فهرست

فصل۹ موتورهای پله ای و رلوکتانس های متغیر
۹-۱-مقدمه..... ۳
۹-۲-موتورهای پله ای ۴
۹-۳-اصول عملکرد ۵
۹-۳-۱ موتورهای پله ای و رلوکتانس متغیر(VRSM)..... ۶
۹-۳-۲ موتورهای پله ای مغناطیس دائم ۱۰
۹-۳-۳ موتورهای پله ای هایبرید ۱۳
۹-۳-۴ مشخصه های موتورهای پله ای..... ۱۵
۹-۳-۴-۱ مشخصه گشتاور – جابجایی ۱۵

فصل ۹
موتورهای پله ای و رلوکتانس های متغیر

مقدمه

امروزه ماشین‌های AC و کنترل‌کننده الکترونیکی آن‌ها باهم طراحی می‌شوند به‌نحوی‌که به‌عنوان یک مجموعه واحد، سازگار باشند. روش طراحی مجتمع، به دلایل زیر روزبه‌روز پرکاربردتر می‌شود:

۱- پیشرفت علم الکترونیک و ارزان و در دسترس بودن کنترل‌کننده‌های الکترونیکی

۲- درایوهای کنترل سرعت، راندمان بالاتر و مشخصه‌های عملکردی مطلوب‌تری دارند.

نمونه‌هایی از سیستم‌هایی که به روش مجتمع طراحی‌شده‌اند عبارت‌اند از درایوهای موتور BLDC و موتور رلوکتانس متغیر. در این ماشین‌ها، سیم‌پیچ فاز استاتور، سنکرون با موقعیت رتور- که توسط یک حسگر موقعیت، فیدبک می‌گردد- کلید زنی می‌شود. به‌این‌علت موتور رلوکتانس متغیر به‌عنوان موتور رلوکتانسی سوئی شونده مشهور است.

موتورهای پله‌ای نیز دارای سیستم‌های درایوی مجتمع هستند. این موتورها به‌طور وسیع در سیستم‌های حلقه باز جهت کاربردهای موقعیت به کار می‌روند. در این فصل موتورهای پله‌ای و موتورهای رلوکتانس متغیر موردبررسی قرار می‌گیرند.

موتورهای پله‌ای

موتور پله‌ای، یک موتور AC است که توسط پالس‌های الکتریکی تغذیه می‌شود. به ازای هر پالس ورودی، شافت موتور مقدار زاویه معینی می‌چرخد که اصطلاحاً به آن پله یا تَـق می‌گویند. رنج اندازه پله می‌تواند بین ۷۲/۰ تا ۹۰ درجه تغییر کند. درواقع، موتور پله‌ای می‌تواند به‌عنوان یک وسـیله الکترومکـانیکی دیجیتـال در نظـر گرفتـه شـود کـه در آن، اطلاعات دیجیتالی ورودی که به فرم پالس‌های الکتریکی هستند به پله‌هایی متناظر با چرخش رتور ترجمه می‌شود. در کاربردهای کنترل موقعیت، اگر تعـداد پـالس‌هـای ورودی فرستاده‌شده به موتور معلوم باشد، موقعیت واقعی قابل حصول است. بنابراین سیستم کنترل موقعیت دیجیتالی که روی موتور پله‌ای پیاده‌سازی می‌گـردد نیـازی بـه حسـگرهای موقعیت رتور و حلقه فیدبک ندارد.

موتور پله‌ای به دلایل زیر با یک موتور معمولی متفاوت است:

۱- ورودی موتور پله‌ای به فرم پالس‌های الکتریکی است، درحالی‌که ورودی موتور معمولی یک منبع ولتاژ ثابت هست.

۲- در موتور پله‌ای، شافت به‌صورت پله‌پله حرکت می‌کند. اما شافت موتور معمولی می‌تواند به‌صورت پیوسته بچرخد.

۳- در کاربردهای کنترلی، هنگامی‌که از موتور پله‌ای استفاده می‌شود هیچ‌گونه فیدبکی نیاز نیست، اما در موتور معمولی وجود یک حلقه فیدبک ضرورت دارد.

۴- موتور پله‌ای یک وسیله الکترومکانیکی دیجیتالی است درحالی‌که موتور معمولی یک وسیله الکترومکانیکی آنالوگ است.

