

۱-۳- موتور پله‌ای چیست و مشخصه های اساسی آن کدامند؟

شکل ۱-۱ مقطع عرضی ساختار یک موتور پله‌ای مدرن نمونه را نشان می دهد؛ این موتور به نام موتور رلوکتانس متغییر تک پشته ای^۱ خوانده می شود. ما ابتدا با استفاده از این شکل نحوه عملکرد این ماشین را مطالعه خواهیم کرد. هسته استاتور دارای شش قطب یا دندانه برجسته می باشد، 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 شده اند. هر دسته دارای دو کلاف است که بصورت سری متصل شده اند. یک دسته از سیم پیچی ها فاز نامیده می شود، و نتیجتاً این ماشین یک موتور سه فاز است. جریان از یک منبع تغذیه DC از طریق کلیدهای I، II، III به سیم پیچی ها تامین می شود. در وضعیت (۱)، سیم پیچی فاز I از طریق جریان کلید I تغذیه می شود، یا به اصطلاح فنی فاز I تحریک می شود؛ شار مغناطیسی ناشی از تحریک که در فاصله هوایی واقع می شود با پیکانهایی نشان داده شده است. در وضعیت (۱)، دو قطب برجسته استاتور فاز I که تحریک شده اند با دو دندانه از چهار دندانه روتور هم ردیف هستند. این حالت از نظر دینامیکی یک حالت تعادل است. هنگامیکه کلید II برای تحریک فاز II علاوه بر فاز I بسته می شود، شار مغناطیسی در قطبهای استاتور فاز II به حالت نشان داده شده در وضعیت (۲) بوجود

¹. single-stack variable-reluctance motor

می آید، و گشتاوری در جهت عکس ساعتگرد بعثت "کشش"^۱ در خطوط خمیده میدان مغناطیسی بوجود می آید. از اینرو روتور سرانجام به وضعیت (۳) خواهد رسید. از اینرو روتور با یک زاویه ثابت می چرخد، که "زاویه پله"^۲ خوانده می شود، که در این مورد ۱۵ درجه با انجام هر عمل سوئیچینگ است. اکنون اگر کلید I برای تخلیه انرژی فاز I باز شود، روتور ۱۵ درجه دیگر برای رسیدن به وضعیت (۴) حرکت خواهد کرد.

پس موقعیت زاویه ای روتور را می توان برحسب واحدهای زاویه پله از طریق فرآیند سوئیچینگ کنترل کرد. اگر سوئیچینگ به ترتیب انجام شود، روتور با حرکتی پله ای خواهد چرخید؛ سرعت متوسط را هم می توان از طریق فرآیند سوئیچینگ کنترل کرد.

امروزه، ادوات حالت جامد^۳ بعنوان سوئیچ های الکترونیکی در درایو یک موتور پله ای بکار می روند، و سیگنال های سوئیچینگ توسط IC های دیجیتال یا ریزپردازنده تولید می شوند (شکل ۱-۲). همانطور که در بالا ذکر شد، موتور پله ای یک موتور الکتریکی است که ورودی الکتریکی دیجیتال را به یک حرکت مکانیکی تبدیل می کند. در مقایسه با دیگر ادواتی که می توانند اعمال مشابه یا یکسانی را انجام دهند، سیستم کنترلی که از یک موتور پله ای بهره می برد دارای چندین مزیت مشخص بترتیب زیر است:

1. tension

2. step angle

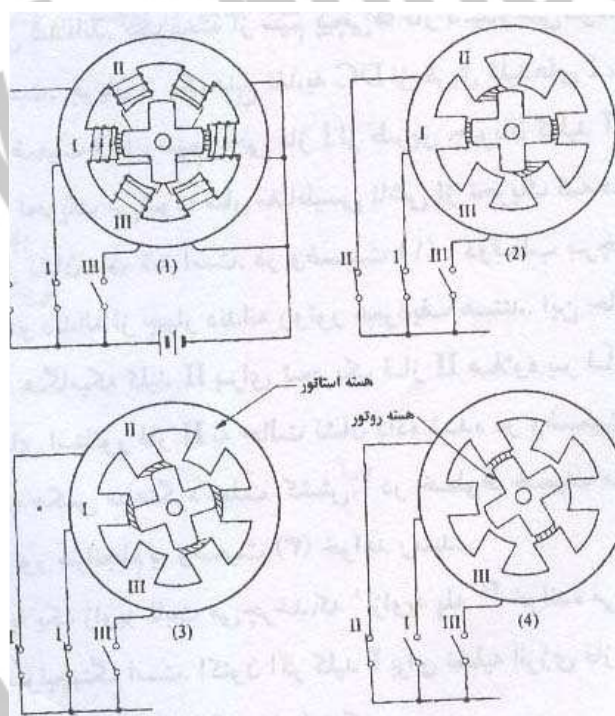
3. solid-state devices

۱. معمولاً به هیچ فیدبکی برای کنترل موقعیت^۱ یا کنترل سرعت نیاز نمی باشد.

۲. خطای موقعیت جمع ناپذیر^۲ است.

۳. موتورهای پله‌ای با تجهیزات دیجیتال مدرن سازگار هستند.

به این دلیل، انواع و کلاس‌های مختلف موتورهای پله‌ای در لوازم جانبی کامپیوتر، دستگاه‌های خودکار، و سیستم‌های مشابه بکار رفته اند.



۲-۳- تاریخچه ابتدایی موتورهای پله‌ای

در شماره ای از JIEE^[1] چاپ سال ۱۹۲۷ مقاله ای با عنوان “کاربرد الکتروسیسته در ناوهای جنگی” وجود داشت، و بخشی از این مقاله یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغییر سه فاز از نوع فوق را تشریح می کرد که برای کنترل از راه دور نشانگر جهت تفنگها و

1. position

2. non-cumulative

لوله های اژدرافکن^۱ در ناوهای جنگی انگلیسی بکار رفته بود. همانطور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده، یک کلیدگردان مکانیکی برای سوئیچینگ جریان تحریک بکار رفته بود. یک دور چرخش هندل شش پالس پله ای تولید می کند که باعث ۹۰ درجه حرکت روتور می شود. حرکت روتور در پله های ۱۵ درجه بمنظور رسیدن به دقت موقعیتی^۲ لازم کاهش می یابد.

در این مقاله اشاره شده بود که در طراحی این موتور پله ای ظاهراً ساده فاکتورهای بسیاری می بایست 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 دست دادن پله دارد، و ثابت زمانی، نسبت اندوکتانس مدار به مقاومت، بایستی کوچک باشد تا به سرعت عملکرد بالایی دست یافت. این مسائل هنوز هم در موتورهای مدرن وجود دارند.

براساس مقاله ای^[۲] در IEEE Transactions on Automatic Control، موتورهای پله ای بعدها در نیروی دریایی ایالات متحده با هدفی مشابه بکار گرفته شدند. با اینکه کاربردهای عملی موتورهای پله ای مدرن در دهه ۱۹۲۰ واقع شد، اشکال اولیه موتورهای رلوکتانس متغیر به واقع از قبل وجود داشتند. در مقاله ای نوشته Byrne^[۳] آمده است: “موتورهای رلوکتانس از نوع پله ای، که اکنون بعنوان ادوات تعیین

^۱. torpedo tubes

^۲. positional accuracy

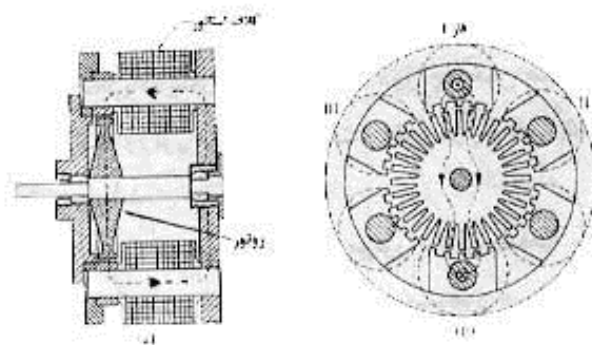
موقعیت^۱ بکار می روند، مثل "ماشین های بخار الکترومغناطیسی"، موتورهای الکتریکی نیمه قرن نوزدهم بودند." ما در اینجا به دو نوع اختراع قابل ذکر در سالهای ۱۹۱۹ و ۱۹۲۰ در انگلستان می پردازیم.

۱- ساختار دندانان ای برای به حداقل رساندن زاویه پله. امتیاز اختراعی در انگلستان در سال ۱۹۱۹ توسط یک مهندس عمران در آبردین، اسکاتلند، بنام C.L.Wakler بخاطر اختراع نوعی ساختار موتور پله ای اخذ شد که قادر بود با زاویه های پله کوچک حرکت کند. هر یک از قطبهای برجسته دارای یک گروه دندانان کوچک است. دندانان های روتور در گام یکسان با دندانان های کوچک استاتور می باشند، هنگامیکه فاز I تحریک می شود و شار مغناطیسی در طول مسیری که با منحنی خط چین روی شکل نشان داده شده واقع می شود، گروههای دندانان ها در این فاز با برخی دندانان های استاتور همانطور که در شکل (b) ۴-۱ نشان داده شده هم ردیف می شوند. در این آرایش، دندانان های روتور و استاتور در فازهای II و III بایستی به اندازه $\frac{1}{3}$ گام دندانان در جهات متقابل ناهمردیف^۲ شوند. هنگامیکه جریان تحریک از فاز I به فاز II سوئیچ می شود، روتور در جهت ساعتگرد به اندازه یک زاویه پله که در این مورد $\frac{3}{75^\circ} = \frac{360}{32}$ می باشد خواهد چرخید. بهر حال اگر جریان تحریک به فاز III سوئیچ شود، چرخش در جهت عکس ساعتگرد با همان زاویه کوچک خواهد بود. Walker در مشخصات اختراع ثبت شده طرحی را برای ساخت نوعی از موتور پله ای

^۱. positioning devices

^۲. out of alignment

که امروزه به نام نوع رلوکتانس متغیر چند پشته‌ای خوانده می شود به همراه طرح‌هایی برای ساخت یک موتور خطی ارائه کرد. بهر حال در دهه ۱۹۵۰ بود که موتورهای پله‌ای مدرن که از اساس این اختراع بهره می بردند بصورت تجاری عرضه شدند.



