر برای تخلیه مؤثر گازها می‌باشد. نوع خاصی از گریس پاتاقان^۳ هم بکار برده می‌شود.



شکل ۸.۲۱. زاویه یاب با سه موتور پله‌ای.

- 1- wedge
- 3- bearing grease

- 2- wave washer



شکل ۸.۲۲ ریزسازنده اشعه الکترونی.

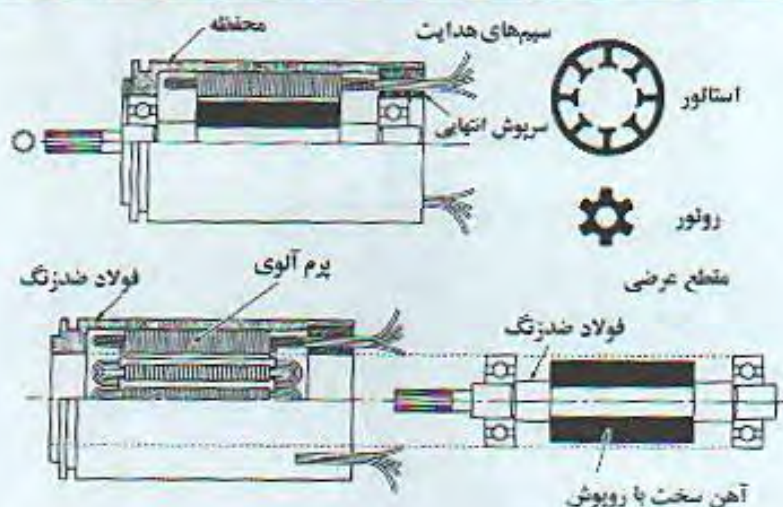
(۲) زاویه یاب^۱. زاویه یاب ابزاری برای تعیین ساختار کریستالی می باشد. این ابزار می تواند جهت یابی کریستال را در سه صفحه در محیط خلاء به اندازه 10^{-2} پاسکال بررسی کند. شکل ۸.۲۱ یک زاویه یاب را نشان می دهد که از سه موتور پله ای برای کنترل حرکات خود بهره می برد. دنده ها هر موتور و حرکت محوری مربوطه آن را با دستیابی به تفکیکی کمتر از 0.01° به هم مرتبط می کنند.

(۳) ریزسازنده^۲ اشعه الکترونی. در تولید LSI ها (مدارات مجتمع زیاد^۳) از دو موتور پله ای برای درآبوی یک میز XY دقیق که به هنگام قرار گرفتن در معرض اشعه الکترونی در محفظه خلاء یک پولک سیلیکونی را دربردارد بهره گرفته می شود. شکل ۸.۲۲ چشمی های الکترونی و محیط کاری را نشان می دهد؛ دو موتور دیده می شود.

1- goniometer

2- microfabricator

3- large-scale integrated

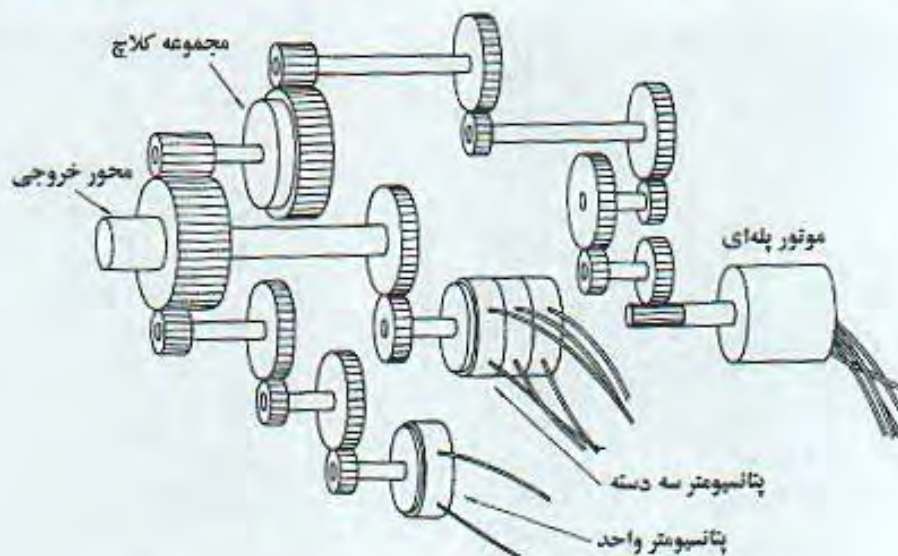


شکل ۸.۲۳. ساختار یک موتور پله‌ای مورد استفاده برای چرخش آینه در پروژه Surveyor.

۸.۵ موتورهای پله‌ای مورد استفاده در وسایل نقلیه فضایی و ماهواره‌ها

(۱) قدم‌های ابتدایی، کاربردهای فضایی موتورهای پله‌ای ابتدا در ایالات متحده آمریکا برای ساخت وسیله نقلیه اکتشافات قمری در پروژه 'Surveyor' توسعه یافت. هدف از این پروژه، که در سال ۱۹۶۶ آغاز شد، حمل یک سیستم اکتشافی به سطح ماه بود. آینه جای گرفته در مقابل دوربین وسیله اکتشافی بوسیله یک موتور پله‌ای کوچک با هسته‌ای به قطر ۱۲mm چرخانده می‌شد. [۳] از آنجا که نرخ پله بعنوان مشکل بزرگ طراحی مطرح نبود، قدرت مکانیکی لازم برای تحمل فشارهای زیاد در درجه اول اهمیت قرار داشت. بعلاوه، برای اجتناب از امکان ورود هر نوع باکتری یا قارچ به سطح ماه، استفاده از مواد ارگانیک ممنوع بود. استفاده از آهنربای دائمی هم برای اجتناب از میدان مغناطیسی نشنی در اثرگذاری بر اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ماه ممنوع بود، از اینرو از یک موتور رلوکتانس متغیر استفاده شد. ترکیب اساسی استاتور - روتور در شکل ۲.۱۶(b) نشان داده شده است: تعداد دندانه‌ها برای استاتور هشت عدد و برای روتور شش عدد بود.

این طرح از یک استاتور سروموتور AC مرسوم دارای هشت دندانه برای ساخت یک موتور چهارفاز بهره می‌برد. همانطور که در شکل ۸.۲۳ نشان داده شده قطر روتور اندکی کوچکتر از قطر یاناقان‌ها است، در حالیکه قطر داخلی استاتور اندکی بیشتر از یاناقان‌ها می‌باشد. این ساختار با توجه به روش ساخت آن 'میان‌ته‌ای' نامیده می‌شود. هسته استاتور با سیم‌پیچی‌ها درون محفظه قرار گرفته‌اند و با چسبی محافظت شده‌اند. سربوش انتهایی هم با استفاده از چسب نصب می‌شود.



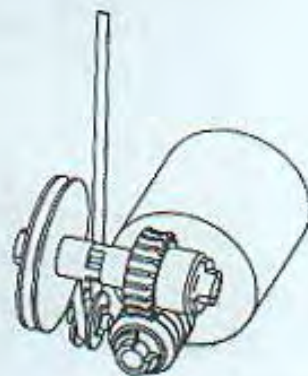
شکل ۸.۲۴. دنباله دنده‌ها در طرح اسکن برای Voyager 1

بعد از اینکار کل مجموعه باگیره‌ها محافظت می‌شود و محفظه یاتاقان و صفحه داخلی استاتور زمین می‌شوند تا مرکزیت هم تضمین شود. محفظه یاتاقان ۲ یا $3\mu\text{m}$ بیشتر از قطر یاتاقان ماشینکاری می‌شود تا مجموعه روتور براحتی وارد شود.

برای مواد استاتور یک نوع از پرم آلوی^۱ با قابلیت گذردمی مغناطیسی بالا، و یک بلوک فولادی کم‌کربن سخت برای هسته روتور، بجای متورق ساختن آن، مورد استفاده قرار گرفت تا نوسانات نامطلوب ناشی از جریان ادی موجود در بلوک فولادی از بین بروند. سطوح روتور برای جلوگیری از زنگ زدگی با طلا پوشیده بود. برای محفظه نوعی از فولاد ضدزنگ مورد استفاده قرار گرفت، که دارای ضریب انبساط گرمایی یکسانی با هسته استاتور می‌باشد. یک سیم آهنربایی نازک پوشیده از تفلون بخاطر مقاومت آن در دماهای بالا مورد استفاده قرار گرفت.

(۲) برنامه‌های فضایی بعدی. Mariner Jupiter Saturn 77 (یا Voyager) مطرح شده در مراجع [4] و [5] دارای یک طرح اسکن علمی با انواع مختلف ابزارهای علمی همچون دوربین‌های TV و طیف‌سنج UV می‌باشد. موتورهای پله‌ای برای قرار دادن ابزارها در مکان‌های مطلوب بکار می‌رفتند. موتور بکار رفته در اینجا با اندازه ۱۱ (با قطر حدوداً ۲۷mm) 90° می‌باشد. موتور دوفاز از نوع آهنربای دائمی بود. آرایش دنده موتور با نسبت کاهش ۹:۸۱ (نشان داده شده در شکل ۸.۲۴) درون یک محفظه قوطی شکل قرار گرفته بود، و چرخش محور 0.1° به ازای هر پله را ایجاد می‌کرد.

1- permalloy

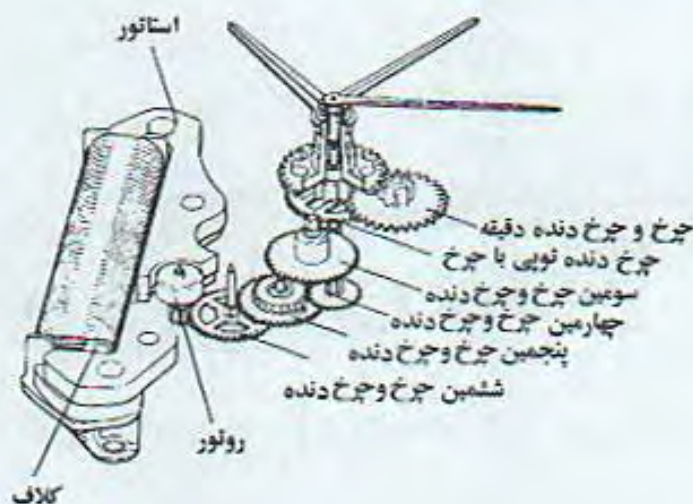


شکل ۸.۲۵ (a) ماهواره Geotail با چهار آنتن ۵۰m و دو تیرچه ۶m برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی. آنتن‌ها و تیرچه‌ها توسط یک موتور پله‌ای گسترده می‌شوند. (b) مکانیزم دنده / قرقره برای گسترده کردن تیرچه‌ها.

(۳) کاربردهای جدید. هزاران قمر مصنوعی امروزه در حال چرخش بدور زمین هستند، و بازوهای مکانیکی در این ماهواره‌ها توسط موتورهای پله‌ای درایو می‌شوند. یک نمونه Geotail می‌باشد، که یک ماهواره تحقیقاتی علمی متعلق به وزارت آموزش ژاپن است و با کمک NASA در مدار قرار گرفته است. این ماهواره، نشان داده شده در شکل ۸.۲۵(a)، قطر ۲/۲m و ارتفاع ۱/۶m دارد و با باتری‌های خورشیدی پوشیده شده است. هنگام حرکت بدور زمین، آنتن‌های بلند ۵۰m و دو تیرچه ۶m برای تشخیص میدانهای مغناطیسی بسیار ضعیف توسط یک موتور پله‌ای هیبرید طراحی شده برای استفاده در خلأ شدید و با مکانیزم دنده / قرقره نشان داده شده در شکل ۸.۲۵(b) به بیرون گسترده می‌شوند.

۸.۶ کاربردهای دیگر

(۱) وسایل زمانی. اکثر ساعت‌های دیواری و مچی که بصورت الکترونیکی درایو می‌شوند از یک موتور پله‌ای مخصوص بهره می‌برند، که اساس آن در بخش ۲.۵.۱ بررسی شد و تفاوت آن با موتورهای



شکل ۸.۲۶ مکانیزم دنده‌ای یک ساعت مچی با استفاده از یک موتور پله‌ای تکفاز.

پله‌ای معمولی در این است که نرخ پله همواره یک پله بر ثانیه است و عمل برگشت لازم نیست. در یک ساعت مچی نمونه، نوسان بسیار پایدار (بطور مثال، 32768Hz یا 215Hz) یک نوسانگر کوارتز برای دستیابی به سیگنال ساعت 1Hz بوسیله یک مدار دیجیتالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، و مدار درایوی که آهنربای کمیاب در زمین استوانه‌ای کوچکی را می‌چرخاند، را کنترل می‌کند. این حرکت برای درایو سه بازوی ساعت همانطور که در شکل ۸.۲۶ نشان داده شده با دنده انجام می‌شود. نوسانگر کوارتز، مدار الکترونیکی و باتری همگی در یک فضای کوچک درون ساعت مچی جای می‌گیرند.

(۲) دوربین‌ها برای مکانیزم تمرکز خودکار در یک دوربین، موتور پله‌ای، بعلا کترل حلقه‌باز ساده آن، مناسب‌ترین محرک بایکارگیری یک ریزپردازنده با هزینه‌ای متعادل می‌باشد. مهم‌ترین مزیت حاصل از بکارگیری موتورهای پله‌ای در این نوع کاربرد پاسخ سریع به حرکات کوتاه می‌باشد. ناپایداری ذاتی که در کنترل حلقه‌باز وجود دارد به روش‌های مختلف جبران‌سازی می‌شود.