اصول عملکرد

استاتور موتورهای پله‌ای قطب‌های برجسته‌ای دارند که سیم‌پیچ‌های متمرکز بر روی آن‌ها پیچیده شده است. این سیم‌پیچ‌ها به نحو مناسبی به هم متصل می‌شوند تا سیم‌پیچ‌های دو، سه یا چهار فاز بر روی استاتور ایجاد گردد. رتور موتورهای پله‌ای فاقد هرگونه سیم‌پیچ است و از مواد مغناطیسی دائم و یا فرو مغناطیس ساخته می‌شود.

موتور پله‌ای از طریق یک مدار درایو تغذیه می‌شود. وظیفه این مدار، دریافت پالس‌های ولتاژ ورودی و ارسال جریان‌های مناسب به سیم‌پیچ‌های استاتور موتور هست.این جریان‌ها، میدان فاصله هوایی را برقرار می‌سازند؛ میدانی که به ازای هر پالس ورودی یک پله حرکت می‌کند. رتور، محور این میدان مغناطیسی را دنبال می‌کند و بدین ترتیب گشتاوری با ماهیت رلوکتانسی و یا مغناطیس دائم تولید می‌شود. بر این اساس، به ازای هر پالس ورودی، رتور به‌اندازه یک پله می‌چرخد.

طرح‌ها و ساختارهای موتورهای پله‌ای بسیار متنوع است، اما می‌توان آن‌ها را به سه دسته عمده تقسیم نمود: موتورهای پله‌ای بسیار متنوع است، اما می‌توان آن‌ها را به سه دسته عمده تقسیم نمود: موتورهای رلوکتانس متغیر، مغناطیس دائم و هایبرید. نام‌گذاری این سه نوع پله‌ای بر اساس نوع طراحی رتور و اصول عملکردشان صورت گرفت است.

موتورهای پله‌ای معمولاً بابیان نسبت تعداد قطب‌های استاتور به قطب‌های (دندانه‌های) رتور معرفی می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، یک موتور پله‌ای۲/۶ قطب بیانگر موتوری است که دارای ۶ قطب برجسته بر روی استاتور و دو قطب یا دندانه بر روی رتور هست. در ادامه، انواع موتورهای پله‌ای به‌اختصار تشریح می‌گردند.

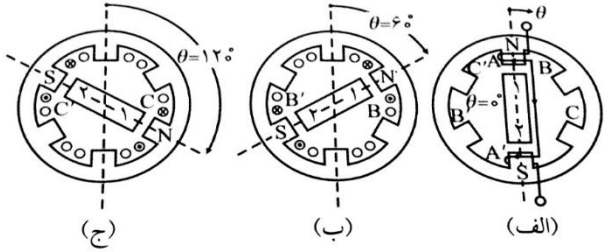
موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر (VRSM)

این موتورها دارای استاتور قطب برجسته با سیم‌پیچ‌های متمرکز سه یا چهار فازه و رتور قطب برجسته هست. رتور، از ماده فرو مغناطیس مورق ساخته‌شده و فاقد هرگونه سیم‌پیچ است. شار تولیدی استاتور باعث می‌شود رتور به‌اندازه یک پله بچرخد، به‌گونه‌ای که رلوکتانس دیده‌شده توسط میدان استاتور مینیمم گردد و شار پیوندی برای جریان‌های استاتور به حداکثر مقدار خود برسد. شکل (۹-۱) کلیاتی از موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر (VRSM) سه فاز ۲/۶ قطب را نشان می‌دهد. این موتور، شش قطب برجسته با سیم‌پیچ‌هایی متمرکز روی استاتور و دودندانه (قطب) روی رتور دارد. سیم‌پیچ‌ها روی قطب‌های رو به روی‌هم به‌صورت سری (یا موازی) به‌گونه‌ای پیچیده می‌شوند که سیم بندی سه فاز روی استاتور شکل بگیرد. سیم‌پیچ استاتور به کمک یک مدار سوئیچینگ مناسب توسط یک منبع DC تحریک می‌شود. هنگامی‌که سیم‌پیچ AA’ تحریک می‌گردد، مطابق شکل (۹-۱- الف) رتور در موقعیت $\theta = 0°$ قرار می‌گیرد. چنانچه سیم‌پیچ AA’ از تغذیه قطع شود و سیم‌پیچ BB’ به تغذیه وصل گردد مطابق شکل (۹-۱-ب) رتور به‌اندازه یک پله $60°$ ای در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. اکنون اگر سیم‌پیچ BB’ قطع و سیم‌پیچ CC’ به تغذیه وصل شود رتور یک پلهٔ $60°$ای دیگر در جهت عقربه‌های ساعت خواهد چرخید به‌گونه‌ای که مطابق شکل (۹-۱- ج)، $\theta = 120°$ بر این اساس، با شش پله، رتور یک دور کامل می‌چرخد.