شکل ۱. یک موتور پله‌ای سه فاز اختراع شده توسط C.L. Walker

۲- تولید گشتاوری بزرگ از یک ساختار ساندویچی. C.B.Chicken و J.M.Thain در نیوکاسل در تین^۱ به سال ۱۹۲۰، امتیاز اختراعی را در آمریکا^[5] بخاطر اختراع یک موتور پله‌ای که می توانست گشتاور بزرگی به ازای واحد حجم روتور تولید نماید به ثبت رساندند. که ویژگی قابل ذکر آن فولاد نرم روتور است که پی در پی از بین دو هسته الکترومغناطیس متقابل می کند. این ساختار که در آن دندانهای روتور بوسیله دندانهای استاتور احاطه شده‌اند تنها ساختار شناخته شده ایست که می تواند بزرگترین گشتاور را از واحد حجم روتور تولید کند. اما در دهه ۱۹۷۰ بود که یک موتور پله‌ای با بهره گیری از این قاعده بعنوان یک موتور پله‌ای قدرت در ماشین‌های کنترل عددی (NC) ساخت شرکت ژاپنی Fanuc Ltd بکار گرفته شد.

¹. Tyne

۳-۳- 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 ۱۹۷۰، دو گردهمایی بین‌المللی برگزار شد که متخصصین گروههای صنعتی و دانشگاهی از سراسر جهان برای تبادل گزارشات گردهم 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 بین‌المللی ادوات و موتورهای پله‌ای" با ریاست پرفسور P.J.Lawrenson از دانشگاه Leeds انگلستان که تا کنون سه بار (در سالهای ۱۹۷۴، ۱۹۷۶، ۱۹۷۹) برگزار شده است. موتور پله‌ای همچنین به عنوان موضوعی در "کنفرانس بین‌المللی ماشینهای الکتریکی کوچک" که توسط انستیتوی مهندسين برق در لندن به سال ۱۹۷۶ برگزار شد، انتخاب گردید.

۴- طرح کلی موتورهای پله‌ای مدرن

در فصل پیش پیشرفت های 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 می روند 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 می روند تعریف و معانی آنها بررسی خواهد شد.

۴-۱- سیستم های کنترل حلقه- باز

بطور کلی، موتورهای پله‌ای توسط مدارات الکترونیک، اکثراً با منبع تغذیه DC، کار می کنند. موتور پله‌ای در مقایسه با موتورهای معمولی AC یا DC، که اکثراً بطور مستقیم از یک منبع تغذیه درایو می شوند، یک موتور منحصر بفرد می باشد. بعلاوه، موتورهای پله‌ای در کنترل سرعت و موقعیت بدون حلقه های فیدبک پرهزینه کاربرد پیدا می کنند. این روش درایو به نام درایو حلقه- باز خوانده می شود. این بخش به اصول کنترل حلقه- باز موتورهای پله‌ای خواهد پرداخت. جزئیات مدارات الکترونیک عملکرد حلقه- باز در فصل ۵ مورد بحث قرار گرفته اند.

با اینکه کنترل حلقه- باز از نظر اقتصادی روش درایو با صرفه ای است، از محدودیت رها نیست. بطور مثال، چرخش روتور در محدوده های سرعت مشخصی بشکل نوسانی و ناپایدار در می آید، و بخاطر این مشخصه رفتاری، سرعت و شتاب یک موتور پله‌ای کنترل شده توسط یک طرح حلقه- باز نمی تواند به سرعت یک

موتور DC درایو شده توسط یک طرح کنترل- فیدبک باشد. از اینرو، در تلاش برای گسترش محدوده های کاربردی، توقف نوسان مساله ای اساسی است که بایستی حل شود. کنترل حلقه- بسته که روش درایو موثر بدور از ناپایداری بوده و قادر به افزایش سرعت سریع می باشد.

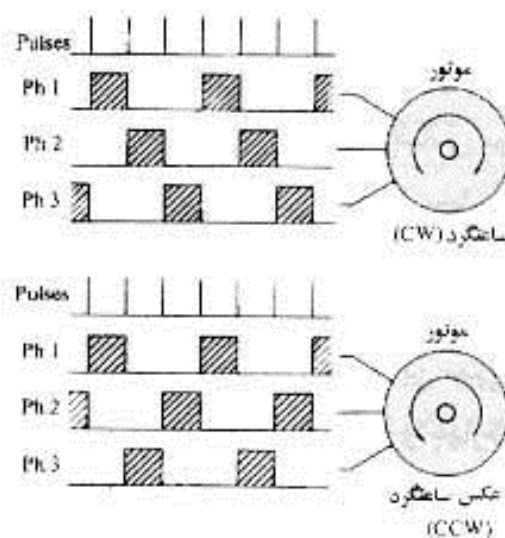
۱-۱-۴- ترکیب سیستم

برای درک ترکیب اساسی سیستم درایو موتور پله ای، درایو یک نوار پانچ را که در ماشینهای کنترل عددی بکار رفته بررسی می کنیم. یک پانچ کننده نوار از یک موتور پله ای برای فرستادن نوار کاغذ استفاده می کند. دستورالعمل های کاری ماشینهای کنترل عددی به شکل سوراخهای ایجاد شده توسط این وسیله ذخیره شده اند. موتور پله ای بکار رفته برای این منظور معمولاً یک موتور دو- سه یا چهار فاز می باشد. در اینجا یک موتور سه فاز شامل سه دسته سیم پیچی را بررسی می کنیم. مهمترین ویژگی موتور پله ای این است که با یک زاویه ثابت به ازای هر پالس اعمال شده به توالی ساز منطقی^۱ می چرخد. مقدار نامی این زاویه (درجه) زاویه پله خوانده می شود.

با دریافت یک پالس دستور پله، توالی ساز منطقی فازی را که باید تحریک (یا انرژی دار) شود و فازی را که بایستی تخلیه انرژی شود تعیین می کند، و سیگنالهایی به درایور موتور که طبقه کنترل کننده جریان تحویلی به موتور می باشد، می فرستد.

¹. logic sequencer

توالی ساز منطقی معمولاً با تراشه های مدار مجتمع TTL یا CMOS ساخته می شود. هنگامیکه پتانسیل یک کانال خروجی توالی ساز منطقی در سطح H (=بالا) می باشد، درایور قدرت برای تحریک فاز متناظر سیم پیچی عمل می کند. بطور مشابه، اگر خروجی در سطح L باشد، فاز همشماره تحریک نمی شود، یا خاموش می شود. 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 سر در جهت ساعتگرد می چرخد اگر از سر دیگر دیده شود بنظر می رسد که در جهت عکس ساعتگرد حرکت می کند. جهت چرخش معمولاً با تطبیق بخشهای مورد نظر معین می شود.



شکل ۲.۳. سری پالسهای ورودی و ترتیب تحریک

در این جا فازها با Ph1, Ph2, Ph3 و غیره نشان داده شده اند. یا PhA, PhB برای برخی موتورهای دو فاز. تحریک بکار رفته در شکل ۳-۲ تحریک تکفاز یا یکفاز^۱ خوانده می شود، 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 می شود. تحریک تکفاز اغلب به منظور تشریح اصول اساسی موتورهای پله‌ای ذکر می شود. اما همیشه بهترین روش درایو کردن نیست.

۲-۱-۴- پله و نمو^۲

داده‌ها در هشت ردیف روی یک نوار ضبط شده اند؛ به این معنی که، در هر خط هشت سوراخهای راهنما^۳ وجود دارند که دندانهای چرخ دنده به آنها وارد می شوند. خطوط در فواصل ۱/۱۰ اینچی (۲/۴۵mm) قرار داده شده اند. هنگام ذخیره داده‌ها روی یک نوار بوسیله نوار پانچ کن دستی یا کامپیوتر، نوار ۲/۴۵mm جلو رانده می شود، برای پانچ یک خط متوقف می شود، و سپس به اندازه ۲/۴۵mm دیگر جلو برده می شود و دوباره متوقف می شود، و همینطور. ساده ترین راه برای پیش راندن نوار به اندازه گام یک خط اعمال یک پالس واحد به توالی ساز منطقی می باشد، به این ترتیب موتور به اندازه یک پله درایو شده، چرخ دنده با زاویه ای معادل یک پله چرخانده می شود، و از اینرو نوار به اندازه ۲/۴۵mm رانده می شود. اما روش دیگر درایو موتور پله‌ای به اندازه چندین زاویه پله برای پیش راندن نوار به اندازه یک خط

1. single-phase or one-phase excitation

2. increment

3. guide holes

است. بعنوان مثال، یک موتور چهار فاز با زاویه پله $1/8^\circ$ را می توان برای پیش راندن نوار به اندازه گام یک خط با چهار پله بکار برد. قطر چرخ دنده به اندازه یک چهارم کاهش می یابد، و در نتیجه، اینرسی چرخ دنده به اندازه $1/256 = (1/4)^4$ برابر از چرخ دنده بکار رفته در روش حرکت تک پله ای کمتر خواهد بود.