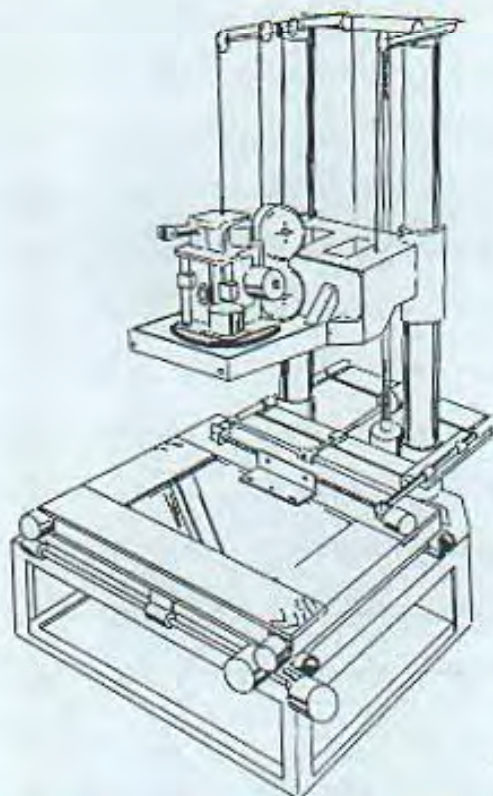
(۳) کاربردها در صنایع سنگین. شکل ۸.۲۷ یک کاربرد نمونه از موتورهای پله‌ای در یک کارخانه فولاد را نشان می‌دهد. این وسیله‌ای است که شماره تولید، و غیره، را روی صفحات فولادی مهر می‌کند؛ موتور پله‌ای مهر لاستیکی را درایو می‌کند. یک سیستم کنترل واحد می‌تواند چندین وسیله مهرزنی را بطور همزمان درایو کند.

(۴) جلوه‌های ویژه دوربین. یک کاربرد جالب درایو چند محوری، با استفاده از موتورهای پله‌ای در سیستم ایجاد جلوه‌های ویژه انیمیشن می‌باشد. چون ۲۴ فریم شامل تنها یک ثانیه انیمیشن



شکل ۸.۲۷ چاپگر مهر لاستیکی برای علامت‌گذاری صفحات فولادی.

است، تولید یک تصویر متحرک از نظر زمانی و کاری پر هزینه می‌باشد. خواسته بیننده برای دیدن تصاویر واقع‌گرایانه که در واقعیت وجود ندارد، بطور مثال، با فیلم‌هایی مانند ادیسه فضایی ۲۰۰۱ اثر استنلی کوبریک ارضا می‌شود. این فیلم بیشتر موفقیت خود را مدیون تکنیک‌های بهبود یافته 'جلوه‌های ویژه' می‌باشد.



شکل ۸.۲۸ جایگاه جلوه‌های ویژه.

بنظر می‌رسد که انواع مختلف سیستم‌های دوربینی کنترل حرکت که می‌توانند انیمیشن با جلوه ویژه تولیدکنند در چندین محل در دوره زمانی تقریباً یکسانی ساخته شده‌اند. برای مثال، سیستم دوربین عمودی نشان داده شده در شکل ۸.۲۸، که توسط Animation Staff Room در توکیو تولید شده است، از ۱۵ موتور پله‌ای از نوع هیبرید پنج‌فاز برای کنترل موقعیت دوربین‌ها، یک میز XY، دو میز فرعی، و غیره استفاده می‌کند.^(۱۰) با اینکه سروموتور DC بدون جاروبک بهترین انتخاب از دیدگاه کلی برای حرکات سریع می‌باشد، موتورهای پله‌ای پنج‌فاز به علت سادگی تنظیم مدارات کنترل آنها انتخاب می‌شوند.

هر موتور پله‌ای توسط یک پردازنده Z80A کنترل می‌شود، در حالیکه ۱۶ موتور بطور دستجمعی توسط Z80 دیگری برای رسیدن به حرکات هماهنگ نظارت می‌شوند. در این مثال اساس کنترل افزایش / کاهش سرعت مطرح شده در بخش ۵.۵ با تغییراتی مورد استفاده قرار گرفته بود.

مراجع فصل ۸

- [1] Patterson, M. L., Haselby, R. D., and Kemplin, R. M. (1977). Speed, precision and smoothness characterize four-color pen drive system. *Hewlett Packard Journal* 29, (1), 13-19.
- [2] Patterson, M. L. and Haselby, R. D. (1977). A micro-stepped XY controller with adjustable-phase current waveforms. *Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. 163-8.
- [3] Egawa, K. (1993). Topology for motor design—stepping motor for Surveyor Project. (In Japanese.) *Mechatronics* 18, (10), 50-3.
- [4] Hughes, R. O. (1975). Dynamics of incremental motion devices associated with planetary exploration spacecraft. *Proc. Fourth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. BB1-8.
- [5] Tolivar, A. F. and Hughes, R. O. (1976). Science platform pointing control law for a planetary exploration spacecraft. *Proc. Fifth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp. AA1-2.
- [6] Fujii, N. (1987). Development of a multi-axes motion control camera system for special effects in animation. *Proc. 1987 Mototech Japan*, pp. I-7-1 to 17. (In English) Japan Management Association, Tokyo.

۹ ساخت موتورهای پله‌ای

اکثر موتورهای پله‌ای ساخته شده از سال ۱۹۸۰ تاکنون از نوع موتورهای هیبرید یا دندانه‌پنجه‌ای می‌باشند. هر دو نوع از آهنرباهای دائمی استفاده می‌کنند. موتور پله‌ای هیبرید بطور ویژه دارای درجه آزادی بالایی در طراحی (یعنی اندازه، زاویه پله، و تعداددافاز) می‌باشد و به دقت تعیین موقعیت بالایی دست می‌یابد. در این فصل، طراحی واقعی و فرایند ساخت این نوع موتور را ارائه خواهیم کرد. کارخانه مورد اشاره در متن، کارخانه Aoki زیر مجموعه Sanyo Denki می‌باشد، که منحصرآ موتورهای پله‌ای هیبرید تولید می‌کند.

۹.۱ اساس طراحی و ساخت

همانطور که در فصل ۱ اشاره شد، موتورهای پله‌ای در اوایل دهه ۱۹۷۰ بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. در مقایسه با امروز، فرایند ساخت آنها از جنبه‌های مختلف متفاوت بود. شکل ۹.۱(a) فرایند سیم‌پیچی کلاف موتورهای VR ۲۰۰-پله در سال ۱۹۷۱ را نشان می‌دهد که برای استفاده در کامپیوتر ساخته شده بودند. می‌توان دید که بسیاری از فرایندها دستی بودند. تعداد انواع موتورهای تولید انبوه شده هم محدود بود. از اینرو ساخت موتورهای پله‌ای با تولید انبوه چند مدل شروع شد. شکل ۹.۱(b) داخل یک کارخانه امروزی را نشان می‌دهد، که در آن ۴۰۰ - ۳۰۰ نوع موتور پله‌ای بطور مداوم ساخته می‌شوند. فرایندهای طراحی و ساخت بکار گرفته شده در این محل را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۹.۱.۱ فلسفه طراحی کارخانه

کارخانه دارای دو طبقه (هر طبقه با مساحت ۶۰۰۰ متر مربع) می‌باشد؛ طبقه پایینی شامل ابزارهای ماشین سنگین همچون پرس‌ها، ماشین‌های NC، ماشین‌های تراش خودکار می‌شود، در حالیکه طبقه بالا محل سیم‌پیچی کلاف، نصب، بازرسی، و خطوط انتقال می‌باشد، که شامل تیمه دوم فرایند می‌شود. با اینکه خط تولید با بررسی سریع و عجولانه ممکن است نامنظم بنظر آید، در واقع تحت برنامه مدیریتی بسیار هماهنگی عمل می‌کند. در زیر فرایندهای طراحی و ساخت را برای تولید مدل‌های گوناگون بررسی خواهیم کرد.



شکل ۹.۱. (a) ساخت موتورهای پله‌ای VR در سال ۱۹۷۱. (b) داخل کارخانه امروزی Aoki نشان دهنده خطوط خودکار سیم‌پیچی کلاف.

دو روش برای ساخت موتورها وجود دارد: اکثر فرایندهای تولید یا تمامی آنها را می‌توان در داخل کارخانه انجام داد، همانند کارخانه Aoki، یا ساخت قطعات خاصی را بتوان با قرارداد به دیگر شرکت‌های موجود در منطقه واگذار کرد. با اینکه انتخاب روش ساخت یک تصمیم مدیریتی است روش اول از یک دیدگاه مهندسی ترجیح داده می‌شود. از این طریق، نه تنها بهبود کیفیت تولید با داشتن

کنترل مستقیم روی ساخت تمام قسمت‌های موتور امکان‌پذیر است، بلکه مهارت کسب شده در ساخت برای کارخانه ارزشمند می‌باشد.

۹.۱.۲ تولید انبوه و تولید گروهی^۱

ترتیب خط تولید بسته به حجم تولید متفاوت خواهد بود. به این معنی که باید سطح متناسب مکانیزاسیون و اتوماسیون تعیین شود، و سپس بایستی تصمیم به چگونگی ساخت هسته روتور و استاتور و انتخاب نوع ماشین سیم‌پیچی کلاف گرفته شود. بطور کلی، فرایندهای تولید را می‌توان بر حسب حجم خروجی آنها به تولید انبوه و تولید گروهی تقسیم کرد. در روش دوم، گروههای کوچکی از مدل‌های گوناگون ساخته می‌شوند. اغلب ماشین‌های نیمه خودکار در تولید گروهی بکار برده می‌شوند.

بطور خاص، خطوط تولید انبوه آنهايي هستند که خروجی آنها بیش از ۱۰۰۰۰ واحد در ماه است: این رقم تعداد کل موتورهای تولید شده از قالب^۲ یکسانی را نشان می‌دهد. سپس در مرحله سیم‌پیچی کلاف تغییرات زیادی انجام می‌گیرد، که منجر به تولید انبوه انواع زیادی از موتورها می‌شود. خط تولید بسیار خودکار است و معمولاً روزانه دو یا سه شیفت کار می‌کند. با اینکه تجهیزات تولید انبوه گران قیمت می‌باشند و در مرحله نصب به برنامه ریزی نیاز دارند، به هنگام کار هزینه به ازای هر واحد تولید بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۹.۲ طراحی

در کارخانه، مدل‌های کانالوگی استاندارد و موتورها که هردو برای تامین خواسته‌های مشتریان (یعنی سفارشی) طراحی شده‌اند تولید می‌شوند. در زیر چگونگی طراحی موتورهای سفارشی را توصیف خواهیم کرد.

۹.۲.۱ تعیین مشخصات نهایی

هنگامیکه باید بر اساس مشخصات جدید تصمیم‌گیری شود، در مرحله پیش - ساخت^۳ طراحی و ساخت پیش نمونه^۴ لازم می‌باشد. اساساً سه فرایند زیر برای تعیین مشخصات وجود دارد.

۱. مشتری تمامی مشخصات (شکل و ابعاد بیرونی، گشتاور نگهدارنده زاویه پله، گشتاور چسته، دقت موقعیت، ولتاژ نامی، مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچی، نوع عایق‌بندی) را ارائه می‌کند. سپس سازنده جزئیات ساخت را تعیین می‌کند: جزئیات استاتور / روتور، آهنرباها، مواد عایق، و نوع

1- batch

2- die

3- pre-manufacturing

4- prototype - making

سیم پیچی.

۲. مشتری گشتاور چته را از بارگذاری و شرایط کار محاسبه می‌کند، و روی مشخصات ظاهر بیرونی، ابعاد، و گشتاور چته موتور تصمیم می‌گیرد. مشخصات دیگر بعد از ارزیابی‌های مدل نمونه تعیین می‌شوند.

۳. مشتری بارگذاری و شرایط کار را مشخص می‌کند. سپس سازنده انتخاب اساسی موتور را انجام می‌دهد، که بعد از آن مشخصات دقیق تعیین می‌شوند.

در حالت ۱، مشتری باید آگاهی دقیقی از موتورهای پله‌ای داشته باشد. عموماً اکثر سفارشات به حالت ۲ و ۳ مربوط می‌شوند (یعنی آزمایش و ارزیابی تولیدات نمونه تحت شرایط مختلف).

عناوین معمول مشخصات در زیر فهرست شده‌اند:

مشخصات الکتریکی

- تعداد فازها
- ولتاژ سیم پیچی
- مقاومت / اندوکتانس سیم پیچی
- گشتاور نگهدارنده
- گشتاور چته سنکرون
- نرخ چرخش ماکزیمم
- دقت موقعیت
- افزایش دما
- ولتاژ منبع تغذیه و مدار درایور

مشخصات مکانیکی

- طول و شکل محور (شکاف، مسیر اصلی، و غیره)
- طول موتور
- شکل صفحه اتصال^۱
- طول سیم هدایت^۲
- نوع اتصال دهنده^۳

همانطور که در فصل ۲ و ۳ اشاره شد، ساختار ظریف دندانه استاتور و روتور مولفه مهم موتور پله‌ای را در بردارد: آرایش و شکل دندانه‌ها مشخصه‌های موتور را تعیین می‌کنند در حالیکه

1- flange face
3- connector

2- lead-wire

ابعادشان دقت تعیین موقعیت را مشخص می‌کند. هسته‌های آهنی روتور و استاتور معمولاً از لایه‌های متورق فولاد سیلیکون^۱ ساخته شده‌اند. در اکثر موارد، طراحی مجدد قالب لزومی ندارد به این خاطر کارخانه انباری از قالب‌ها برای ساخت یک سری موتورهای استاندارد دارد. حتی اگر مشخصات با تولیدات استاندارد متفاوت باشند، در اکثر موارد هسته‌های استاتور و روتور را می‌توان از قالب‌های موجود ساخت. چون داده‌های طراحی که از قبل موجودند را می‌توان برای ساده کردن روند طراحی و برنامه‌ریزی تولید بکار گرفت، این مورد مناسب می‌باشد.