زاویه پله در شکل (۹-۱)، $60°$هست. به‌طورکلی، اندازه زاویه پله برابر است با:

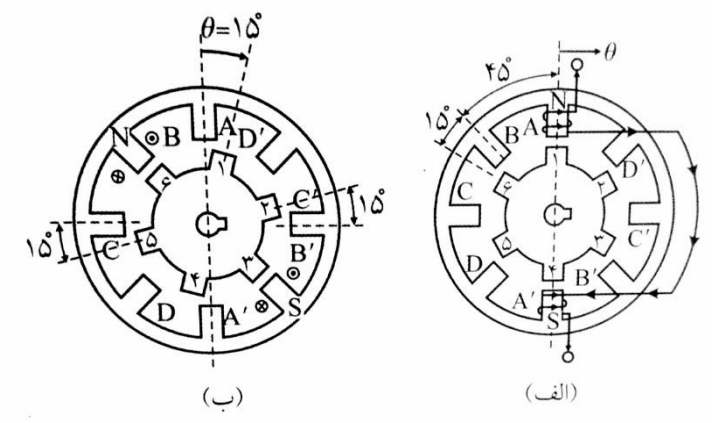
$$\text{زاویه پله} = \frac{360}{mp} \quad (۹-۱)$$

که در آن m، تعداد سیم‌پیچ‌های (فازهای) استاتور و p تعداد دندانه‌های (قطب‌های) رتور می باشد



شکل (۹-۱): موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر (VRSM) سه فاز ۲/۶

مقادیر کوچک‌تر زاویه پله می‌تواند با زیاد نمودن تعداد قطب‌های استاتور یا تعداد دندانه‌های رتور حاصل گردد. شکل (۹-۲) یک VRSM چهار فاز ۶/۸ را نشان می‌دهد. سیم‌پیچ‌های متمرکز بر روی قطب‌های رو به روی‌هم به‌گونه‌ای به‌صورت سری (یا موازی) اتصال می‌یابند که یک سیم بندی چهار فاز مؤثر بر روی استاتور شکل گیرد. به‌منظور وضوح شکل، تنها سیم‌پیچی فاز A در شکل (۹-۲- الف) نشان داده‌شده است.



شکل (۹-۲): موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر (VRSM) چهار فاز ۶/۸

هنگامی‌که سیم‌پیچی فاز A تحریک شود دندانه‌های شماره ۱ و ۴ رتور در راستای محور سیم‌پیچی فاز A قرار گیرند و مطابق شکل (۹-۲-الف)، رتور در موقعیت $\theta = 0$ قرار می‌گیرد. زمانی که سیم‌پیچی فاز Aقطع و سیم‌پیچی فاز B تحریک می‌شود قطب‌های (دندانه‌های) ۳ و ۶ رتور در راستای محور فاز B واقع می‌شوند و مطابق شکل (۹-۲-ب)، رتور به میزان یک پله 15° ای در جهت عقربه ساعت می‌چرخد. دوران 15° ای دیگری در جهت عقربه‌های ساعت با قطع فاز B و تغذیه سیم‌پیچی فاز Cامکان‌پذیر است. با توالی ABCDA، چهار پله تحریک می‌شوند و رتور درمجموع ۶۰ درجه در جهت عقربه ساعت حرکت می‌نماید. برای یک دور چرخش کامل رتور، ۲۴ پله نیاز است.