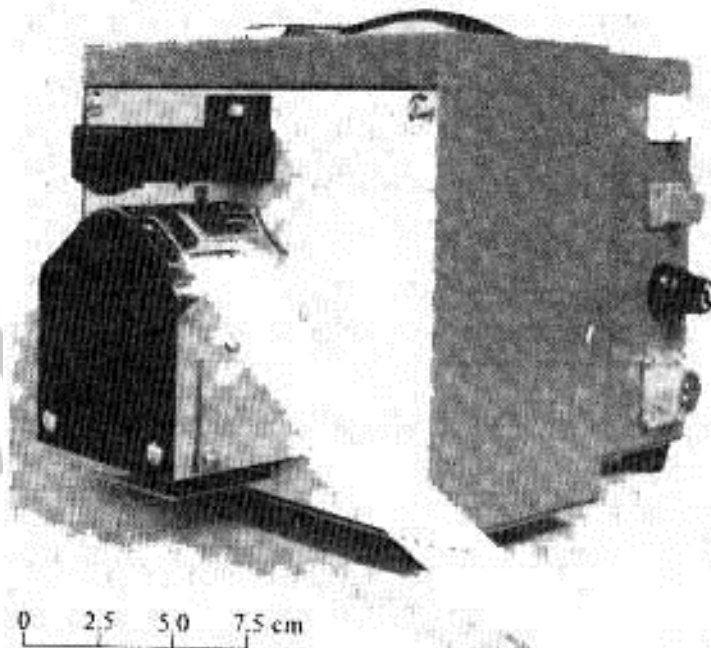
حرکت واحدی که نوار کاغذی را به اندازه یک گام خط، در مورد بالا $2/45\text{mm}$ ، پیش می راند، اغلب یک نمو نامیده می شود. یک نمو توسط یک پله واحد در مثال اول، و با چهار پله در مثال پیش تحقق می یابد. در موتور مدت زمان مشخصی بعد از تکمیل حرکت یک نمو توقف می کند، تا نوار پانچ شود، و این چرخه خود را تکرار می کند. این نوع از حرکت تکراری شروع و توقف "حرکت نموی"^۱ نامیده می شود، و کنترل مربوط به این نوع عملکرد "کنترل حرکت نموی" خوانده می شود.

تعداد پله ها در هر نمو اغلب بیش از چهار می باشد، بطور مثال در نوار خوان^۲ (شکل ۶-۲). هنگامیکه داده روی نوار به کنترلر ماشین کنترل عددی منتقل می شود، عملیات بلوک به بلوک انجام می گیرد. یک بلوک از داده ها متشکل از تعدادی خط یا بایت بطور مثال ۳۲، ۴۸ یا ۶۸ خط، می باشد، و این تعداد برحسب سیستم یا مورد متفاوت است. قبل از اینکه ابزاری حرکت کند، یک بلوک از داده ها به حافظه حالت-جامد کنترلر منتقل می شود، و ابزار بنحویکه در اولیه بلوک داده ها دستور داده شده حرکت می کند. بعد از اینکه آن دستورات کامل شدند، بلوک بعدی داده ها توسط هد

^۱. incremental motion

^۲. tape-reader

خواندن^۱ نوار خوان خوانده می شود. اگر سیستم برای درایو به اندازه یک گام خط در یک پله واحد طراحی شده باشد، و بلوک متشکل از ۳۲ خط یا بایت باشد، هر حرکت از ۳۲ پله تشکیل شده است. اگر یک گام خط با چهار پله درایو شود، یک نمو حرکت با ۱۲۸ پله برای انتقال ۳۲ بیت داده انجام می گیرد. اگر یک حرکت با نمو شامل پله های 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 می شود. کنترلر ورودی قطاری از تعدادی پالس مشخص در فواصل مناسب را پس از دریافت یک سیگنال ورودی ارسال می کند.



شکل ۲۶. نوار خوان.

^۱. read head

۲-۴- ویژگی های موتورهای پله ای از نقطه نظر کاربرد

نگاهی به ویژگی های کنترل حلقه- باز موتورهای پله ای می اندازیم، و چند اصطلاح فنی را تشریح می کنیم.

۲-۱-۴- زاویه پله کوچک و چگونگی دستیابی به آن

یک موتور پله ای با یک زاویه ثابت به ازای هر پالس می چرخد. همانطور که پیش تر توضیح داده شد، مقدار نامی آن "زاویه پله" یا در بعضی کتابها^[1] طول پله نامیده می شود و برحسب درجه بیان می شود. کاهش زاویه پله دقت تعیین موقعیت^۱ را افزایش می دهد. یک ویژگی موتورهای پله ای این است که می توانند یک زاویه پله کوچک را تحقق بخشند. مهندسين به تعداد پله بر دور توجه دارند، که در این جا با S نشان داده شده است و به روشنی زاویه پله θ_s با S طبق رابطه زیر مرتبط است:

$$\theta_s = 360/S \quad (2-1)$$

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

$$S = mN_r \quad (2-2a)$$

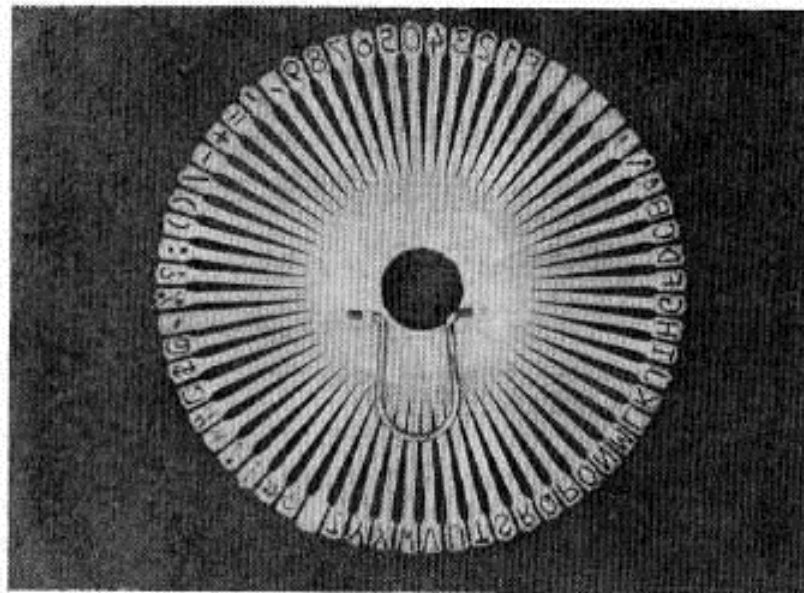
یا برای موتورهای آهنربای دائمی و موتورهای هیبرید که بعداً بررسی خواهند شد

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

¹. resolution of positioning

تعداد معمول فازهای موتورهای رلوکتانس متغیر ۴، ۵ و ۶ می باشد، و معمول ترین موتور هیبرید دو فاز دارد ولی انواع سه و پنج فاز هم موجودند. بطور مثال تعداد زیاد دندانه های روتور، N_r ، ۵۰ یا ۱۰۰ می باشد.

موتورهای طراحی شده به منظور استفاده در درایو گردونه های کاراکتر (شکل ۷-۲) در یک چاپگر یا ماشین تایپ دارای ۹۶، ۱۲۸ یا ۱۳۲ پله بر دور می باشند. یک موتور دو یا چهار فاز استاندارد ۲۰۰ پله دارد. برخی موتورهای دقیق برای دستیابی به یک دور با ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ پله طراحی شده اند. بهر حال، 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 180° می باشد.



شکل ۲.۷. گردونه کاراکتر.

۲-۲-۴- گشتاور بازیابی و نگهدارنده^۱ بالا

موتورهای پله‌ای طوری طراحی شده اند که گشتاور استاتیک بزرگی دارای تولید می شود. این امر موتور را قادر به راه اندازی و توقف سریع و نشان دادن یک گشتاور بازیابی قوی به هنگام جابجایی از موقعیت سکون ناشی از گشتاور بار می کند. همانطور که بعداً بحث خواهد شد، فاصله هوایی بین دندانه های روتور و استاتور تا حد امکان برای این منظور کوچک طراحی شده است. ما اغلب از اصطلاحات گشتاور نگهدارنده، و گشتاور “گیره”^۲ در رابطه با گشتاور استاتیک استفاده می کنیم. 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 می شود.

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

بطور کلی، هرچه گشتاور نگهدارنده بزرگتر باشد، خطای موقعیت ناشی از بار کوچکتر است در حالت ایده آل، گشتاور نگهدارنده از فاز یا فازهایی که تحریک شده اند مستقل است. هنگامیکه تغییرات قابل توجهی دیده می شود، گشتاور نگهدارنده

^۱. restoring and holding torque

^۲. detent

یک موتور حداقل مقدار گشتاورهای استاتیک مینیمم اندازه گیری شده در تمامی حالات ممکن، بطور مثال در سه حالت یک موتور می باشد.

گشتاور گیره تنها در موتور حاوی یک آهنربای دائمی ظاهر می شود.

۳-۲-۴- خطای تعیین موقعیت جمع ناپذیر

دقت در تعیین موقعیت عامل مهمی است که کیفیت یک موتور پله‌ای را مشخص می کند. موتورهای پله‌ای طوری طراحی شده اند که با یک زاویه پله از پیش تعیین شده در پاسخ به یک سیگنال پالس (یا فرمان پله) می چرخد و در یک موقعیت مشخص توقف می کنند. چون دقت در حالت بی باری به دقت فیزیکی روتور و استاتور بستگی دارد، خطای تعیین موقعیت جمع پذیر نیست.

با توجه به موقعیت هایی که در آنها روتور از حرکت باز می ایستد دو مفهوم را در نظر داریم:

۱- موقعیت سکون^۱ یا موقعیت تعادل^۲. بعنوان موقعیتی که در آن یک موتور

تحریک شده در حالت بی باری از حرکت باز می ایستد تعریف شده است.

۲. موقعیت گیره. بعنوان موقعیتی که در آن یک موتور دارای آهنربای دائمی در

روتور خود بدون تحریک در حالت بی باری از حرکت باز می ایستد تعریف شده است.