در اغلب موارد، نیازهای مشتری را می‌توان با انتخاب عرض پشته استاندارد ساخته شده از قالب‌های موجود، و با ایجاد تغییرات در سیم‌پیچی‌ها و عرض فاصله‌های هوایی بر آورده کرد. طولهای فاصله هوایی استاندارد از ۵۰ تا ۶۰ mm هستند. با اینکه گشتاور نگهدارنده را می‌توان با کوتاه کردن طول فاصله هوایی به اندازه ۱۰ mm به اندازه ۱۰ - ۵ درصد افزایش داد، این امر انتظارات سختگیرانه‌ای از کنترل فرایند را موجب می‌شود. در اکثر موارد، برای بر آورده کردن الزامات گشتاور معلوم باید از عرض‌های هسته غیر استاندارد استفاده شود. سپس این امر به موضوع انتخاب ابعاد کلی و فرایند ساخت بهینه از دیدگاه اقتصادی مبدل می‌شود.

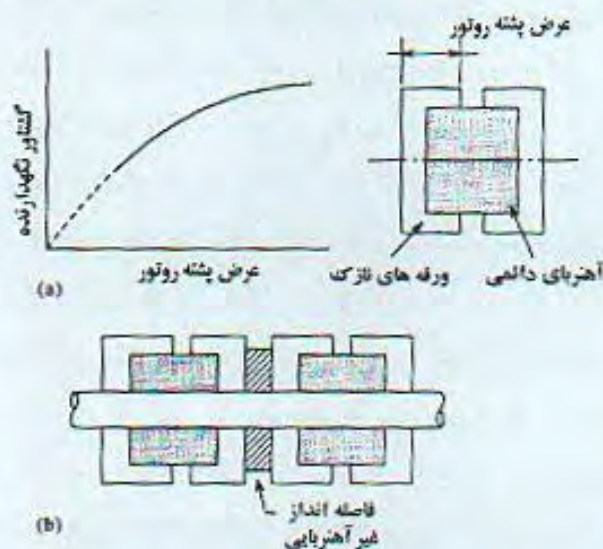
۹.۲.۲ اهمیت مشخصات گشتاور نگهدارنده

تولانس^۲ هر یک از مشخصات الکتریکی و مکانیکی مذکور بایستی معین باشد. در میان آنها، گشتاور نگهدارنده از همه مهم‌تر است. در حالیکه گشتاورهای چته برای سرعت‌های مختلف پارامترهایی هستند که در واقع می‌خواهیم کنترل کنیم، تا وقتی که ساختار اساسی موتور یکسان است بسیار به گشتاور نگهدارنده همبسته هستند. پس اندازه‌گیری‌های گشتاور نگهدارنده را اغلب می‌توان جایگزین اندازه‌گیری‌های گشتاور چته کرد. از اینرو، در آزمایش‌های نمونه، با ارائه موتورهایی به مشتری که دارای گشتاورهای نگهدارنده برابر با مقدار x و مقادیر ماکزیمم و مینیمم (یعنی تولانس) معلوم هستند، تخمین پراکندگی عملکرد یک وسیله کاربردی ممکن است.

گشتاور نگهدارنده با (۱) ساختار موتور (ترکیب مقطعی هسته‌های روتور و استاتور، عرض پشته، و نوع آهنربا) و (۲) نیرو محرکه مغناطیسی (آمپر-دور) و طول فاصله هوایی معین می‌شود. مشکلی جدی در مورد عرض پشته نشان داده شده در شکل ۹.۲ وجود دارد. در یک موتور تک آهنربایی، عرض پشته روتور و گشتاور همانطور که در شکل ۹.۲(a) نشان داده شده به هم مربوط هستند: گشتاور به پایداری می‌رسد و در عرض پشته مشخصی ثابت باقی می‌ماند. این بخاطر محدود بودن شار مغناطیسی آهنربای دائمی است. از اینرو، اگر قطر بیرونی روتور ثابت باشد، برای افزایش گشتاور نگهدارنده به ساختار دو یا سه ردیفی نیاز می‌باشد. برای مورد (۲) در بالا، آمپر - دورها از

1- silicon steel

2- tolerance



شکل ۹.۲. عرض پشته روتور و مشخصه‌های گشتاور نگهدارنده. (a) گشتاور نگهدارنده بر عرض پشته. (b) ساختار دوپشته‌ای.

روی تعداد دورها و جریان نامی تعیین می‌شوند، پس عرض فاصله هوایی عامل مهم موثر بر گشتاور نگهدارنده می‌باشد. در واقع، کنترل فاصله هوایی را می‌توان بعنوان مهم‌ترین موضوع در تولید موتور پله‌ای در نظر گرفت.

هنگامیکه مشخصات معین شدند، بایستی در تولید انبوه بشدت رعایت شوند.

۹.۲.۳ اهمیت دقت تعیین موقعیت

دقت تعیین موقعیت و قابلیت اطمینان بالایی برای موتور پله‌ای حرکت دهنده هد مغناطیسی در یک درایو دیسک سخت ضروری است. برای حصول به این امر هسته‌های استاتور و روتور طوری طراحی شده‌اند که منحنی T/θ بررسی شده در بخش ۶.۱، تا حد ممکن به منحنی سینوسی کامل نزدیک باشند. قالب‌های بکار رفته در ساخت این هسته‌ها باید دقت بسیار بالایی داشته باشند و بدقت ماشینکاری شوند. بعلاوه، سطح داخلی استاتور باید برای رسیدن به گردی^۱ بالا ماشینکاری شود، و سوراخکاری در دندانه‌های روتور و استاتور باید کمترین باشد. بعلاوه، نیاز به معیارهایی برای اجتناب از جابجایی‌های مکانیکی غیر قابل برگشت ناشی از تغییرات دما می‌باشد.

کاربردهای زیادی که به دقت تعیین مکان بالایی نظیر وسایل دیسک سخت نیازمند باشند وجود ندارد. با رسیدن به تعیین موقعیت دقیق در هر کاربردی، می‌توان تغییرات گشتاور نگهدارنده بین فازها

را در حداقل نگه داشت، که منجر به عملکرد پایدار وسیله بکار گیرنده موتور پله‌ای می‌شود.

۹.۲.۴ پیش‌سازی^۱

موتور پیش ساخت برای پی‌بردن به رضایت‌بخش بودن مشخصه‌های الکتریکی و قدرت مکانیکی و جمع‌آوری داده‌های لازم برای تولید، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این داده‌ها برای طراحی خط تولید بسیار مهم می‌باشند.

در Sanyo Denki Co. خط مخصوص ساخت موتورهای پیش ساخت در کارخانه دیگری قرار دارد. فاکتور مهمی که عملکرد یک موتور پله‌ای را مشخص می‌کند فاصله هوایی است. در مرحله پیش ساخت، تغییرات احتمالی فاصله هوایی نامی همانند عرض‌های فاصله‌هوایی ماکزیمم و مینیمم طراحی شده به مشتری ارائه می‌شوند. کاربر این موتورها را در وسیله کاربردی مورد نظر خود نصب می‌کند، و آنها را با تolerانس دقیق با دمای محیطی، ولتاژ، جریان و شرایط بارگذاری (بطور مثال اصطکاک) مختلف مورد آزمایش قرار می‌دهد. بطور مثال، موتورها برای پی‌بردن به پیروی آنها از نمودار افزایش / کاهش سرعت مطلوب بدون از دست دادن پله‌ها، یا کیفیت چاپ اگر در چاپگرها بکار گرفته شوند مورد آزمایش قرار می‌گیرند. اگر موتور از آزمایش قبول شد، دسته دیگری از موتورهای نمونه تحت شرایطی نزدیک به تولید انبوه ساخته می‌شوند و این موتورها دوباره به کاربر داده می‌شود تا ارزیابی‌های بیشتری انجام دهد. در مواقعی باید آزمایش‌هایی اینچنین قبل از آغاز به تولید انبوه انجام شوند.

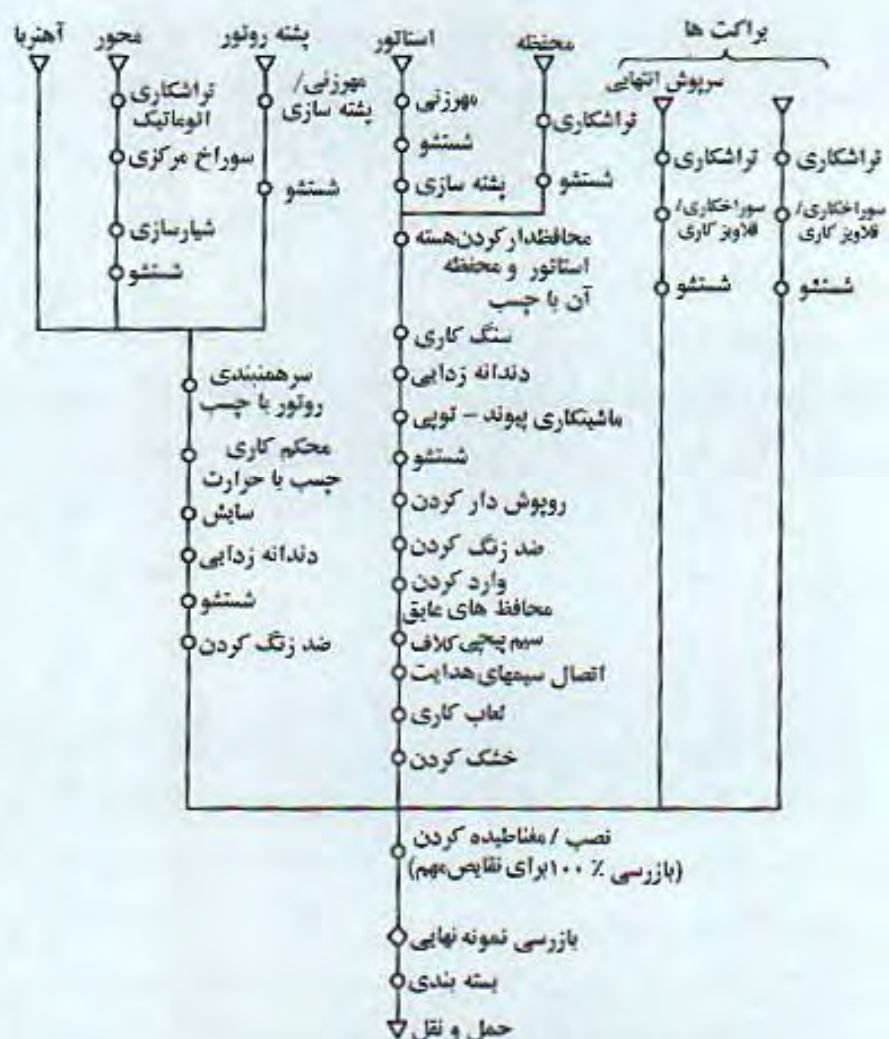
معمولاً کوتاهترین زمان از مرحله طراحی تا تولید انبوه در حدود ۳ ماه، و طولانی‌ترین زمان در حدود یک سال است.

۹.۲.۵ طراحی جدید از قالب

برای سری H - موتورهای ساخت Sanyo Denki، طراحی و ساخت قالب جدید ضروری بود. هدف این پروژه تحقق بخشیدن به ۵۰ درصد افزایش در گشتاور نگهدارنده برای موتوری با اندازه قبلی؛ یا کوچک کردن اندازه قطر موتور از ۵۶ به ۵۰ mm با دستیابی به گشتاور نگهدارنده قبلی بود. برای رسیدن به این هدف، ارزیابی مجدد مدار مغناطیسی ضروری بود. از اینرو تحلیلی روی میدان مغناطیسی با استفاده از روش عناصر محدود برای تعیین ابعاد هسته استاتور انجام شد. برای افزایش گشتاور بدون تغییر قطر خارجی، قطر روتور و قطر داخلی استاتور باید با حفظ مساحت سوراخ سیم‌پیچی‌های کلاف افزایش یابند. این امر محدودیت‌هایی بر مسیر مغناطیسی درون استاتور بوجود می‌آورد؛ از اینرو تحلیلی روی میدان مغناطیسی برای تعیین محدودیت‌های طراحی عملی انجام شد.

مپس هسته‌های پیش ساخت مختلفی با ماشینکاری تخلیه الکتریکی^۱ ساخته شدند و آزمایش‌هایی برای تعیین ابعاد نهایی این سری موتورها ترتیب داده شد. بعد از این مرحله، سفارشات قالب‌ها به یک سازنده قالب داده شد.

علاوه بر تغییرات ابعادی، کوچک‌سازی موتورها هم به بهبود در ته‌بندی سیم‌پیچی^۲ کلاف نیازمند است. از اینرو یک طراحی کاملاً جدید نه تنها به قالب‌های جدید برای هسته‌های روتور و استاتور، بلکه به قالب جدیدی برای محافظ^۳ پلاستیکی عایق و تجهیزاتی از قبیل ماشین ته‌بندی^۴ نیازمند می‌باشد.