^۱. rest

^۲. equilibrium

موقعیت های سکون و گیره همواره یکسان نیستند. در برخی کاربردها بدون تحریک سیم پیچی ها بمنظور صرفه جویی در توان از موقعیت های گیره در تعیین موقعیت استفاده می شود.

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

۱. خطای موقعیت پله.

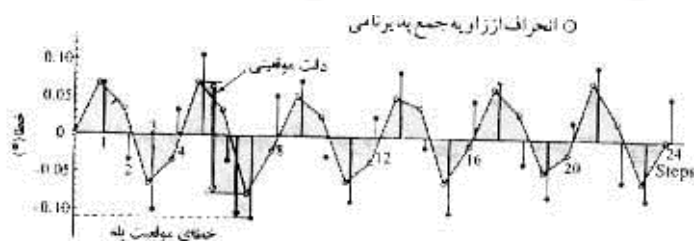
۲. دقت موقعیتی^۱. بعنوان بزرگترین خطای موقعیت زاویه ای در موقعیت سکون با

توجه به زاویه پله جمع پذیر نامی تعریف شده است، که می تواند در یک دور کامل روتور بهنگام حرکت از یک موقعیت سکون مرجع واقع شود.

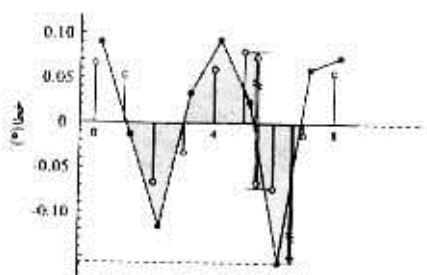
رابطه بین این دو نوع خطای تعیین موقعیت را با مدلی نمونه از یک موتور ۲۴ پله دو فاز بررسی می کنیم. موقعیت های تعادل ابتدا با موقعیت شروع بعنوان مرجع اندازه گیری می شوند، و همانطور که در شکل ۸(a)-۲ نشان داده شده است، انحراف از زوایای پله جمع پذیر نامی، که با ۵ رسم شده اند، توسط خطوط مستقیم متصل شده اند تا گرافی مقطع ترسیم شود. پراکندگی دقت موقعیتی به نام اختلاف نوک تا نوک^۲ خوانده می شود، که در این نمونه 0.15° می باشد. دقت موقعیتی را هم می توان در این حالت $0.075^\circ \pm$ تعریف کرد.

^۱. positional accuracy

^۲. peak-to-peak



(a) حالت کلی: دقت موقعیتی > خطای موقعیت پله



(b) حالت خاص: خطای موقعیت پله = دقت موقعیتی

شکل ۲۸. مثال هایی از دقت موقعیتی و خطای موقعیت پله.

اختلاف های پله به پله از زاویه پله نامی با • رسم شده اند. اینها اختلافات بین مقادیر دو همسایگی نقاط می باشند. نقطه نوک مثبت یا منفی خطای موقعیت پله می باشد، و در این مورد همانطور که در شکل نشان داده شده $0/11^\circ$ می باشد.

در این مورد هم پراکندگی دقت موقعیتی معمولاً بزرگتر از خطای موقعیت پله می باشد. بهر حال، همانطور که در شکل (b) ۸-۲ نشان داده شده است، هنگامی مشابه هم می باشند که انحراف ماکزیمم مثبت و انحراف ماکزیمم منفی در موقعیت های مجاور واقع می شوند.

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 دندانها هیچ تغییراتی نداشته باشند، آنگاه الگوی خطای موقعیتی در هر چهار پله تکرار خواهد شد.

۴-۲-۴- رفتار دینامیک بسیار خوب ناشی از نسبت های گشتاور به اینرسی بالا

مطلوبست که موتورهای پله ای تا حد ممکن در پاسخ به یک پالس ورودی یا قطار پالس سریع حرکت کنند. برای یک موتور پله ای نه تنها راه اندازی سریع بلکه توقف سریع نیز ضروری می باشد. اگر در قطار پالس به هنگام کار موتور وقفه ای 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 پله ای در مقایسه با موتورهای AC معمول می باشند.

سرعت چرخش یک موتور پله ای برحسب تعداد پله ها در هر ثانیه داده می شود، و اصطلاح نرخ پله^۱، اغلب برای اشاره به سرعت استفاده می شود. به علت اینکه در اکثر موارد تعداد پالس های اعمال شده به توالی ساز منطقی با تعداد پله ها برابر است، سرعت ممکن است برحسب 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 برحسب 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

¹. stepping rate

غیر معقول است، اما اینجا سرعت برحسب r.p.m، نرخ پله، و پله بر دور داده خواهد شد:

$$n=60f/S \quad (2-3)$$

که n = سرعت چرخش (r.p.m)

f = نرخ پله

S = پله بر دور

۳-۴- طبقه بندی موتورهای پله‌ای

انواع مختلفی از موتورهای الکتریکی بکار برده می شوند، و موتور پله‌ای را می توان براساس ساختار ماشین و اساس عملکرد به چندین نوع طبقه بندی کرد.

۱-۳-۴- موتور VR

موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر^۱، یا به اختصار موتور VR، ممکن است بعنوان ابتدایی ترین نوع موتور پله‌ای مطرح شود. این موتور سه فاز دارای شش دندانه استاتور است. هر دو دندانه متقابل استاتور، که از یکدیگر 180° فاصله دارند، دارای یک فاز می باشند؛ به این معنی که، کلاف های هر دندانه متقابل بصورت سری یا موازی متصل شده اند. روتور دارای چهار دندانه است. هسته روتور و استاتور معمولاً از فولاد سیلکون متورق^۲ ساخته شده اند، اما از روتورهای فولاد سیلکون توپر^۳ بسیار زیاد استفاده می شود. هر دو مواد استاتور و روتور بایستی قابلیت نفوذپذیری بالایی داشته

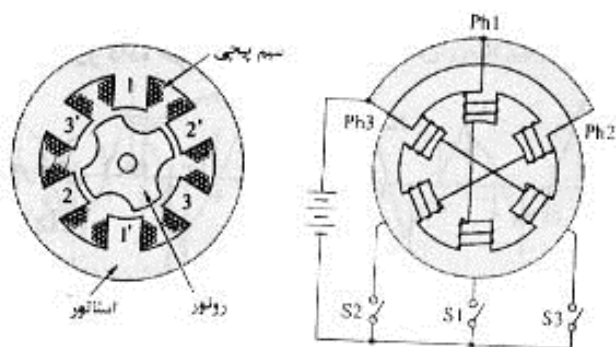
1. variable-reluctance

2. solid

3. laminated silicon steel

باشند و قادر به عبور شار مغناطیسی زیادی حتی در صورت اعمال نیروی محرکه مغناطیسی کم باشند.

باید بینیم که آیا دو دندانه استاتور در یک فاز باید دارای پلاریته مغناطیسی یکسان باشند یا پلاریته های مخالف هم. در حالیکه این موضوع بر مسائل دیگر اثر می گذارد، ما در این مثال فرض می کنیم که دو دندانه پلاریته های مخالف دارند. از اینرو، در شکل ۱۰-۲، دندانه های ۱، ۲ و ۳ قطب شمالی و دندانه های ۱'، ۲'، ۳' قطب جنوبی را به هنگام تحریک تشکیل می دهند.



شکل ۱۰-۲. مقطع عرضی مدل موتور پله ای VR سه فاز و ترتیب سیم پیچی

جریان هر فاز در مد ON/OFF توسط کلیدهای متناظر آن کنترل می شود. اگر جریانی به کلافهای Ph1 اعمال شود، یا بعبارت دیگر اگر Ph1 تحریک شود، روتور طوری استقرار خواهد یافت که دندانه استاتور ۱، ۱' و دو دندانه از روتور همردیف شوند. از اینرو هنگامیکه دندانه های روتور و دندانه های استاتور همردیف هستند، رلوکتانس مغناطیسی به حداقل می رسد، و این حالت یک موقعیت تعادل یا سکون را ایجاد می کند.

اگر روتور بخاطر برخی گشتاورهای خارجی اعمال شده به محور روتور تمایل به خارج شدن از حالت تعادل داشته باشد، یک گشتاور بازیابی 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 انحنادار شدن خطوط شار مغناطیسی در سر دندانه های روتور و استاتور خواهد شد. در پدیده موسوم به استرس ماکسول، خطوط مغناطیسی شدت میدان قدرت کشش زیادی دراند، یا عبارت دیگر، تا حد امکان تمایل به کوتاه و مستقیم شدن (مانند فنرهای الاستیک) دارند.

همانطور که در این شکل دیده می شود، هنگامیکه دندانه های روتور و استاتور در فاز تحریک شده همردیف نیستند، رلوکتانس مغناطیسی بزرگ است. موتور VR بنحوی کار می کند که رلوکتانس مغناطیسی به حداقل می رسد. حال می خواهیم ببینیم هنگامیکه Ph1 خاموش و Ph2 روشن می شود چه اتفاقی می افتد. رلوکتانس دیده شده موتور از منبع تغذیه DC بطور ناگهانی پس از انجام سوئیچینگ افزایش خواهد یافت.

حال چندین ویژگی ساختاری و اساسی موتورهای VR را بیان خواهیم کرد.
(a) فاصله هوایی تا حد امکان باید کوچک باشد. فاصله هوایی بین دندانه های روتور و دندانه های استاتور در یک موتور پله ای 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. با نیروی محرکه مغناطیسی یکسان یک فاصله کوچک شار مغناطیسی بیشتری خواهد داد که گشتاور بزرگتری تولید می کند. 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 $100\mu\text{m}$ است.