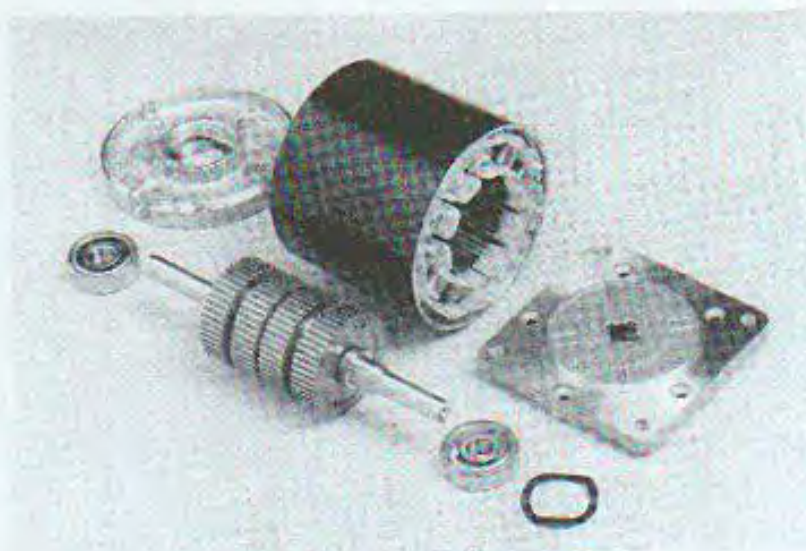
شکل ۹.۳. فلوجارت تولید یک موتور پله‌ای پنج فاز.

1- electric discharge machining

2- winding termination

3- liner

4- termination machine



شکل ۹.۴. موتور پله‌ای پنج فاز (دید از هم مجزا).

۹.۳ فرایند ساخت

قبل از ورود به مرحله ساخت، مشخصات ساخت و بازرسی آماده می‌شوند. فلوچارتی برای ساخت یک موتور پله‌ای پنج فاز در شکل ۹.۳ آورده شده است؛ هر گام با روش‌های ساخت قطعه بدقت تشریح شده است. شکل ۹.۴ موتور مجزا شده از این نوع را نشان می‌دهد. در زیر برخی مراحل در ساخت موتورهای پله‌ای هیبرید از این نوع را ارائه خواهیم کرد.

۹.۳.۱ استاتور و روتور

دو روش اساسی برای ساخت هسته‌ها وجود دارد. در روش اول، یک ماشین مهرزن^۱ برای جدا کردن ورقه اصلی هسته از یک نوار فولاد سیلیکون مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس ورقه‌های جدا شده روی هم انباشته می‌شوند و بطور دستی به یکدیگر پرچ می‌شوند. شکل ۹.۵ هسته استاتور سرهم‌بندی شده را برای یک موتور پله‌ای نسبتاً بزرگ نشان می‌دهد. هنگامیکه میله راهنمایی^۲ برای انباشتن ورقه‌ها روی هم با ۱۲ پیچ پرچ مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیمی از ورقه‌ها ۱۸۰° برگردانده می‌شوند؛ این امر تغییرات اندک در ضخامت ورقه‌های همجهت و متقاطع را با جهت گردانده شده همتراز می‌کند و دقت ابعاد استاتور را بهبود بخشد. پرچ کردن با اعمال فشار زیاد به هسته برای فشردن سر میخ پرچ‌ها انجام می‌شود. این روش برای تولید قطعات کوچک یا موتورهای بزرگتر مورد استفاده

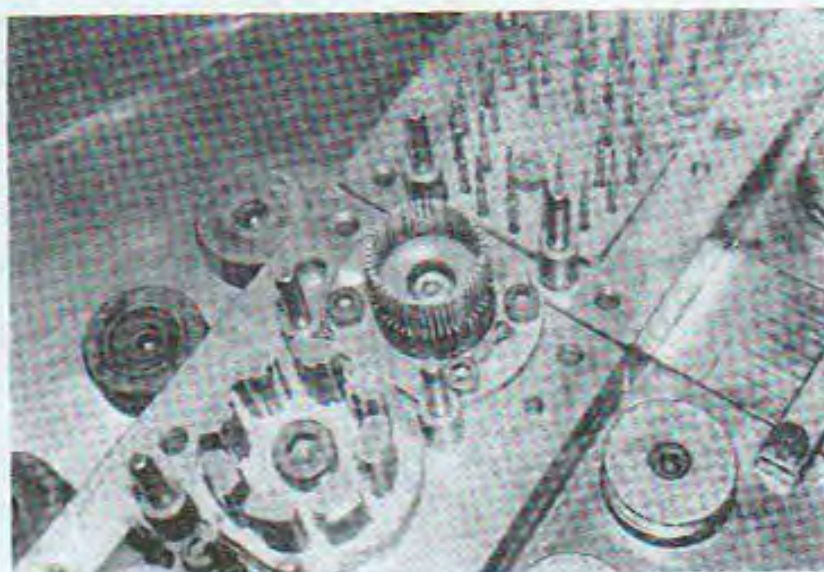


شکل ۹.۵. هسته استاتور پرچ شده برای تولید گروهی.



شکل ۹.۶. نوار فولادی مهر شده برای تولید انبوه (موتور دوفاز).

قرار می‌گیرد. گاهی اوقات بجای پرچ کردن به همدیگر جوش داده می‌شوند. در روش دوم، که در تولید انبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد، انباشتن و سرهم‌بندی هسته بصورت خودکار انجام می‌گیرد. با اینکه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالاست، هزینه تولید هر واحد بعلاوه اینکه مرحله‌ای که قبلاً به نیروی کار ماهر نیاز داشتند و دقت زیادی را صرف می‌کردند خودکار شده‌اند بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. شکل ۹.۶ نوار فولادی مهر شده (که اسکلت هم نامیده می‌شود)



شکل ۹.۷. قالب فلزی.



شکل ۹.۸. سرهمبندی خودکار هسته (FASTEC) برای تولید انبوه.

را برای استاتور یک موتور پله‌ای دوفاز نشان می‌دهد. شکل ۹.۷ قسمتی از قالب برای این فرایند را نشان می‌دهد. در این روش، مهرزنی و سرهمبندی ورقه به ورقه بصورت قالب‌زنی یک ورقه در هر لحظه انجام می‌شود. این مورد در شکل ۹.۸ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۹.۶ نشان داده شده، هر ورقه هسته در چندین نقطه که به اندازه نصف ضخامت ورقه در زیر برآمدگی دارند مهرزنی شده است. میله هسته از انطباق برآمدگی یک صفحه با تورفتگی صفحه بعدی تشکیل می‌شود. (برآمدگی‌ها از نظر قطری از تورفتگی‌ها بزرگتر هستند، که در هم‌رفتنگی محکمی را باعث می‌شوند.) تفکیک بین هر هسته با شمارش ورقه یا اندازه‌گیری



شکل ۹.۹. هسته روتور رایج در موتورهای دو و پنج فاز.

ضخامت هر جزء، و مهرزنی سوراخها بجای تورفتگی‌ها در آخرین ورقه هر جزء انجام می‌شود. (شکل ۹.۸ را نگاه کنید که فرایند مهرزنی سوراخها را نشان می‌دهد.) وقتی که جبران نابرابری در ضخامت و ناهمگونی مغناطیسی موجود در ورقه‌ها مورد نظر باشد هر ورقه به اندازه یک زاویه تنظیم (بطور مثال، 90° برای موتورهای دو فاز، 180° برای موتورهای پنج فاز) نسبت به ورقه قبلی چرخانده می‌شود.

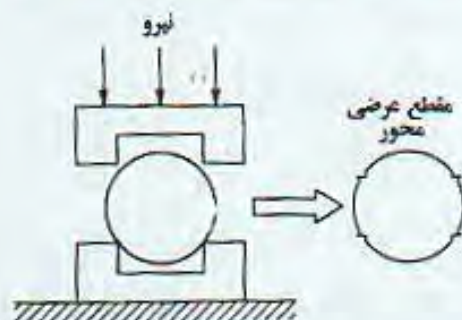
شکل ۹.۹ روتور 5° دندانه روی هم انباشته رایج در موتورهای دو و پنج فاز را نشان می‌دهد. سوراخهای پیرامونی با قطرهایی در حدود ۱mm بعنوان مراجع تعیین موقعیت می‌باشند، در حالیکه فرورفتگی‌های مدور (با قطر کمی کوچکتر) و مستطیلی هر یک با فواصل 72° قرار گرفته‌اند؛ فرورفتگی‌های مدور برای حفظ دقت بکار می‌روند، در حالیکه فرورفتگی‌های مستطیلی گود ساخته شده‌اند تا به قدرت مجموعه بیافزایند. برای سرهمبندی هسته، هر ورقه به اندازه 72° چرخانده می‌شوند، روی هم انباشته، و سپس بر ورقه زیرین بطور خودکار منطبق می‌شود.

۹.۳.۲ محور

پیوستگی مکانیکی بین روتور و محور باید قوی باشد. برای دستیابی به این پیوستگی، چهار شیار مستقیم در جهت طولی با اعمال ابزاری با فشار قوی، همانطور که در شکل ۹.۱۰ نشان داده شده، ایجاد شده‌اند؛ این کار آرایش شیار یا شیارسازی نامیده می‌شود.

بطور کلی، چند روش برای حصول به این پیوستگی بین روتور و محور وجود دارد:

۱. تنها استفاده از چسب: پیوستگی حاصل ضعیف است.
۲. کنگره دار کردن سطح محور: وقت‌گیر و پرهزینه.
۳. شیارسازی به اضافه استفاده از چسب: روش بهینه از نظر قدرت، زمان، و هزینه.



شکل ۹.۱۰. شیار سازی برای پیوند محور و پشته روتور (مقطع عرضی).

۹.۳.۳ براکت^۱ و محفظه

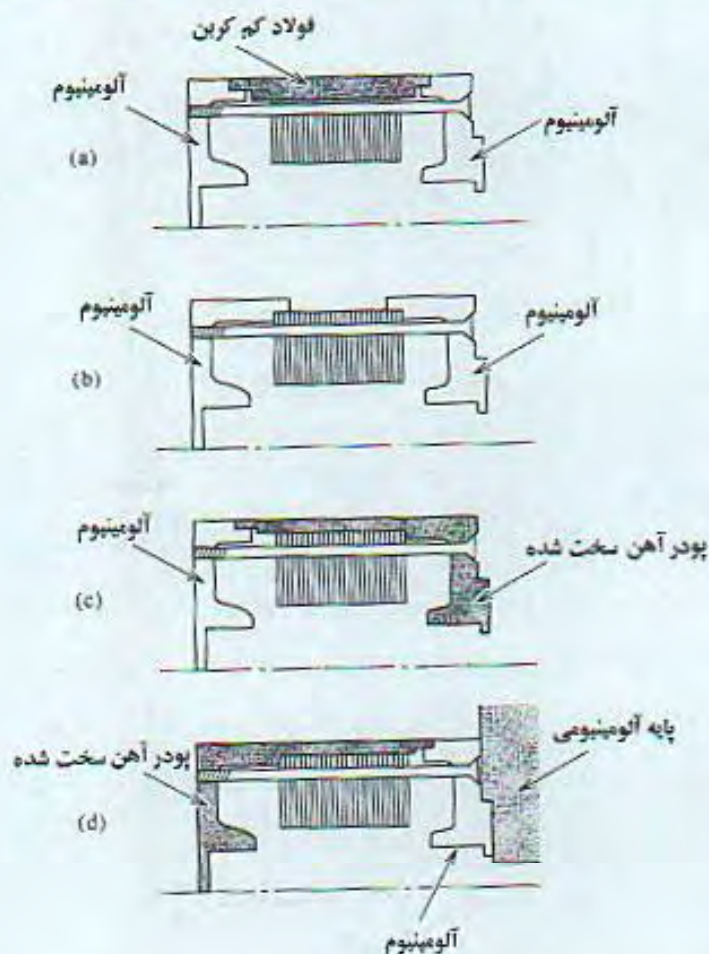
براکت، که صفحه اتصال^۲ (در طرف متصل به وسیله مورد کاربرد)، صفحه انتهایی یا ناقوسک^۳ انتهایی (در طرف دیگر) هم خوانده می‌شود، یا ناقان را پشتیبانی می‌کند و هسته استاتور را نگه می‌دارد. دو نوع ماده در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند: آلومینیوم و پودر آهن سخت شده^۴. استفاده از ماده دوم در اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. با اینکه پودر آهن سخت شده قابلیت ماشینکاری پایینی دارد، مزایای آن عبارتند از (۱) شار نشستی کمترین است، و (۲) دقت ابعاد در طول زمان پایدار است، بعلاوه اینکه ضریب انبساط گرمایی آن مشابه به ماده هسته استاتور است.

از طرف دیگر، استفاده از آلومینیوم به کمی احتیاط نیازمند است به این خاطر که دارای ضریب انبساط گرمایی بالاتری از صفحات فولاد سیلکون استاتور می‌باشد. برای موتوری با قطر ۴۰ mm، اختلاف دمای ۳۰°C منجر به اختلافی در حدود ۱۰۰ μm می‌شود. به این علت، در درایوهای دیسک سخت و دیگر کاربردهایی که به دقت‌های تعیین موقعیت بالایی نیازمندند از پودر آهن سخت شده استفاده می‌شود. پودر آهن سخت شده، در مقایسه با چدن، دارای فشار درونی پایینی است و بعد از ماشینکاری کمتر تغییر شکل می‌دهد.