(b) نوع چند پشته‌ای^۱ و نوع تک پشته‌ای^۲. موتورهای پله‌ای که در بالا توصیف شدند موتورهای نوع تک پشته‌ای می باشند. یک ویژگی برجسته این نوع از موتور این است که سه یا چهار فاز در یک پشته واحد قرار داده شده اند، یعنی در یک صفحه. نوع دیگر موتورهای پله‌ای VR نوع چند پشته‌ای می باشد. این نوع همچنین بعنوان نوع کاسکاد^۳ شناخته می شود.

در این مدل هر پشته متناظر با یک فاز است، و استاتور و روتور دارای گام دندان‌یکسانی می باشند. حال فرض می‌کنیم که فاز(پشته) سوم تحریک شده است و دندان‌های روتور و استاتور در این فاز هم‌ردیف هستند. در فازها یا پشته‌های دیگر در این لحظه، دندان‌های هر دو عضو به اندازه $1/3$ گام دندان‌ناهم‌ردیف شده اند، که در شکل نشان داده شده است. جهت ناهم‌ردیفی‌ها در پشته اول و دوم مخالف هم می باشند. اگر تحریک از فاز سوم به فاز اول سوئیچ شود، روتور از دید چپ یک پله در

1. multi-stack
2. single-stack
3. cascade

جهت ^۱CW حرکت خواهد کرد. اما اگر تحریک به فاز دوم سوئیچ شود به اندازه یک زاویه پله در جهت ^۲CCW حرکت خواهد کرد.

۴-۴- روش های تحریک

در مباحثی که تا کنون ارائه شد اساس موتور پله‌ای در قالب تحریک تکفاز تشریح شد. این روش یکی از اساسی ترین روش های تحریک می باشد و اغلب برای تحلیل مسائل نظری پایه بکار می رود. بهر حال، امروزه چندین روش مختلف تحریک مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۲.۱. ترتیب تحریک در عملکرد یکفاز 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	R
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									
Phase 4									

Phase

توجه: حرف R نشانگر 'reset' می باشد.

^۱. clockwise (سا عتگرد)

^۲. counter-clockwise (عکس سا عتگرد)

۱-۴-۴- تحریک تکفاز

جدول ۱-۲ ترتیب روش تحریک تکفاز را برای موتورهای VR سه و چهار فاز نشان می دهد. قسمت های هاشورزده جدول حالت تحریک شده را نشان می دهند، و خانه های سفید فازهایی که جریان به آنها تغذیه نشده و از اینرو تحریک نشده اند را نشان می دهند. هنگامیکه یک موتور در جهت ساعتگرد با ترتیب تحریک $Ph1 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph3 \dots$ می چرخد، بسادگی با عکس کردن ترتیب به $Ph3 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph1 \dots$ در جهت عکس ساعتگرد می چرخد. عملکرد با تحریک تکفاز "درایو یکفاز در تحریک" نیز نامیده می شود.

جدول ۲.۲ ترتیب تحریک در عملکرد دو فاز در تحریک

(۱) موتور VR سه فاز

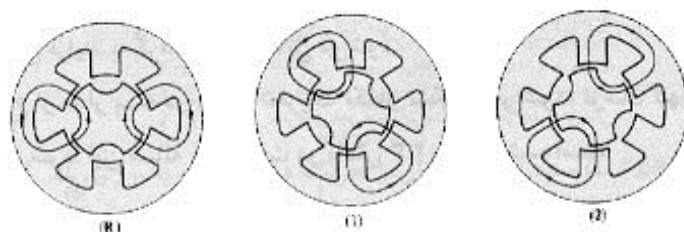
Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									

(۲) موتور VR چهار فاز

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

۲-۴-۴- عملکرد تحریک دو فاز

عملکرد یک موتور که در آن دو فاز همواره تحریک شده است "عملکرد دو فاز در تحریک" نامیده می شود. قبل از بحث درباره مزایای این روش، ترتیب تحریک و رابطه بین دندانه های روتور و استاتور را در موقعیت تعادل بررسی می کنیم. ترتیب ها در جدول ۲-۲ داده شده اند. در این جدول ها دیده می شود هنگامیکه جریان تحریکی از یک فاز به فاز دیگر سوئیچ می شود (بطور مثال مطابق با جدول (۱) ۲-۴ Ph2 خاموش و Ph1 روشن می شود) فاز سوم (Ph3 در مثال بالا) تحریک شده باقی می ماند.



شکل ۲.۵۲. تغییر در الگوی میدان با انجام یک پله در روشن دو فاز در تحریک در یک موتور VR سه فاز تک رشته ای.

۳-۴-۴- روش نیم پله^۱

طرح تحریکی که ترکیبی از تحریک تکفاز و دو فاز است عملکرد به اصطلاح نیم پله می باشد. ترتیب تحریک برای موتورهای VR سه فاز در جدول ۲-۳ داده شده است. تعداد حالت های ساعت به دو طریق در نظر گرفته شده اند، (A) و (B). در روش (A)، تعیین موقعیتها تنها از طریق تحریک تکفاز انجام می گیرد، و دو فاز به

¹. half-step

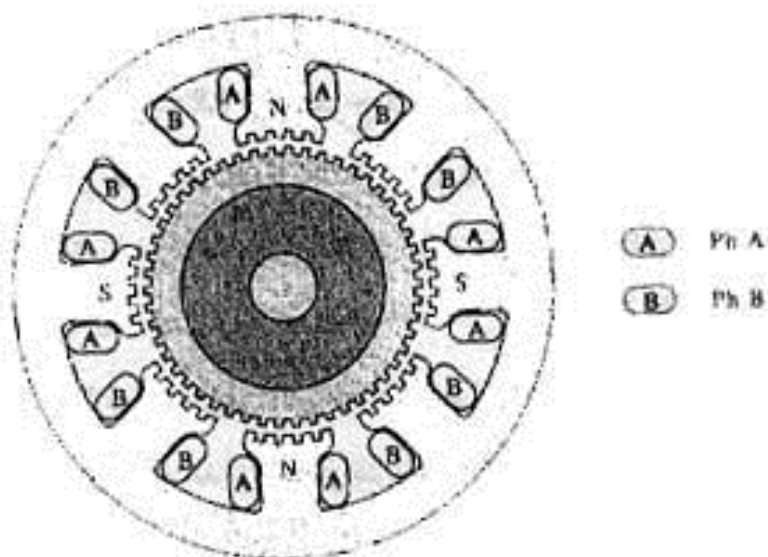
هنگام حرکت از یک نقطه تعادل به نقطه تعادل دیگر تحریک شده اند. تحریک دو فاز در اینجا برای متوقف کردن نوسان بکار رفته است. در روش دیگر، موقعیت های تعادل هر دو تحریک تکفاز و دو فاز بمنظور تعیین موقعیت بکار گرفته شده اند. حالت های ساعت در (B) هم مانند این روش بایستی شمارش شوند. این طرح زاویه پله را به نصف کاهش می دهد.

جدول ۲۳. 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	6	7	8
Phase 1									
Phase 2									
Phase 3									

۴-۴-۴- تحریک موتور هیبرید دو فاز

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 می اندازیم. اگر سیم پیچی ها به شکل دو رشته ای باشند، شرایط مشابه یک موتور VR چهار فاز است. فازهای A, B, \bar{A} , \bar{B} متناظر با فازهای ۱، ۲، ۳، ۴ می باشند، و سه روش تحریک قبلی اعمال شده اند.

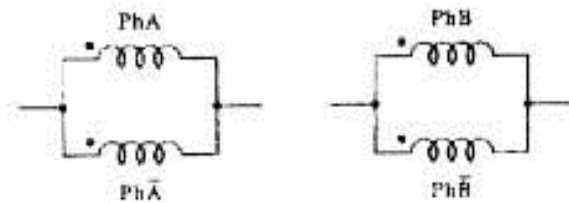


کل ۲۵۹ آرایش کلاف در یک موتور همبرید با سیم پیچی تک رشته ای

اگر هر یک از فازهای A, B دارای یک کلاف تک رشته ای 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 می باشد. انجام روش یکفاز در تحریک، دو فاز در تحریک، و نیم پله با مدار پل امکان پذیر است، و ترتیب سوئیچینگ ها در جدول ۲-۴ نشان داده شده است.

مشخص است که ۲۵-۳۰ 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 رشته ای به ترانزیستور نیاز دارد. هنگامیکه یک موتور با سیم پیچی دو رشته ای سر وسطدار با طرح دو قطبی درایو می شود، سیم ها باید مطابق شکل ۲-۶۲ متصل شوند

تا سیم پیچی های \bar{A}, A در هر قطب استاتور پلاریته مغناطیسی را با علامتی یکسان
بوجود آورند.



شکل ۲،۶۲. بکارگیری یک موتور هیبرید با سیم پیچی دو رشته‌ای با درایو پل دو قطبی.

۵- سیستم درایو و مدار کنترل حلقه- باز موتورهای پله‌ای

یکی از مهمترین مسائل در کاربرد موتور پله‌ای سیستم درایو می باشد. سیستم های درایو به طرح های حلقه- باز و حلقه- بسته طبقه بندی می شوند. این فصل سیستم درایو حلقه- باز را مورد بررسی قرار می دهد.