در برخی موتورها، براکت و محفظه بعنوان یک واحد تنها ماشینکاری می‌شوند (ساخت تک بلوکی) این مورد، به همراه سه روش دیگر ساخت براکت / محفظه، در شکل ۹.۱۱ نشان داده شده است. شکل (a) ۹.۱۱ یک ترکیب براکت آلومینیومی / محفظه فولادی را نشان می‌دهد. چون آلومینیوم به هنگام گرما دیدن بیشتر منبسط می‌شود، اتصال محکم باقی می‌ماند. در شکل (b) ۹.۱۱، محفظه برای کاستن از هزینه‌ها حذف شده است. یک پیچ سرتاسری از شل شدن اتصال براکت / هسته بعلاوه انبساط گرمایی جلوگیری می‌کند. ترکیب شکل (c) ۹.۱۱، با پودر آهن سخت شده بکار رفته در صفحه

1- bracket
3- bell

2- flange
4- sintered iron



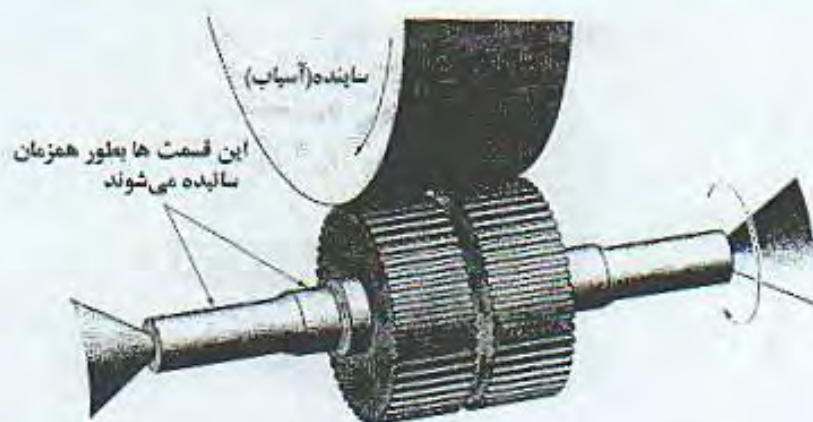
شکل ۹.۱۱. براکت‌ها (صفحه اتصال و نافوسک انتهایی) و محفظه روتور و یاتاقان‌ها نشان داده نشده‌اند.

اتصال/محفظة تکیارچه، ایده‌آل می‌باشد. موتور شکل (d) ۹.۱۱ برای درایوهای دیسک سخت بکار می‌رود. برای اینکه اتصال با گرما شل نشود، صفحه اتصال از آلومینیوم ساخته شده تا با پایه دایکاست^۱ آلومینیومی منطبق باشد.

۹.۳.۴ دقت ماشینکاری

چون فاصله بین استاتور و روتور موتورهای پله‌ای از دیگر انواع موتورها باریک‌تر است، و تغییرات یا نابرابری‌ها در فاصله هوایی بشدت روی گشتاور اثر می‌گذارند، باید دقت ماشینکاری بالایی وجود داشته باشد. در این بخش، اصطلاحات فنی مربوط به دقت موتور را تشریح و مسائل اصلی مربوطه را بررسی خواهیم کرد. بحث روی ارتباط بین محور و روتور، روتور و براکت، و براکت و محفظه استاتور متمرکز خواهد شد.

1- die-cast

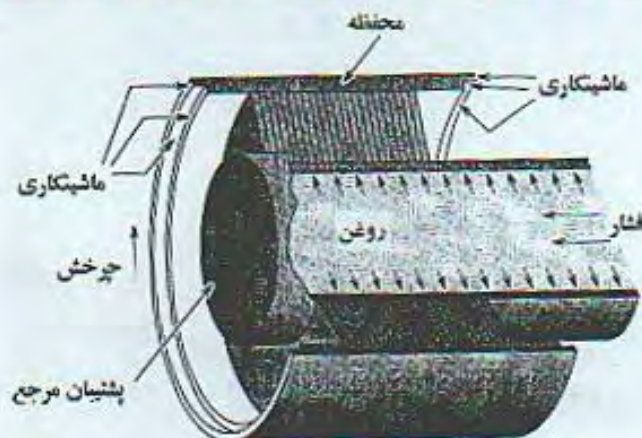


شکل ۹.۱۲. دستیابی به هم مرکزیت قطر بیرونی محور و سطح بیرونی روتور.

(a) هم مرکزیت^۱ و ماشینکاری اتصال - توپی^۲. در حالت ایده‌آل، محورهای مرکزی شفت^۳، روتور، و سطح داخلی استاتور بایستی کاملاً منطبق شوند. در عمل، معیارهایی برای اطمینان از دستیابی به درجه بالایی از هم مرکزیت ضروری می‌باشند. یک روش برای اطمینان از هم مرکزیت محور روتور (که پتانها را پشتیبانی می‌کند) و محیط بیرونی هسته روتور سائیدن همزمان هر دو آنها به هنگام پشتیبانی آنها از سوی سوراخهای مرکزی محور (شفت) می‌باشد، همانطور که در شکل ۹.۱۲ نشان داده شده است. (از جفت سوراخهای مرکزی در سرها، یکی بطور خودکار توسط یک ماشین تراش سوراخ شده است، و دیگری طبق فرآیند دیگری ساخته شده است.) احتمالاً ناهمردیفی محوری (یا دوری از مرکز) هنگامیکه براکت و هسته استاتور به یکدیگر متصل می‌شوند رخ می‌دهد. اگر استاتور استوانه‌ای شکل باشد، گاهی اوقات از محفظه استاتور برای به حداقل رساندن ناهمردیفی استفاده می‌شود. در این حالت، بعد از اینکه قطر درونی استاتور تا پرداخت بسیار خوب ساینده شد، یک میله هسته وارد و با گیره‌ای محکم می‌شود. سرها و سطح داخلی محفظه هر دو در یک زمان، با استفاده از این میله هسته بعنوان مرجع، ماشینکاری می‌شوند، از اینرو هم مرکزیت و تعامد بالایی حاصل می‌شود. (شکل ۹.۱۳). برای کاهش هزینه معمولاً در موتورهای کوچک محفظه وجود ندارد. اگر دقت‌های بالایی لازم باشد، سطح بیرونی و سرهای میله هسته با استفاده از سطح درونی بعنوان یک مرجع مشترک ماشینکاری می‌شوند.

1- concentricity
2- shaft (محور)

2- spigot - joint



شکل ۹.۱۳. ماشینکاری اتصال - تویی.



شکل ۹.۱۴. دندانه زدایی لبه دندانه.

(b) تعامد^۱. تعامد موضوع مهمی است که مربوط به دقت ساختار موتور می‌شود. سطح درونی استاتور باید نسبت به سر محفظه عمود باشد. عملکرد یک موتور پله‌ای بشدت از یکپارچگی فاصله هوایی اثر می‌پذیرد، که در عوض نه تنها به روتور بلکه به درجه تعامد بین استاتور و براکت وابسته می‌باشد.

(c) گردی^۲. قطر درونی استاتور و قطر بیرونی روتور باید در پیرامون آن ثابت باشد؛ یعنی کاملاً گرد باشد. با اینکه بدون مشکلات زیاد می‌توان به گردی روتور دست یافت، دقت زیادی برای رسیدن به گردی سطح درونی استاتور لازم می‌باشد. برای سایش سطح درونی بایستی استاتور توسط گیره‌ای نگه داشته شود. نیروی نگهدارنده بزرگی استاتور را کمی منحرف می‌کند؛ از اینرو حتی اگر استاتور تا گردی کامل ساینده شود، هنگامیکه از گیره باز می‌شود از بین رفتن کشش الاستیک سطح گردی را کاهش خواهد داد. گردی کم در استاتور می‌تواند در اثر افزایش‌های ناگهانی گشتاور - گیره یا سطح نويز بالا باشد.

1- perpendicularity

2- roundness

(d) دندانه زدایی^۱. همانطور که در شکل ۹.۱۴ نشان داده شده، سایش برای شکل دادن دندانه‌های روتور و استاتور برآمدگی‌هایی را در لبه‌های دندانه ایجاد می‌کند. چنین برآمدگی‌هایی هنگام حرکت موتور خرد می‌شوند و می‌توانند باگیرکردن بین فاصله‌های استاتور / روتور باعث قفل شدن موتور شوند. برداشتن این برآمدگی‌ها مرحله مهمی است، و معمولاً با یک ابزار پرداخت نایلونی یا فولاد ضد زنگ انجام می‌شود.

۹.۳.۵ تمیزکاری

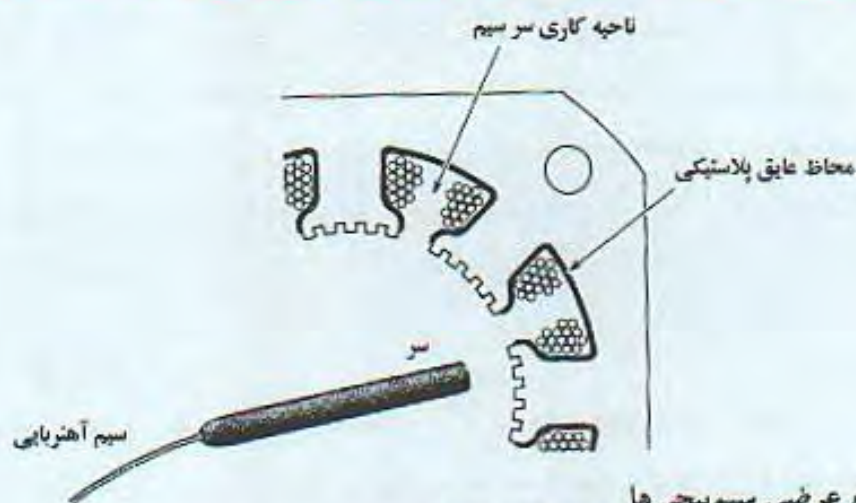
مقدار قابل توجهی از مایع ماشینکاری در فرایندهای پایانی که برای استاتور و روتور مورد استفاده قرار می‌گیرد، بایستی شسته شود. با اینکه در گذشته از هیدروکربن‌های ترکیب شده با فلور (مانند فرون^۲) به خاطر قیمت پایین و قابلیت اطمینان به آنها بعنوان ماده شوینده مورد استفاده قرار می‌گرفتند، رها کردن آنها در اتمسفر باعث تخریب لایه اوزون زمین می‌شود. این موضوع به مساله بزرگ زیست محیطی تبدیل شده است و توافق بین‌المللی بر ممنوعیت استفاده از آن بعد از سال ۱۹۹۵ بوده است. در Sanyo Denki Co، سیستم شوینده‌ای در سال ۱۹۹۳ ساخته شد که از مواد تخریب کننده اوزون استفاده نمی‌کند و هم اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۹.۳.۶ روکش کردن و جلوگیری از زنگ زدگی

بخطرات اینکه فولاد سیلیکونی به آسانی زنگ می‌زند، روکش ضدزنگ ضروری می‌باشد. براکت یا از آلومینیوم دایکاست یا پودر آهن سخت شده ساخته می‌شود. براکت‌های آلومینیومی به روکش‌های ضدزنگ نیاز ندارد اما گاهی اوقات بمنظور زیبایی روکش - دار می‌شوند، ولی براکت‌های از جنس پودر آهن سخت شده به روکش‌های ضدزنگ نیاز دارند. محفظه‌های از جنس فولاد نرم هم برای جلوگیری از زنگ‌زدگی به روکش‌های ضدزنگ نیازمندند.

۹.۳.۷ سیم‌پیچی و ته‌بندی کلاف

در حالیکه قسمت زیادی از فرایند ساخت به مهندسی مکانیک مربوط است، سیم‌پیچی کلاف و مغناطیده کردن آهنربا(های) دائمی مهمترین فرایندهای الکتریکی می‌باشند. هنگامیکه جریان از کلاف‌ها می‌گذرد، بطور مغناطیسی قطب‌ها را تحریک می‌کنند. فاکتور فضا، عایق الکتریکی، و انتشار گرمایی مواردی هستند که به توجه دقیقی در فرایند سیم‌پیچی کلاف نیازمندند. فاکتور فضا بصورت نسبت مساحت کلاف به مساحت مقطع عرضی سوراخ تعریف می‌شود. یک فاکتور فضای بالا به این معنی است که کلاف‌ها در کنار هم طوری سیم‌پیچی شده‌اند که فضای کافی برای محافظ پلاستیکی



کل مساحت مقطع عرضی سیم پیچی‌ها
= فاکتور فضا
مساحت شکاف

شکل ۹.۱۵. فاکتور فضا نمی‌تواند بخاطر محافظ پلاستیکی عایق و فضای کاری دهانک سیم بالا باشد. (فاکتور فضا = مساحت کل مقطعی سیم پیچی‌ها بر مساحت سوراخ.)

و فضای کاری برای دهانک^۱ ماشین سیم پیچی فراهم است (شکل ۹.۱۵). در عمل، تنها ۳۰ درصد از مساحت مقطعی سوراخ را می‌توان بعنوان مساحت مؤثر کلاف (یعنی مساحت مس) مورد استفاده قرار داد؛ یعنی، فاکتور فضا ۳۰ درصد است.