۵-۱- سیستم درایو

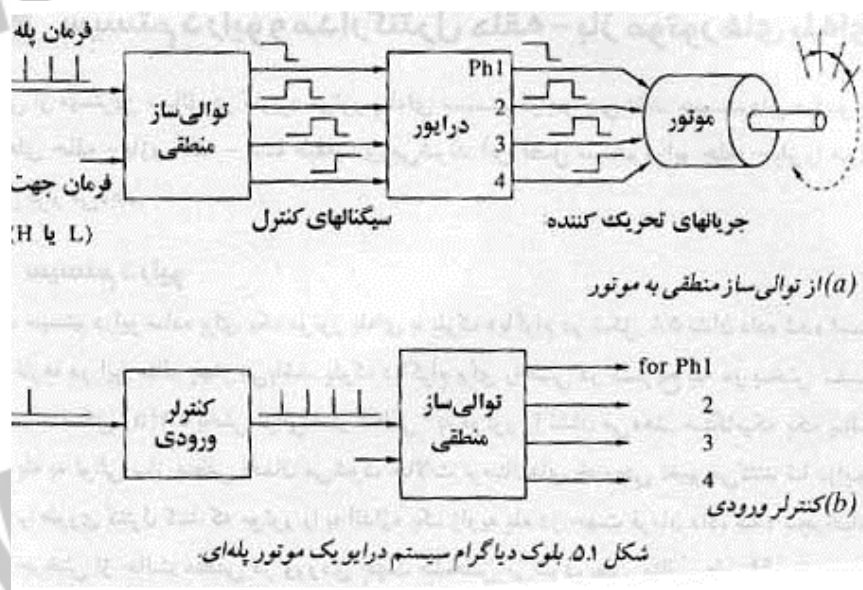
یک سیستم درایو ساده برای یک موتور پله‌ای با بلوک دیاگرام در شکل ۵-۱ نشان داده شده است، تعداد فازها در این مثال چهار می باشد. بلوک دیاگرام برای راحتی در تشریح به دو بخش تقسیم شده است. شکل (a) ۵-۱ بخش توالی ساز منطقی^۱ به موتور را نشان می دهد. هنگامیکه یک پالس فرمان پله به توالی ساز منطقی اعمال می شود، حالات ترمینال های خروجی تغییر می کنند 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 می شود، 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 (a) ۵-۱ کل سیستم را نشان می دهد. 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

^۱. logic sequencer

^۲. direction-signal terminal

منطقی قرار گیرد، و این در شکل (b) ۱-۵ نشان داده شده است این مدار منطقی در این کتاب به نام "کنترلر ورودی" نامیده می شود. در کاربردهای پیچیده کار کنترلر ورودی توسط یک ابزار الکترونیکی هوشمند مانند ریز پردازنده انجام می شود که قطار پالسی را برای افزایش سرعت، چرخش و کاهش سرعت در موتور بصورت بسیار کارا و قابل اطمینان تولید می کند. در این فصل ابتدا جزئیات توالی سازهای پالس بررسی شده اند، 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.

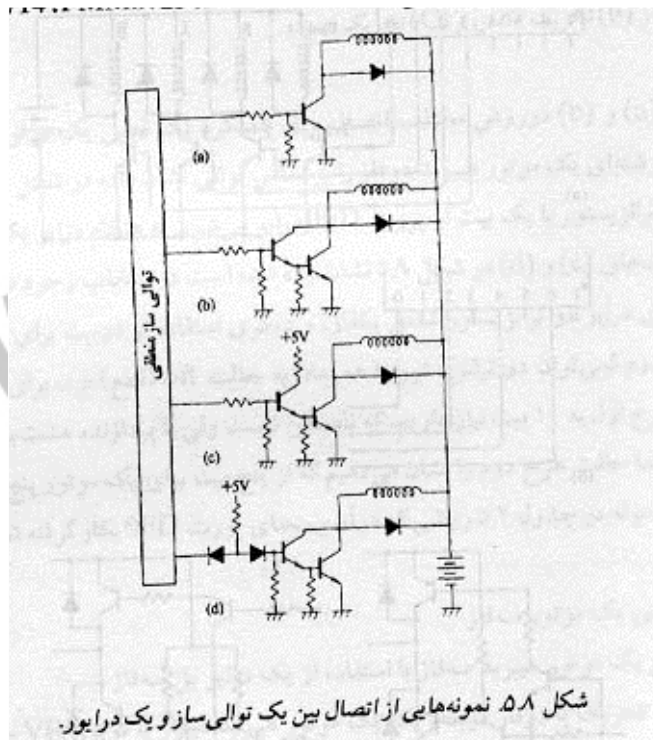


در این بخش تعدادی توالی سازهای منطقی که با IC های TTL مجتمع شده اند ارائه خواهند شد، و سپس یک توالی ساز یونیورسال از نوع CMOS بررسی شده است.

۱-۲-۵- توالی ساز یونیورسال^۱ MSI

بجای مجتمع کردن یک توالی ساز منطقی با تراشه های IC مجزا برای بکار انداختن یک درایور خاص در روشی خاص، می توان از یک توالی ساز MSI طراحی شده برای روش های عملکرد مختلف استفاده کرد.

سیگنالهای خروجی این نوع از توالی سازهای منطقی یونیورسال می توانند مستقیماً بیس^۲ ترانزیستورهای قدرت دارلینگتون^۳ را که مطابق مدار نشان داده شده در شکل ۵۸-۸(b)-(d) متصل شده اند کنترل کنند. PMM8723 بسیار اقتصادی می باشد و تنها برای موتور هیبرید دو فاز بکار می رود. PMM8714 برای یک موتور هیبرید پنج فاز می باشد که دارای اتصالات به شکل پنج ضلعی یا حلقوی است.



1. universal
2. base
3. darlington

۶- کاربرد موتورهای پله‌ای

برخی از نمونه های کاربرد موتور پله‌ای در بخشهای مختلف فصول قبل آمده بود. کاربرد موتورهای پله‌ای با کنترل عددی ماشین های 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 ماشین های NC شدند. در این فصل کاربردهای مختلف موتورهای پله‌ای بررسی خواهد شد.

۶-۱- لوازم جانبی کامپیوتر

این زمینه بعنوان حوزه اصلی کاربردهای موتور پله‌ای منظور می شود. انواع بسیاری از لوازم جانبی کامپیوتر وجود دارد. ازدیاد کامپیوترهای رومیزی و قابل حمل در دهه ۱۹۸۰ توسعه موتورهای کوچک برای استفاده در دیسک گردان ها و چاپگرها را برانگیخت. چند وسیله مهم که از موتورهای پله‌ای بهره می برند را مورد بررسی قرار می دهیم.

۶-۱-۱- چاپگرها

چندین نوع از چاپگرها که در آنها موتورهای پله‌ای به منظورهای مختلفی بکار رفته وجود دارند. دیگر انواع موتور هم در آنها بکار رفته اند؛ بطور مثال، موتورهای DC بدون جاروبک برای اسکنرهای چند گوشه^۲ در چاپگرهای لیزری. بهر حال، این چاپگرها از موتورهای پله‌ای برای کاغذ رسان، چرخش استوانه حساس به نور، و

^۱. brushless

^۲. polygon

بخش تکان دهنده تونر استفاده می کنند. شکل ۱-۸ ساختار و اساس کاربردهای موتور در چاپگر سریال نوع ضربه- کاراکتر^۱ را نشان می دهد.

انواع قلم ها^۲ و تعداد کاراکترها محدود می باشند و سطح نویز در این نوع چاپگرها بالاست. چاپگرهای جوهر افشان^۳ در سالهای اخیر ترجیح داده شده اند. چاپگرهای جوهر افشان سرعت بالای چاپ و نویز کم از خود نشان می دهند، و قادر به چاپ انواع قلم ها می باشند. 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^۴ مورد استفاده قرار می گیرند، حرکت موتور توسط یک ردیف دنده به محور صفحه ای^۵ منتقل می شود.

۲-۱-۶- رسام‌های گراف

شکل ۴-۸ یک رسام گراف فشرده، که به نام رسام X-Y هم خوانده می شود، ساخت اوایل دهه ۱۹۸۰، یک کابل فیبر فولاد ضدزنگ با پوشش نایلونی برای انتقال حرکت موتور پله‌ای به قلم مورد استفاده قرار گرفته است. در این سیستم هیچ فعالیت مکانیکی وجود ندارد و سطح نویز در مقایسه با یک ردیف دنده اندک است.

۱. chatacter-impact

۲. founts

۳. ink-jet

۴. bubble-jet

۵. platen shaft

چنین ورقه‌های بزرگی برای نقشه‌های معماری، نقشه‌های ماسک^۱ برای مدارات مجتمع، و دیاگرام‌های مدار الکترونیکی مورد نیاز می‌باشند.

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 ساده تر انجام می‌شود. موتور پله‌ای سومی برای درایو مکانیزم جابجایی محفظه‌های جوهر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱-۶- تمایلات جدید به موتورهای پله‌ای خطی / سطحی

قبل از اینکه نوع عمودی ظهور کند، یک موتور سطحی^۲ برای انتقال قلم طراحی بکار می‌رفت. این موتور (یا حرکت دهنده) از یک تکیه گاه ثابت معلق شده است، که سطح آن برای تشکیل دندان‌های استاتور در هر دو جهت Y, X بشکل یک کلوچه^۳ علامت گذاری شده است. علامت گذاری ها با مواد غیر مغناطیسی پر شده تا سطحی همار نمودار شود. موتور سطحی، که $1/5\text{kg}$ وزن دارد در جای خود توسط نیروی مغناطیسی نگهداشته شده است اما به هنگام تغییرات هنگام تغییرات موقعیت بعلت لایه نازک حدوداً $10\mu\text{m}$ از هوای فشرده آزادانه حرکت می‌کند. موتورهای پله‌ای خطی زمینه چالشی برای مهندسين موتور در گذشته بوجود آورده بودند، ولی تا کنون تنها کاربرد محدودی داشته اند. برخی از آنها با موتورهای چرخان مسطح، مانند رسام های گراف، جایگزین شدند. به این خاطر که موتورهای پله‌ای خطی بزرگ هستند، و