سیم پیچی کلاف شامل نکات زیر می‌شود:

- (۱) کلاف‌ها بایستی در ردیف‌های موازی تمیز سیم پیچی شوند؛
- (۲) آنها باید دور قطب‌ها متمرکز باشند؛
- (۳) سیم‌ها از نظر الکتریکی باید از همدیگر و از قطب‌ها عایق شده باشند.

نکته (۲) تضمین می‌کند که گرمای تولید شده در کلاف‌ها در هسته تلف می‌شود. دماهای بالای کلاف باعث می‌شود ماده عایق به سرعت خراب شود.

در حالیکه فرایند سیم پیچی کلاف مکانیزه می‌باشد، درجه اتوماسیون بسته به خروجی تولید متفاوت است. ماشین‌های بسیار خودکار معمولاً برای تولید انبوه طراحی شده‌اند، در حالیکه ماشین‌های کاربرد عام، یعنی ماشین‌هایی که به درجه بالایی از عملکرد دستی نیازمندند، برای تولید گروهی مناسب می‌باشند.



شکل ۹.۱۶. ته‌بندی کلاف.

اتصال سیم آهنربایی کلاف و سیم‌های هدایت یکی از مشکل‌ترین مراحل اتوماسیون است. شکل ۹.۱۶ یکی از چند روشی که موجودند را نشان می‌دهد.

۹.۳.۸ اندود کردن با لعاب^۱ و خشک کردن

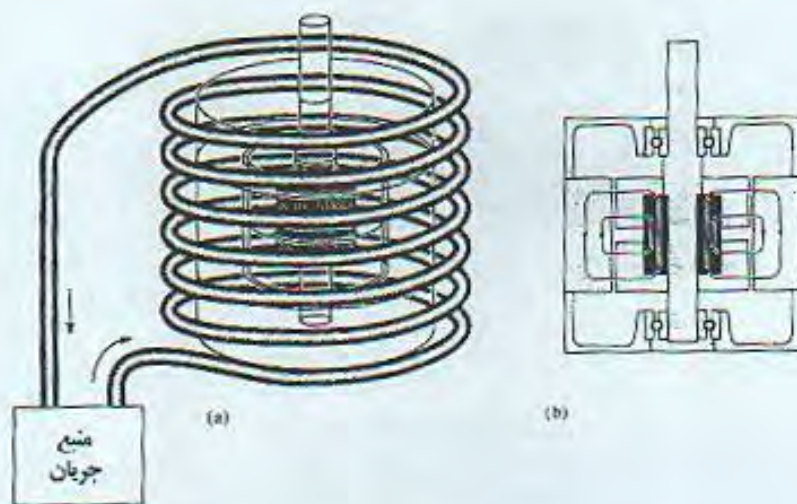
در برخی مدل‌ها، کلاف‌ها بعد از سیم‌پیچی و ته‌بندی کلاف با لعاب اندود می‌شوند. با اینکه روش لعاب قبلاً بر روی تمام انواع موتور انجام می‌شد، پوشش‌های پیشرفته سیم آن را در موتورهای کوچک امروزی غیر ضروری کرده است. لعاب به بهبود عایق الکتریکی و هدایت گرمایی از کلاف به هسته کمک می‌کند. بعد از اینکه لعاب با چسبناکی کم برای اندودسازی بصورت قطره‌ای به کلاف خورانده شد، مجاز به جامدسازی آن از طریق خشک کردن هستیم.

۹.۳.۹ سرهمبندی و مغناطیده کردن

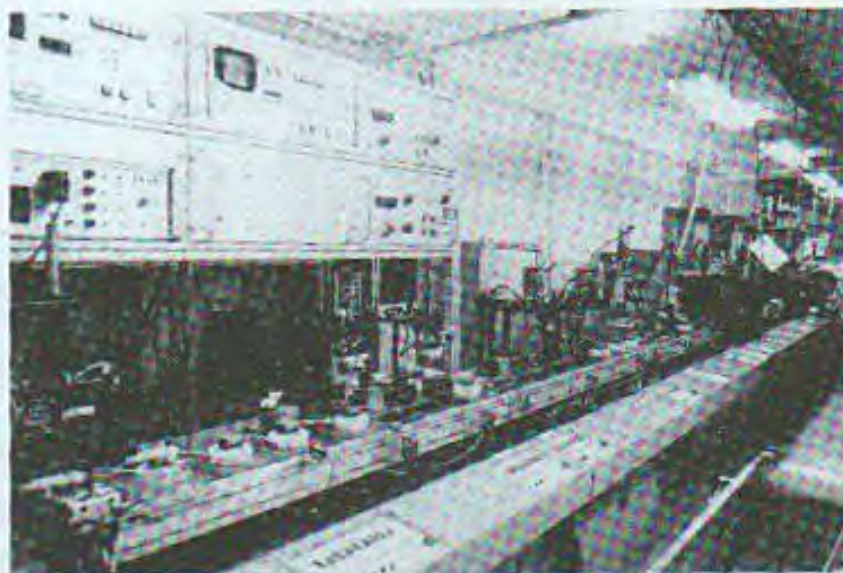
هنگامیکه تمام قسمت‌ها آماده شدند، سرهمبندی می‌شوند. سپس آهنربای روتور مغناطیده می‌شود. همانطور که در شکل ۹.۱۷(a) نشان داده شده، این کار با عبور دادن ناگهانی جریان زیادی از کلاف مغناطیده کننده با استفاده از یک خازن شارژ شده انجام می‌گیرد. آهنربای استوانه‌ای در جهت محور

1- varnish impregnation

شکل ۹.۱۷(b) تشکیل می‌دهد. (اگر موتور بعداً از هم مجزا شود و روتور بیرون آورده شود، مقداری از خاصیت آهنربایی و از اینرو مشخصه‌های موتور بخاطر سرهمبندی مجدد کاهش خواهند یافت.) شکل ۹.۱۸ یک خط خودکار سرهمبندی، مغناطیده کردن، و انواع مختلف تجهیزات آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۹.۱۷. (a) مغناطیده کردن آهنربای دائمی. (b) مسیر مغناطیسی بعد از مغناطیده کردن.



شکل ۹.۱۸. تصویری از خط تولید خودکار پیچ کردن، مغناطیده کردن، آزمایش‌ها (روی قدرت عایق، جهت چرخش، نرخ چرخش) در این خط انجام می‌شوند.

۹.۴ مدیریت تولید، کیفیت، و مشخصه‌ها

در ژاپن، تولید انبوه موتورهای پله‌ای در سال ۱۹۷۱ در کارخانه Ueda متعلق به Sanyo Denki آغاز شد. این کار تحت قرارداد با IBM برای تأمین مجموعاً ۱۶۵۰۰۰ موتور، برای استفاده در کامپیوتر و کارت خوان‌ها، در طول ۴ سال انجام شد. مناسب نبود که واحدی معیوب در این موتورها دیده شود. با اینکه روشهای کنترل کیفیت شاهد پیشرفت‌های دائمی بوده‌اند، فلسفه اساسی امروز همان است که قبلاً بوده است؛ یعنی تمام قسمت‌ها در هر مرحله تولید بازرسی می‌شوند تا معایب از بین بروند.

۹.۴.۱ مفهوم مدیریت ۱۰۰ درصد

این روش بازرسی تمام قسمت‌ها در هر مرحله تولید بازرسی ۱۰۰ درصد خوانده می‌شود. نتیجه کنترل کیفیت کامل است.

قبل از حمل، تولیدات باید تحت بازرسی خروج قرار گیرند. این شامل سه واحد نمونه از هر بخش (یعنی تولید یک روز برای آن مدل) برای بازرسی و ثبت نتایج می‌شود. جدول ۹.۱ فهرستی از موارد مورد بازرسی را نشان می‌دهد.

گشتاور نگهدارنده یک مورد برای بازرسی نمونه‌هاست. با اینکه مهمترین مشخصه عملکرد می‌باشد، مورد بازرسی ۱۰۰ درصد قرار نمی‌گیرد. همانطور که پیشتر اشاره شده گشتاور نگهدارنده تا حد زیادی توسط فاصله هوایی روتور / استاتور معین شد. از اینرو، بجای آزمایش گشتاور نگهدارنده برای تمام واحدها، ابعاد مکانیکی مربوط به فاصله هوایی مورد بازرسی قرار می‌گیرند. اگر تجهیزات و فرایندهای تولید بخوبی مدیریت شوند، می‌توانیم قابلیت بالایی از فرایندها و از اینرو انحراف استاندارد کمی را در گشتاور نگهدارنده انتظار داشته باشیم. هدف از بازرسی‌های نمونه بیرون آوردن تولیدات معیوب نیست بلکه بررسی تغییرات بخش به بخش می‌باشد. اگر روند نامطلوبی تشخیص داده شود، بازرسی می‌شود تا دلیل آن معلوم شود و سپس روشهای مناسب اعمال می‌شوند.

۹.۴.۲ مدیریت قالب

قالب‌های فلزی بکار رفته در مهرزنی برای سازنده‌های موتورهای پله‌ای دارای اهمیت می‌باشند. از اینرو توجه زیادی به مدیریت قالب‌ها و عملیات مهرزنی می‌شود. کارخانه Aoki مجموعه‌ای از حدود ۳۰ نوع قالب‌های فلزی برای استاتورها و روتورهای دارد.

جدول ۹.۱. مشخصات ساخت (قطعه)

شماره	عنوان	مقدار نامی	نکات
۱	تعداد فازها	۲	---
۲	زاویه پله	$1/8^\circ$	---
۳	روش تحریک	دوفاز در تحریک	---
۴	ولتاژ درایو	۴/۲V(DC)	---
۵	جریان نامی	۱A بر فاز	---
۶	مقاومت سیم پیچی	$4/2\Omega \pm 10\%$	در 25°C
۷	اندوکتانس سیم پیچی	$4/5\text{mH} \pm 20\%$	در 1V(r.m.s) kHz
۸	گشتاور نگهدارنده	بیش از $0/24\text{Nm}$	در ۱A بر فاز
۹	گشتاور چته	بیش از $0/18\text{Nm}$	در ۲۰۰ پالس بر ثانیه
۱۰	نرخ راه اندازی ماکزیمم	۳۲۰۰ پالس بر ثانیه	---
۱۱	نرخ چته ماکزیمم	۳۲۰۰ پالس بر ثانیه	---
۱۲	دقت موقعیت	$\pm 0/054^\circ$	---
۱۳	افزایش دما	کمتر از 80°C	---
۱۴	کلاس عایق بندی	کلاس B	---
۱۵	مقاومت عایق بندی	بیش از $100\text{M}\Omega$	با استفاده از ۵۰۰V DC مگامتر برای اندازه گیری در طول سیم و قاب
۱۶	قدرت دی الکتریک	۵۰۰V	بین سیم و قاب با AC ۵۰/۶۰Hz بدون نقص در ۱ دقیقه
۱۷	جهت چرخش		(روش آزمایش در اینجا حذف شده است)
۱۸	گشتاور گیره	کمتر از $0/03\text{Nm}$	---
۱۹	تفاصل شعاعی	کمتر از $0/03\text{mm}$	هنگامیکه وزنه ۴۵۰g آویزان شده است.
۲۰	تفاصل انتهایی	کمتر از $0/075\text{mm}$	هنگامیکه وزنه ۹۲۰g آویزان شده است.
۲۱	جرم	۳۵۰g نامی	---
۲۲	اینرسی روتور	$10/5\text{mg m}^2$ نامی	---

(۱) عناوین ۱۰-۶، ۱۲، ۱۳، ۱۸ در آزمایش نمونه بدست آمده‌اند.

(۲) عناوین ۱۱، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ روی کل بخش انجام گرفته‌اند.

(۳) روش های تست برای عنوان ۱۹ و ۲۰ بستگی به مورد دارند.

(۴) عناوین ۲۱ و ۲۲ برای آزمایش نیستند.

(۵) در خط تولید آزمایش های مختلف دیگری انجام می شوند.

قالب‌های فلزی برای سازنده پرهزینه هستند و تعداد کارخانه‌هایی که می‌توانند قالب‌های فلزی با دقت بالا بسازند محدود است. با اینکه، در برخی موارد، سازنده موتور قالب‌های فلزی خود را تولید می‌کند، این موارد استثناء هستند و عمومیت ندارند و معمولاً به چند مدل محدود است. در اثر استفاده، لبه‌های قالب‌ها از بین می‌روند. این موضوع نه تنها باعث کاهش دقت ماشینکاری دندانها می‌شود، بلکه فشار بیشتر اعمالی به لبه‌های ورقه باعث مشخصه‌های مغناطیسی نامناسب می‌شود، که در مقابل روی مشخصه‌های تعیین موقعیت و گشتاور موتور اثر می‌گذارد. قالب‌ها از اینرو باید برای داشتن لبه‌های تیز دوباره سائیده شوند، بطور مثال، هر یک میلیون ورقه یا بیشتر یکبار (بسته به نوع ورقه فولادی).