1. mask patterns

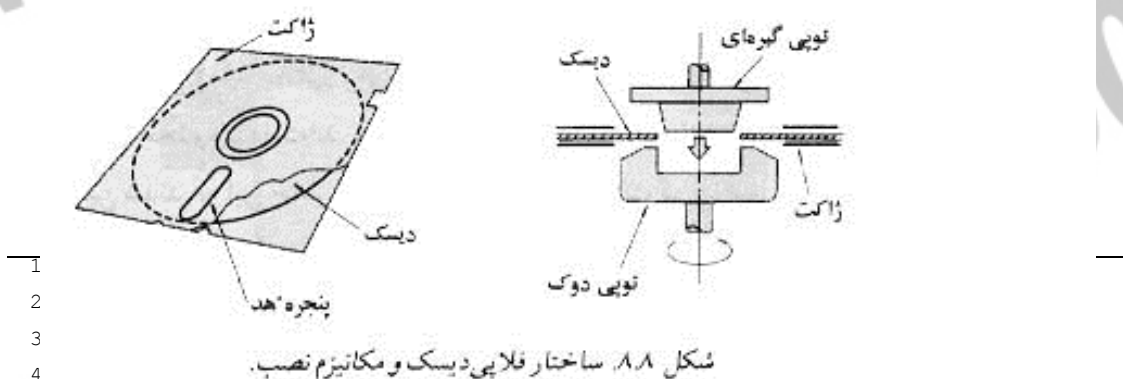
2. planar

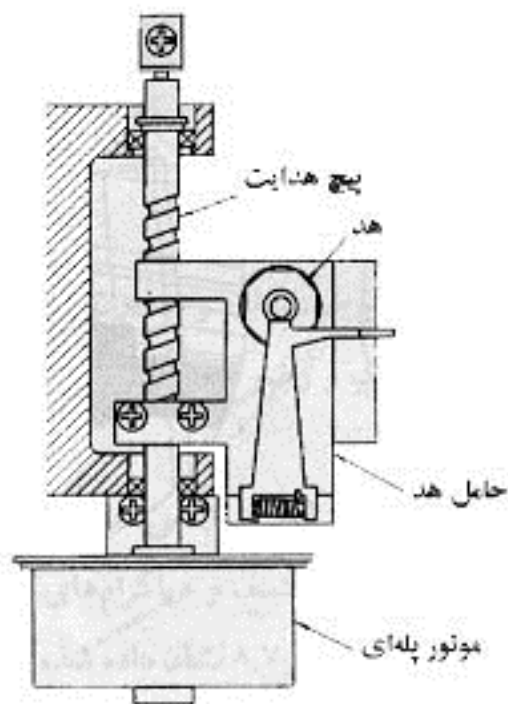
3. waffle

فاصله های هوایی باریک بین استاتور و روتور به سختی بدست می آید. از نظر ساختاری، ایجاد یک ساختار محفوظ از هوا برای موتورهای خطی مشکل است، و این مشکل دیگری را نشان می دهد.

۴-۱-۶- 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 می روند. فلاپی دیسک، به نام دیسک منعطف هم خوانده می شود، و دیسکی بالای میلار^۵ است، که هر دو طرف آن با ماده مغناطیسی پوشیده شده که روی آنها داده ها ذخیره می شوند. 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 می شود. هنگامیکه روی واحد درایو قرار گرفت، درایو قرار گرفت، تنها دیسک به تویی^۶ درایو تزویج شده است، در حالیکه پوشش یا محفظه بدون حرکت باقی می ماند. برای استقرار هد در یک درایو فلاپی دیسک یک موتور پله ای دندانه پنجه ای، همانطور که در طرح شکل ۸-۹ نشان داده شده، استفاده می شود.





شکل ۸.۹ مکانیزم درایو هد در یک درایو فلاپی دیسک

یک دیسک سخت، که دیسکی آلومینیومی یا شیشه ای پوشیده از ماده مغناطیسی می باشد، ظرفیت های ذخیره اطلاعات بیشتر و زمان دستیابی کوتاهتر از یک فلاپی دیسک را فراهم می کند. چگالی بیت می تواند به ۳۰۰۰۰ بیت در اینچ برسد، و در حدود ۷۰۰ سیلندر در یک دیسک ۳/۵ اینچی فراهم می شود. شکل ۸-۱۰ یک درایو دیسک سخت ۵/۵ اینچی را نشان می دهد. مکانیزم درایو- هد از یک موتور پله‌ای هیبرید همانند شکل ۸-۱۱ بهره می برد. 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 $40-30\ \mu\text{m}$ در هد مغناطیسی ایجاد می کند. مقدار حرکت موتور کمتر از یک دور است.

زمان جستجوی متوسط، که بعنوان زمان لازم برای حرکت از یک شیار به شیار دیگر تعریف می شود، برابر با 19ms می باشد. این زمان با انتخاب دقیق فواصل پله برای افزایش و کاهش سرعت حاصل می شود. برای جستجوی سریعتر از یک موتور با کلاف متحرک استفاده می شود.

انواع مختلفی از موتورها برای درایو دوک^۱ دیسک بکار می روند، اما برای کامپیوترهای شخصی از یک موتور DC بدون جاروبک استفاده می شود.

۷- ساخت موتورهای پله‌ای

اکثر موتورهای پله‌ای ساخته شده از سال ۱۹۸۰ تا کنون از نوع موتورهای هیبرید یا دندان پنجه ای می باشند. هر دو نوع از آهنرباهای دائمی استفاده می کنند. موتور پله‌ای هیبرید بطور ویژه دارای درجه آزادی بالایی در طراحی (یعنی اندازه، زاویه پله، و تعداد فاز) می باشد و به دقت تعیین موقعیت بالایی دست می یابد. در این فصل، طراحی واقعی و فرآیند ساخت این نوع موتور را ارائه خواهیم کرد. کارخانه مورد اشاره در متن، کارخانه Aoki زیر مجموعه Sanyo Denki می باشد، که منحصراً موتورهای پله‌ای هیبرید تولید می کند.

^۱. spindle

۷-۱- اساس طراحی و ساخت

همانطور که در فصل ۳ اشاره شد، موتورهای پله‌ای در اوایل دهه ۱۹۷۰ بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. در مقایسه با امروز، فرآیند ساخت آنها از جنبه های مختلف متفاوت بود.

۷-۱-۱- فلسفه طراحی کارخانه

کارخانه دارای دو طبقه (هر طبقه با مساحت ۶۰۰۰ مترمربع) می باشد؛ طبقه پایینی شامل ابزارهای ماشین سنگین همچون پرس ها، ماشین های NC، ماشین های تراش خودکار می شود، در حالیکه طبقه بالا محل سیم پیچی کلاف، نصب، بازرسی، و خطوط انتقال می باشد، که شامل نیمه دوم فرآیند می شود. با اینکه خط تولید با بررسی سریع و عجولانه ممکن است نامنظم بنظر آید، در واقع تحت برنامه مدیریتی بسیار هماهنگی عمل می کند. در زیر فرآیندهای طراحی و ساخت را برای تولید مدل های گوناگون بررسی خواهیم کرد.

دو روش برای ساخت موتورها وجود دارد: اکثر فرآیندهای تولید یا تمامی آنها را می توان در داخل کارخانه انجام داد، همانند کارخانه Aoki، یا ساخت قطعات خاصی را بتوان با قرارداد به دیگر شرکت های موجود در منطقه واگذار کرد. با اینکه انتخاب روش ساخت یک تصمیم مدیریتی است روش اول از یک دیدگاه مهندسی ترجیح داده می شود. از این طریق، نه تنها بهبود کیفیت تولید با داشتن کنترل مستقیم روی

ساخت تمام قسمت های موتور امکان پذیر است، بلکه مهارت کسب شده در ساخت برای کارخانه ارزشمند می باشد.

۷-۱-۲- 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 سیم پیچی کلاف گرفته شود. بطور کلی، فرآیندهای تولید را می توان بر حسب حجم خروجی آنها به تولید انبوه و تولید گروهی تقسیم کرد. در روش دوم، گروههای کوچکی از مدل های گوناگون ساخته می شوند. اغلب ماشین های نیمه خودکار در تولید گروهی بکار برده می شوند.

بطور خاص، خطوط تولید انبوه آنهایی هستند که خروجی آنها بیش از ۱۰۰۰۰ واحد در ماه است: این رقم تعداد کل موتورهای تولید شده از قالب^۲ یکسانی را نشان می دهد. سپس در مرحله سیم پیچی کلاف تغییرات زیادی انجام می گیرد، که منجر به تولید انبوه انواع زیادی از موتورها می شود. خط تولید بسیار خودکار است و معمولاً روزانه دو یا سه شیفت کار می کند. با اینکه تجهیزات تولید انبوه گران قیمت می باشند و در مرحله نصب به برنامه ریزی نیاز دارند، به هنگام کار هزینه به ازای هر واحد تولید بطور قابل توجهی کاهش می یابد.

^۱. batch

^۲. die

۷-۲- طراحی

در کارخانه، مدل های کاتالوگی استاندارد و موتورها که هر دو برای تامین خواسته های مشتریان (یعنی سفارشی) طراحی شده اند تولید می شوند. در زیر چگونگی طراحی موتورهای سفارشی را توصیف خواهیم کرد.

۷-۲-۱- تعیین مشخصات نهایی

هنگامیکه باید براساس مشخصات جدید تصمیم گیری شود، در مرحله پیش-ساخت^۱ طراحی و ساخت پیش نمونه^۲ لازم می باشد. اساساً سه فرآیند زیر برای تعیین مشخصات وجود دارد.

۱. مشتری تمامی مشخصات (شکل و ابعاد بیرونی، گشتاور نگهدارنده زاویه پله، گشتاور چتته، دقت موقعیت، ولتاژ نامی، مقاومت و اندوکتانس سیم پیچی، نوع عایق بندی) را ارائه می کند. سپس سازنده جزئیات ساخت را تعیین می کند: جزئیات استاتور/ روتور، آهنربا، مواد عایق، و نوع سیم پیچی.