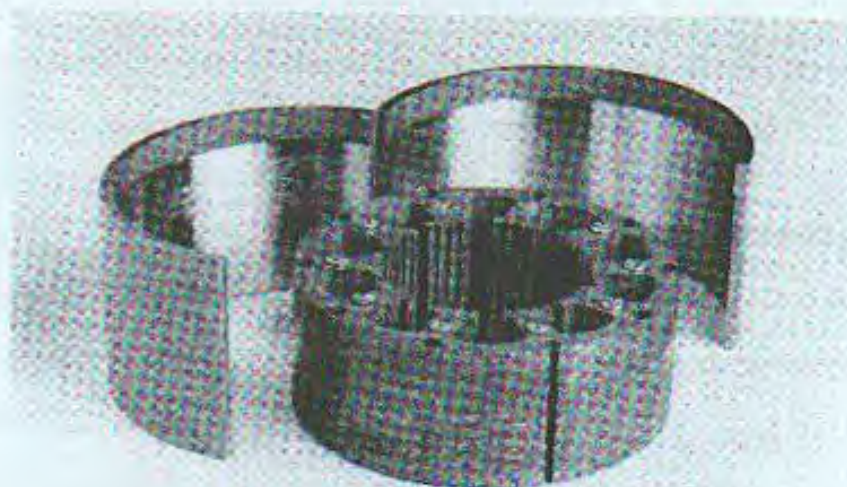
۹.۴.۳ مدیریت تجهیزات اندازه‌گیری

ابزارهای اندازه‌گیری قابل اطمینان در کنترل کیفیت موتورها ضروری می‌باشند. این ابزارها را می‌توان به آنهایی که در ساخت محصول یا مرحله طراحی بکار رفته‌اند، و آنهایی که برای بازرسی ورود (قطعات) و خروج (تولیدات) بکار رفته‌اند، تقسیم کرد. همچنین آنها را می‌توان بر حسب اینکه مکانیکی یا الکتریکی هستند طبقه‌بندی کرد. تمام ابزارهای اندازه‌گیری متناوباً آزمایش و تنظیم می‌شوند. در Sanyo Denki، هر ابزار اندازه‌گیری با دو درجه بر اساس اینکه هر ۱۲ ماه یا هر ۶ ماه آزمایش شده مشخص می‌شود.

۹.۴.۴ مدیریت قدرت مکانیکی و چسبناکی

تحقیق و آزمایش حد شکست موتور در طول فاز ساخت محصول انجام می‌شود. برای مثال، قدرت پیوستگی بین هسته روتور و محور باید مورد آزمایش قرار گیرد. در یک آزمایش، مجموعه‌های روتور تا 300°C گرم می‌شوند تا انواع چسب‌ها آزمایش شود. در آزمایش دیگر، مجموعه متناوباً به دماهای بالا (200°C) و پایین (-30°C) می‌روند، که تغییر شکل‌هایی بخاطر انبساط‌ها و انقباض‌های گرمایی بوجود می‌آیند. سپس روتور برای مشخصه‌های چپته یا گشتاور مورد آزمایش قرار می‌گیرد. اطلاعات حاصل برای انتخاب چسب مناسب و روش ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، بطوریکه مشخصه‌های موتور با مشخصات آن تحت شرایط مختلف محیطی تطابق داشته باشد.

هسته و محفظه استاتور نیز با چسب اتصال می‌یابند و نفوذ چسب باید بررسی شود. بیش از ایجاد قدرت مکانیکی، در اینجا چسب اساساً برای کنترل لرزش‌ها بکار رفته است. اگر نفوذ چسب ضعیف باشد، فاصله‌های باقیمانده بین محفظه و هسته، منجر به لرزش موتور می‌شود. برای تعیین



شکل ۹.۱۹. بررسی نفوذ چسب.

بهترین روش بکارگیری چسب، نمونه‌های پیوسته تحت شرایط مختلف بریده می‌شوند و نفوذ چسب بررسی و بازرسی می‌شود (شکل ۹.۱۹).

چسب‌ها را می‌توان بر اساس اینکه به چه طریقی سفت می‌شوند به سه نوع تقسیم کرد: با حرارت (سفت شدن با حرارت^۱)، اشعه‌های UV، یا در بی‌هوایی^۲. چسب‌های خاصی در سه حالت سفت می‌شوند. با اینکه هر نوع موتور دارای ملزومات متفاوتی خواهد بود، قابلیت نفوذ چسب، سرعت سفت شدن، و قدرت فاکتورهای کلی هستند که باید به هنگام انتخاب مورد توجه قرار گیرند. چسب‌های سفت شونده در بی‌هوایی به هنگام نفوذ به فاصله‌های هوایی باریک که هوا نمی‌تواند به آن‌ها برسد، سفت می‌شوند. قسمت اضافی که در معرض هوا قرار دارد سفت نمی‌شود و باید شسته شود. برای پیوستگی بین استاتور و محفظه، اغلب از اپکسی^۳ سفت شونده با حرارت استفاده می‌شود. ذرات اپکسی پیوند هیدروژنی قوی با سطوح فلزی اکسید شده استاتور و محفظه بوجود می‌آورند.

۹.۵ توضیحات پایانی

در کنار موتور القایی قفس سنجایی، موتور DC، و موتور بدون جاروبک، موتور پله‌ای جایگاه خود را در میان موتورهای کوچک تثبیت کرده است. در میان انواع مختلف موتورهای پله‌ای، نوع هیبرید ظاهراً نقش خود را بعنوان یک محرک با کنترل دیجیتالی با کارایی و تفکیک بالا حفظ کرده، و استفاده از آن در وسایل مختلفی که زندگی مدرن ما را پشتیبانی می‌کنند ادامه دارد.

1- thermosetting

2- anaerobically

3- epoxy

با اینکه تولید موتورهای پله‌ای بدون شک بطور فزاینده‌ای خودکار خواهد شد، دلایل چندی برای اینکه چرا تولید کاملاً غیر انسانی در آینده نزدیک اتفاق نخواهد افتاد وجود دارد. یکی از دلایل این است که حتی تجهیزات خودکار هم به اپراتورهای انسانی نیازمندند. دلیل دیگر این است که مشخصه‌های موتور پله‌ای بشدت دقیق هستند و نمی‌توان آنها را با روش‌های نظری با استفاده از فرمول‌های ساده ریاضی پیش‌بینی کرد. از اینرو، موتور ساخته شده توسط یک کمپانی مشخصه‌های یکسان با موتوری که توسط کارخانه دیگری ساخته شده نخواهد داشت حتی اگر از نظر مواد و ابعاد مشابه هم باشند، به این خاطر که مشخصه‌ها نیز از فرایند ساخت مورد استفاده اثر می‌پذیرند.

توضیح پایانی مربوط به روابط مشتری است. در صنعت ساخت، حروف QCD^۱ مخفف کیفیت، هزینه، و تحویل می‌باشند. کنترل کیفیت، توسعه تکنولوژی تولید با هزینه‌های کمتر، و حفظ یک برنامه تحویل دقیق آسان‌تر می‌شوند اگر که کل فرایند ساخت توسط تنها یک کارخانه، همچون کارخانه Aoki، مورد نظارت واقع شوند.

عملکرد و قابلیت اطمینان بالا نه تنها با مواد، قطعات، و ساخت، بلکه با مهارت کسب شده در طول سالها تجربه در طراحی، ساخت، و کنترل کیفیت تضمین می‌شود. ممکن است خواننده موتور پله‌ای مورد استفاده در محیط‌های با خلاء را بیاد آورد که در فصل قبلی مورد بحث قرار گرفت. در ساختار اصلی، این موتور از موتورهای معمولی متفاوت نیست. چیزی که طراحی و ساخت چنان موتورهای با خلاء بالایی را ممکن می‌سازد انتخاب مناسب مواد، روش‌های ساخت و کار می‌باشد.

از نظر هزینه، هزینه هر واحد برای مشتری معنی بیشتری دارد. اگر موتور عملکرد قابل اطمینان بالایی داشته باشد، عملکرد وابسته به آن را در وسایل مربوط به موتور را تضمین می‌کند. پس این امر تولید پایدار از آن وسیله را ممکن خواهد ساخت، که باعث کاهش هزینه برای مشتری می‌شود.

حفظ برنامه تحویل دقیق هم اهمیت دارد. برای این منظور، برنامه‌ریزی ساخت دقیق، بر اساس سفارشات مشتری و پیش‌بینی دقیق تقاضا، و فهم درست مراحل فرایند، ضروری می‌باشند. برای ساخت موفقیت‌آمیز ۴۰۰ - ۳۰۰ موتور با مشخصات مختلف به‌روش معمول، و برای عمل به تاریخ‌های تحویل، لازم است تا به کیفیت تولید قابل اطمینانی در هر مرحله برسیم و انتقالی روان به مرحله بعدی داشته باشیم. ساخت با نظارت شدید بر کل فرایند در یک کارخانه واحد از این جهت هم دارای برتری‌هایی است.

از اینرو، محصول پایدار و کیفیت بالا اتحاد سه‌گانه کیفیت، هزینه، و تحویل می‌باشد و تقویت آنها بستگی به مسئولیت اجتماعی سازنده دارد.



فهرست راهنما

الف

۷۲، ۲۲ نوع کمیاب در زمین	۲۹۲ ایکسی، سفت شونده با حرارت
۱۲۴ اینرسی	۱۶۲-۳۶۷-۸ اتصالات حلقه
۲۱۴ انعکاسی	۱۶۲-۳۶۷-۸ پنج ضلعی
۱۲۸ بار	۱۶۲-۳۶۷-۸ مثلث
۱۳۴ نسبت های اینرسی	۶۷-۸ اتصالات ستاره
ب	اشباع مغناطیسی
۱۶۸ برگشت فاز	آثار ۸۸
۲۱۵ بلند کردن	نحوه ۸۵
پ	آشکار ساز جهت ۲۳۵
۱۳۳، ۱۱۵ پاسخ شاخص	اشمیت تریگر ۱۶۸
۱۹۲ بتانیومرها، بدون اتصال دقیق	الزایش سرعت ۲۰۳-۶
۱۷۲ پردازنده های Z80	خطی ۲۰۳
۱۷۲ رجیسترها در	نمایی ۲۰۵
۱۸۵ فهرست برنامه به زبان اسمبلی	القای متقابل ۹۳
۱۹۴ پس زنی	آلیکو ۲۲
۲۱۵ پیچ هدایت	آلومینم ۲۸۵، ۲۸۱
ت	الروزی مغناطیسی ۸۶
۹۵ تبدیل انرژی، قانون اساسی	انکدرها ۲۴۴
..... تحریک	نوری ۲۴۴، ۲۱۹، ۱۹۲
تکفاز ۱۱۵، ۶۰، ۳۰	اتمیشن ۲۶۵-۷
توالی سازهای منطقی برای ۱۴۳	آهن، بودر آهن ۲۸۱
در روش عملکرد ترکیبی ۲۲۶	آهنرباها
دو فاز در تحریک ۱۱۵، ۶۱	دائمی
توالی سازهای منطقی برای ۱۴	در موتورهای پله ای - تکفاز ۷۱
مقایسه بین روش ها ۶۱-۳	
موتورهای هیبریدی پنج فاز ۶۷	

۲۴۷.....	جوهر افشان	۶۴.....	موتورهای هیبرید دو فاز
۲۴۷.....	حباب افشان	۶۷.....	موتورهای هیبرید سه فاز
۲۴۷.....	سریال	۶۳.....	نیم پله
۲۳.....	گردونه دیزی	۶۰،۴۹.....	یکفاز در تحریک
۲۴۷.....	لیزری	۲۹۳.....	تحويل
۲۶۲.....	پرغش آینه	۱۹۹.....	ترازوهای فنری
۲۹۱.....	چسب‌ها	۱۹۳.....	تزویدج‌ها
	ح	۱۹۴.....	پس زنی در
	حافظه ROM	۱۹۳.....	دمی شکل
۱۵۴-۷.....	حذف کننده‌ها	۱۹۳.....	لاستیکی
۱۵۵.....	خازنی	۱۹۳.....	مستقیم
۱۵۵.....	دیود زفر	۲۱۴.....	نسمه‌ها
۱۵۴.....	دیودی	۲۱۵.....	درایو جسمی توسط
۱۵۴.....	دیودی / مقاومتی		تشدید
۲۴۴.....	حس جریان (تشخیص)	۱۲۵.....	فرکانس پایین
	خ	۱۲۶.....	فرکانس میانی
۱۲۸.....	خازن‌ها	۲۵۹،۲۰.....	تکنولوژی نیمه هادی
۱۵۵.....	بعنوان حذف کننده‌ها	۲۰۰.....	تشخ‌سج‌ها
۱۵۶.....	بعنوان میراکننده‌های الکتریکی	۱۴۰،۵۲.....	توالی‌سازهای منطقی
۲۴.....	خطاهای تعیین موقعیت	۱۴۴.....	برای درایو پل موتورهای هیبرید دو فاز
۳۵.....	خطای موقعیت پله	۱۴۳.....	برای موتورهای دو فاز
۳۵.....	دقت موقعیت	۲۳۶.....	در سیستم‌های حلقه بسته
	د	۱۴۳.....	دو جهت
۱۶۲.....	PWM درایوهای	۱۷۹،۱۴۵-۵۲.....	ریزپردازنده‌ها بعنوان
۷۰.....	درایو ریز پله	۱۴۴.....	یونیورسال
	درایوهای	۱۴.....	تیراترون‌ها
۱۱۲.....	با منبع جریان		ج
	با منبع ولتاژ	۲۱۶-۷.....	جدول تبدیل
۱۱۰.....	تحریک تک فاز در	۲۶۵.....	جلوه‌های ویژه دوربین
۱۱۵.....	تحریک دو فاز در		چ
۲۴۴،۱۶۵.....	برشگر	۲۲۷.....	چاپگرها

ف	۲۴۴	مشورهای موقعیت
فازها	۵۵	سیستم کاغذ رسان
Ph1	۱۳۹، ۲۷-۳۲	سیستم های کنترل حلقه سباز
تعریف	۳۷-۳۸	ترکیب سیستم
شمارنده های فاز	۱۵۳-۶۷	درایورهای موتور در
فاصله هوایی، روتور استاتور	۱۵۳	اتصال توالی سازها و
فرکانس چرخش	۱۵۸	بهبود ظهور جریان در
ماکزیمم	۱۶۲	درایو مشولاسیون پهنای پالس
فرکانس راه اندازی، ماکزیمم	۱۵۸	دو و شاز
فواصل پالس	۱۶۵	کاربرد درایو پرشگر
برنامه برای محاسبه	۱۵۳	مشکلات مربوط به
در افزایش خطی سرعت	۱۷۱	کنترل افزایش و کاهش سرعت
در کاهش خطی سرعت	۱۶۷	کنترل های ورودی در
	۱۶۸	برای میراکننده های الکترونیکی
	۱۶۷	تک پله
ق		سیستم های کنترل حلقه بسته
قابلیت گذردهی	۲۳۲-۴۱	یا استفاده از ریزپردازنده ها
پنهایت	۲۴۴	برای موتورهای رلوکناکس متغیر
ثابت	۲۴۱	بنوان سروموتور
قلب هاد مدیریت	۲۲۳	مدارات مجتمع برای
قانون مداری آمپر	۲۱۹	مزایا
قرقره ها		سیم پیچی های
قطب ها	۵۸	تک رشته ای
ک	۵۸، ۴۶	دو رشته ای
کارت خوانها		ش
کاهش سرعت	۲۳۷	شمارنده خطا
خطی	۲۳۶	شمارنده های موقعیت
کیی کننده ها	۲۸۰	شیار دار کردن
کلمه پرداز، گردونه کاراکتر		ص
اجرای پیش آموزش	۲۳۸	صفحه اتصال
برنامه اصلی برای	۲۴۱	
کنترل های ورودی	۳۲	ع
	۲۷۳	عرض بسته

۲۴ نگهدارنده

مشخصات

ل

۵۶ لغزنده

۲۲۷ لوازم جانبی کامپیوتر

م

۲۸۲ ماشینکاری اتصال - تویی

۲۵۴، ۱۹، ۱۵ ماشین های NC

۲۵۴ دوزندگی

۱۹ طراحی خودکار

۲۵۹ فاکسی مایل

۲۵۴ فرزکاری

۲۵۴-۶ فلایدوزی

۲۶۲ ماهواره

۲۸۱-۳ محفظه ها

۱۱۷ معادله مشخصه

۱۵۸، ۱۲۸ مقاومت، سری

۱۲۰ منحنی چرخش

۲۵۰، ۵۶ موتورهای خطی

۵۶ PM

۵۶ VR

۴۷-۵۲، ۱۶ موتورهای هیدر

۱۶۱، ۱۲۷، ۵۰ پنج فاز

۲۷۶ فلوجارت تولید برای

۹۴ تولید گشتاور استاتیک در

۵۰ چهار فاز

۲۳۲ سیستم حلقه بسته با کنترل میکروپروسسوری

دو فاز، درایو بل

۱۰۰ ساختار دندانه در

۴۷ ساختار روتور

۲۶۹-۹۳ ساخت

۲۹۳، ۲۸۹ کنترل کیفیت

۸۶-۷ کوادری مغناطیسی

۹۰ اصل کوادری مغناطیسی

گ

۲۳ گردونه های دیزی

۲۸۴ گردی

گشتاور

۱۹۲ استاتیک

۲۰۲ اصطکاکی

۱۲۸ بار

۱۹۶ ترمز کننده

۱۹۱ ترانسیدوسرهای گشتاور

۱۹۵ توقف

۱۲۰ چسب

۱۶۵ افزایش، با استفاده از درایو برشگر

۱۹۸ اندازه گیری

۱۳۰ با مبرایی چسبندگی

۱۲۹ با مبرایی چسبندگی صفر

۱۲۵ تشدید فرکانس پایین

۱۹۳ تغییرات، با تغییر ترویج ها

۱۲۶ ناپایداری های محدوده میانی

۱۲۹ نوسانات محدوده بالاتر

۷۶ راه اندازی، ماکزیمم

۱۳۰ فرورفتگی های گشتاور

۹۸ گشتاور پایدار

۱۲۰ منحنی های گشتاور - سرعت

۱۲۲ پارامترهای موتور بر

۲۰۰ موتور

۲۰۶ رابطه با نرخ افزایش سرعت

۲۰۱ معادله دینامیک برای

۱۹۲ نسبت های گشتاور بر اینرسی

۳۷..... طبقه بندی	۲۷۷..... استاندارد و روتور
۱۵۰..... صفحه ای	۲۸۹..... بازرسی نمونه
۲۴..... فاکتورهای اقتصادی برای تولید	۲۸۹، ۲۸۱..... برکت ها
۲۴۷-۶۶..... کاربردها	۲۷۵..... پیش سازی
۲۶۴..... در ابزارهای زمان سنجی	۲۸۵..... تمیز کاری
۲۵۹..... در تکنولوژی نیمه هادی	۲۷۱..... تولید انبوه
۲۶۵..... در جلوه های ویژه	۲۷۱..... تولید گروهی
۲۵۷..... در کپی کننده ها	۲۸۵..... نه بندی کلاف
۲۵۴..... در کنترل عددی	۲۸۲..... دقت ماشینکاری
۲۵۹..... در ماشین های فاکسی مایل	۲۸۵..... روپوش دار کردن
۲۶۲..... در وسایل نقلیه فضایی	۲۸۷..... سرهم بندی قطعات
۱۰..... مزایا	۲۸۵..... سیم پیچی کلاف
۹-۱۰..... مشخصه های اساسی	۱۶..... موتورهای با خامن چرخ دنده سیمولهای
۲۶۹..... فلسفه طراحی کارخانه	موتورهای پله‌ای
۲۷۶..... فلوجارت برای	۱۶..... الکترومغناطیسی
۲۸۹..... کنترل کیفیت	۱۵..... الکتروهیدرولیک
۲۷۵..... کوچک سازی موتورها	۵۴..... با آهنربای دیسکی
۲۸۷..... تعاب کاری	۵۲..... بایشته قوطی شکل
۲۸۱-۳..... محفظه	۵۵..... با روتور بیرونی
۲۸۰..... محور	۵۵..... با روتور درونی
۲۹۱..... مدیریت ابزار اندازه گیری	۱۱-۲۴..... تاریخچه
۲۹۱..... مدیریت چسب کاری	۱۱-۳..... قبل از دهه ۱۹۶۰
۲۸۹..... مدیریت قالب	۱۳-۷..... دهه ۱۹۶۰
۲۹۱..... مدیریت قدرت مکانیکی	۱۷-۲۳..... دهه ۱۹۷۰
۲۷۲..... مشخصات مکانیکی	۷۱..... تک فاز
۲۸۷..... مفناطیده کردن	۷۱-۲..... با فاصله هوایی نامتقارن
۲۶..... موتورهای PM	۱۱۰-۵..... توابع تبدیل
۱۱۹..... در مقایسه با موتورهای VR	۱۱۰..... تعریف
۵۲..... دندانه پنجاهی	۱۱۵..... مرتبه دوم
۱۰۳-۸..... مشخصه های دینامیک، معادلات	۱۱۶..... مرتبه سوم
۱۰۳..... مدل برای	۹۹..... ساختار دندانه در

موتورهای VR

۱۳۱..... ساختار	تک پشته ای..... ۴۴
۲۵۴..... میزهای رانندگی	تولید گشتاور استاتیک در..... ۷۹
۲۵۴..... میزهای -XY..... موقعیت	آثار لغزش متقابل در..... ۹۳
۳۴..... تعادل	اشباع مغناطیسی در..... ۸۵
۳۴..... سکون	در حالت با قابلیت گذردهی پهنای..... ۷۹
۳۵..... گیره	در حالت با قابلیت گذردهی ثابت..... ۸۴
۲۲۵..... مولد ساعت	چند پشته ای..... ۴۴
ن	چهار فاز..... ۴۱
ناپایداری ها	در مقایسه با موتورهای PM..... ۱۱۹
آثار تغییرات پارامتر سیستم روی..... ۱۲۸	دندانه ها روی یک قطب..... ۴۰
تئوری..... ۱۲۹	سه فاز، با سیم پیچی دو رشته ای..... ۴۱
فرکانس میانی..... ۱۲۶	فاصله هوایی در..... ۴۰
محدوده بالابر..... ۱۲۹	مشخصه های دینامیک..... ۷۵
محدوده میانی..... ۱۲۶	معادلات اساسی..... ۱۰۸
نرخ چرخش، ماکزیمم..... ۷۵	میدان های مغناطیسی
نمادها، جدول..... ۸۰	تک قطبی..... ۴۵
نمو..... ۳۰	ناهم قطب..... ۲۵
حرکت نموی..... ۳۰	میراکنندگی (میرایی)
بدون توسان..... ۳۰-۱	چسبندگی..... ۱۳۰
کنترل حرکت نموی	ضریب میرایی..... ۱۱۵
نوارخوان ها..... ۳۲	میراکننده ها..... ۱۳۱-۳۰۱۲۹
و	آثار..... ۱۳۳
هزینه، کنترل..... ۲۹۳	الکترونیک
هسته ها	با آخرین یله ناخبردار..... ۱۶۹
ساختار برجسته دو طرفه برای..... ۹۱	بازرخ پالس ثابت..... ۱۶۹
ساخت..... ۲۷۷	کنترل های ورودی برای..... ۱۶۸
هم مرکزیت..... ۲۸۳	اینرسی آهنربایی «اصطکاک»..... ۱۳۱
	اینرسی با توزیع چسبندگی (VCID)..... ۱۳۱
	اینرسی فیزی - اصطکاک..... ۱۳۱
	تئوری..... ۱۳۳

فهرست برخی از کتب منتشر شده انتشارات آشینا

عنوان	مؤلف	مترجم
(۱) مقاومت مصالح (دو جلدی)	بیر-جانستون	موتابی
(۲) تشریح مسائل مقاومت مصالح (دو جلدی)	بیر-جانستون	موتابی
(۳) ایستایی (ویرایش چهارم)	مریام-کرایگ	موتابی
(۴) تجزیه و تحلیل مسائل ایستایی (ویرایش چهارم)	مریام-کرایگ	مجمع علمی گروه مکانیک
(۵) تشریح مسائل مبانی ترمودینامیک کلاسیک (I) (ویرایش پنجم)	ون وایلن-زونتگ	مجمع علمی گروه مکانیک
(۶) اصول و کاربرد سنسورها	پیشراپتمن	تقی زادگان
(۷) تشریح مسائل مدارهای میکروالکترونیک (دو جلدی) (ویرایش چهارم)	سدره-اسمیت	خامنیان-اعلم شامی
(۸) تشریح مسائل مدارهای مخابراتی	کلارک-هس	خامنیان-راسخی
(۹) طراحی اجزاء ماشین (دو جلدی)	اسپاتز	موتابی
(۱۰) تشریح مسائل طراحی اجزاء ماشین	اسپاتز	مجدوبی
(۱۱) تشریح مسائل و متمع معماری کامپیوتر (ویرایش سوم)	موریس مانو	فتحی-سروش
(۱۲) پیرامون ماشینهای افزار (۱) تراشکاری	جان والگر	موتابی
(۱۳) پیرامون ماشینهای افزار (۲) فرزکاری	جان والگر	موتابی
(۱۴) پیرامون ماشینهای افزار (۳) ابزار تیزکنی و صفحه تراشی	جان والگر	موتابی
(۱۵) تشریح مسائل ترمودینامیک مهندسی شیمی	اسمیت ونس	صنعتی
(۱۶) مجموعه مدار برای جوانان (جلد ۳)	بخت آور	—
(۱۷) مجموعه مدار برای جوانان (جلد ۴)	بخت آور	—
(۱۸) خودآموز مصور برق برای مبتدیان	خیابانی	—
(۱۹) راهنمای جامع انگلیسی برای دانشجویان علوم انسانی (۲۰۱)	نوروزی-بیرجندی	موتابی
(۲۰) راهنمای جامع انگلیسی برای دانشجویان کشاورزی (۲۰۱)	مفتون	موتابی
(۲۱) راهنمای جامع تمریناتی در درک مطلب خواندن	Tibbitts	موتابی
(۲۲) کنترل کیفیت کالا	احدی نیا	—
(۲۳) موتورهای پله‌ای و کنترل میکروپرسوری آنها	کنجو-سوهاوارا	تقی زادگان
(۲۴) تشریح مسائل تکنیک پالس	برزگرزاده	—
(۲۵) تشریح مسائل مبانی ترمودینامیک کلاسیک (II) (ویرایش پنجم)	ون وایلن-زونتگ	مجمع علمی گروه مکانیک
(۲۶) تشریح کامل مسائل سیگنالها و سیستمها (ویرایش دوم)	اوپنهایم	راسخی
(۲۷) تشریح کامل مسائل تحلیل مهندسی مدار (I) (ویرایش پنجم)	هیت	تقی زادگان
(۲۸) تشریح کامل مسائل تحلیل مهندسی مدار (II) (ویرایش پنجم)	هیت	تقی زادگان
(۲۹) میکروکنترلر 8051 سخت افزار، نرم افزار و ارتباطدهی	ج. استیوارت	خامنیان