۲. مشتری گشتاور چتته را از بارگذاری و شرایط کار محاسبه می کند، و روی مشخصات ظاهر بیرونی، ابعاد، و گشتاور چتته موتور تصمیم می گیرد. مشخصات دیگر بعد از ارزیابی های مدل نمونه تعیین می شوند.

۳. مشتری بارگذاری و شرایط کار را مشخص می کند. سپس سازنده انتخاب اساسی موتور را انجام می دهد، که بعد از آن مشخصات دقیق تعیین می شوند.

^۱. pre-manufacturing

^۲. prototype-making

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 شده اند:

مشخصات الکتریکی

- تعداد فازها
- ولتاژ سیم پیچی
- مقاومت / اندوکتانس سیم پیچی
- گشتاور نگهدارنده
- گشتاور چپته 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

ساختار ظریف دندان استاتور و روتور مولفه مهم موتور پله‌ای را در بر دارد: آرایش و شکل دندانها مشخصه های موتور را تعیین می کنند در حالیکه ابعادشان دقت تعیین موقعیت را مشخص می کند. هسته های آهنی روتور و استاتور معمولاً از لایه های متورق فولاد سیلیکون^۴ ساخته شده اند. در اکثر موارد، طراحی مجدد قالب لزومی ندارد به این خاطر کارخانه انباری از قالب ها برای ساخت یک سری موتورهای استاندارد دارد. حتی اگر مشخصات با تولیدات استاندارد متفاوت باشند، در اکثر موارد هسته های استاتور و موتور را می توان از قالب های موجود ساخت. چون داده های طراحی که از قبل موجودند را می توان برای ساده کردن روند طراحی و برنامه ریزی تولید بکار گرفت، این مورد مناسب می باشد.

در اغلب موارد، نیازهای مشتری را می توان با انتخاب عرض پشته استاندارد ساخته شده از قالب های موجود، و با ایجاد تغییرات در سیم پیچی ها و عرض فاصله های هوایی برآورده کرد. طولهای فاصله هوایی استاندارد از ۵۰ تا ۶۰ μm هستند. با اینکه گشتاور نگهدارنده را می توان با کوتاه کردن طول فاصله هوایی به اندازه ۱۰ μm به

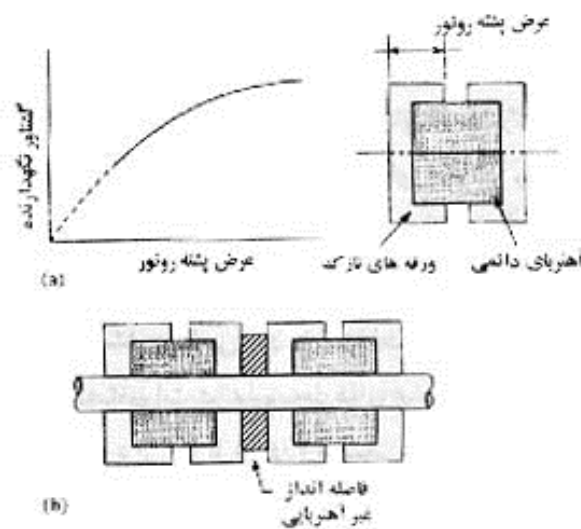
1. flange face

2. lead-wire

3. connector

4. silicon steel

اندازه ۱۰-۵ درصد افزایش داد، این امر انتظارات سختگیرانه ای از کنترل فرآیند را موجب می شود. در اکثر موارد، برای برآورده کردن الزامات گشتاور معلوم باید از عرض های هسته غیر استاندارد استفاده شود. سپس این امر به موضوع انتخاب ابعاد کلی و فرآیند ساخت بهینه از دیدگاه اقتصادی مبدل می شود.



شکل ۹.۲. عرض پشته روتور و مشخصه های گشتاور نگهدارنده. (a) گشتاور نگهدارنده بر عرض پشته. (b) ساختار دوپشته ای.

تلرانس^۱ هر یک از مشخصات الکتریکی و مکانیکی مذکور بایستی معین باشد. در میان آنها، گشتاور نگهدارنده از همه مهم تر است. در حالیکه گشتاورهای چنته برای سرعت های مختلف پارامترهایی هستند که در واقع می خواهیم کنترل کنیم، تا وقتی که ساختار اساسی موتور یکسان است بسیار به گشتاور نگهدارنده همبسته هستند. پس اندازه گیری های گشتاور نگهدارنده را اغلب می توان جایگزین اندازه گیری های

^۱. tolerance

گشتاور چنته کرد. از اینرو، در آزمایش های نمونه، با ارائه موتورهایی به مشتری که دارای گشتاورهای نگهدارنده برابر با مقدار x و مقادیر ماکزیمم و مینیمم (یعنی ترانس) معلوم هستند، تخمین پراکندگی عملکرد یک وسیله کاربردی ممکن است.

گشتاور نگهدارنده با (۱) ساختار موتور (ترکیب مقطعی هسته های روتور و استاتور، عرض پشته، و نوع آهنربا) و (۲) نیرو محرکه مغناطیسی (آمپر- دور) و طول فاصله هوایی معین می شود. مشکلی جدی در مورد عرض پشته نشان داده شده در شکل ۲-۹، وجود دارد. در یک موتور تک آهنربایی، عرض پشته روتور و گشتاور همانطور که در شکل (a) ۲-۹ نشان داده شده به هم مربوط هستند: گشتاور به پایداری می رسد و در عرض پشته مشخصی ثابت باقی می ماند. 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 می باشد. برای مورد (۲) در بالا، آمپر- دورها از روی تعداد دورها و جریان نامی تعیین می شوند، پس عرض فاصله هوایی عامل مهم موثر بر گشتاور نگهدارنده می باشد. در واقع، کنترل فاصله هوایی را می توان بعنوان مهم ترین موضوع در تولید موتور پله ای در نظر گرفت.

هنگامیکه مشخصات معین شدند، بایستی در تولید انبوه بشدت رعایت شوند.

۳-۲-۷- اهمیت دقت تعیین موقعیت

دقت تعیین موقعیت و قابلیت اطمینان بالایی برای موتور پله ای حرکت دهنده هد مغناطیسی در یک درایو دیسک سخت ضروری است. برای حصول به این امر

هسته های استاتور و روتور طوری طراحی شده اند که منحنی T/θ ، بررسی شده در بخش ۱-۶، تا حد ممکن به منحنی سینوسی کامل نزدیک باشند. قالب های بکار رفته در ساخت این هسته ها 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 دندانه های روتور و استاتور باید کمترین باشد. بعلاوه، نیاز به معیارهایی برای اجتناب از جابجایی های مکانیکی غیرقابل برگشت ناشی از تغییرات دما می باشد.

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، می توان تغییرات گشتاور نگهدارنده بین فازها را در حداقل نگه داشت که منجر به عملکرد پایدار وسیله بکار گیرنده موتور پله ای می شود.

^۱. roundness

صفحه کلید

- شامل ۱۰ کلید با reset است.

- هر step - 1/8 درجه می رود جلو وقتی می خواهیم 180° برود جلو احتیاج به

step 100 دارد.

$$1/8 \times 100 = 180$$

- step شش تا سیم دارد ← ۴ تا برای اطلاعات دادن و دو تا هم برای برق

سیاه و سفید ← برق موتور 12v است.

- قبل از اینکه به step برویم LED داریم و قبل و بعد LED ها مقاومت داریم

قبل از LED ها مقاومت بخاطر این گذاشتیم که نسوزد. (2-1K)

- در حالت عادی پورت های میکرو ohigh مقدار ۱ دارند.

- جریانی که از میکرو خارج می شود ضعیف است (صفر یا یک) اما ولتاژ آن ،

ولتاژ خوبی است و بخاطر همین موضوع که جریان خروجی از میکرو ضعیف است آن

را به یک driver وصل می کنیم.

مدار را به کمک ترانزیستور امیتر مشترک drive می کنیم یعنی جریان را تقویت می

کنیم با یک مقاومت وارد B می شویم و از C خارج می شویم و E را هم زمین می
کنیم.

- در manual مربوط به step موتور نوشته شده که جریان برگشتی از موتور وارد

مدار نباید بشود بنابراین دیود می گذاریم که یک طرفه شود.

- از هر پورت میکرو اگر استفاده کنیم باید مقاومت بگذاریم پس برای هر پورت 8
مقاومت باید بگذاریم که ما از RPack ($1k\Omega$ مقاومت) که 9 پایه دارد استفاده می
کنیم که پایه 9 را باید وصل بکنیم به 5 ولت (V_{cc})
- کریستال 6MHz و 2 تا خازن عدسی (30PF) را باید به Micro وصل کنیم که
باید نوسان تولید کنند که حتماً نباید کریستال باشد می تواند یک منبع پالس ساعت
TTL هم می تواند باشد.

- reset را بصورت دستی انجام می دهیم بنابراین به پایه 9 باید مدار زیر را وصل
کنیم.

- پایه 31 داریم که \overline{EA} است که مربوط xternal Accep است چون ما از حافظه
خارجی نمی خواهیم استفاده کنیم پس V_{cc} را به پایه 31 وصل می کنیم چون فعال
شدن پایه مذکور با زمین کردن است و active low است.

درگاه صفر: از پایه 32 تا 39 است دو منظوره I/O عمومی و در دیگر جاهها مالتی
A و D

درگاه I: تنها اختصاص دارد به I/O
درگاه 2: از پایه 21 تا 28 I/O عمومی و طراحی با حافظه کد خارجی به کار می
رود.

درگاه 3: 0 تا 17 یکی I/O عمومی و دیگری هم در شکل نشان داده شده.

- برنامه کلا به زبان C نوشته شده و توسط نرم افزار PV32 به زبان ماشین تبدیل

شده است (به زبان ماشین میکرو 8,51)

step - ما طبق جدول زیر به ترتیب جلو می رود

1	0	0	1	9
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
1	0	1	0	1