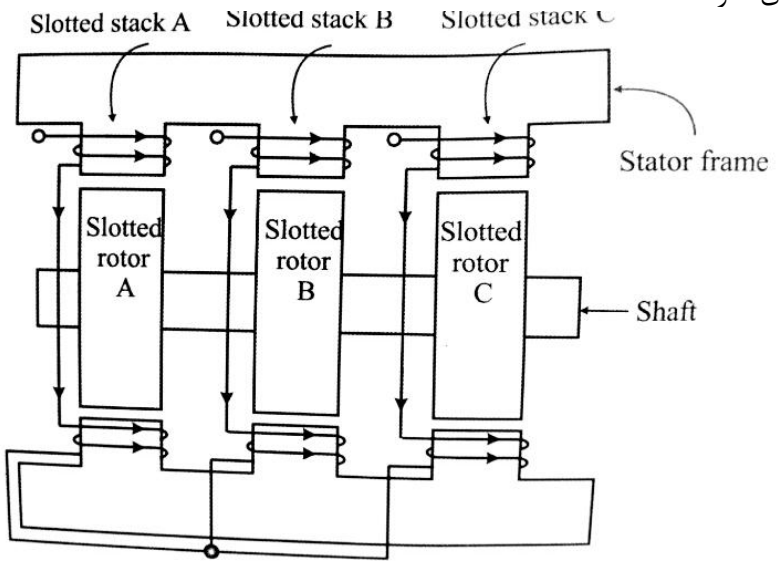
به‌منظور چرخش رتور به میزان 15°در هر پله در خلاف عقربه‌های ساعت، سیم‌پیچ‌های فاز باید با توالی ADCBA تحریک شوند، توجه کنید که با تحریک سیم‌پیچ‌های استاتور شکل (۹-۲) با توالی ABCDA، میدان دوّار در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد درحالی‌که رتور در جهت عقربه‌ها حرکت می‌کند. زاویه پله برای میدان دوّار، 45°در خلاف جهت عقربه و زاویه پله برای چرخش رتور 15° در جهت عقربه ساعت هست.

موتورهای توصیف‌شده در شکل‌های (۹-۱) و (۹-۲)، موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر یک‌تکه می‌باشند. رابطه بین قطب‌های P_S استاتور، دندانه‌های P_r رتور و تعداد m فاز استاتور در یک موتور VRSM ، به‌طورکلی عبارت است از:

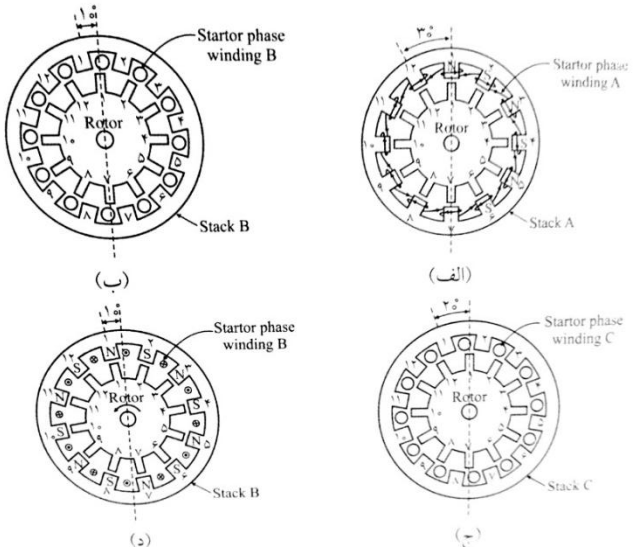
$$P_r = P_s \pm \frac{P_s}{m} \qquad (۹-۲)$$

برای شکل (۹-۱)، تعداد دندانه‌های رتور، P_r باید برابر با ۸ یا $4 = \left(6 \pm \frac{6}{3}\right)$ باشد. اما در این شکل، برای سادگی در توصیف اصول عملکردی VRSM ، تنها دو تا از دندانه‌های رتور نشان داده‌شده است. چنانچه در شکل (۹-۱)، سیم‌پیچ‌های A و B به‌طور همزمان تحریک شوند رتور به میزان $30°$ در جهت عقربه ساعت خواهد چرخید $(\theta = 30°)$. اکنون رتور در موقعیتی بین قطب‌های حامل سیم‌پیچ‌های A و B استاتور خواهد ایستاد. به این تکنیک کاهش ریز پله، گویند.

یک تکنیک دیگر دستیابی به ریز پله، استفاده از موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر چندتکه هست. استفاده از VRSM با سه‌تکه متداول‌تر است. مطابق شکل (۹-۳)، این موتور از سه بخش (تکه) جداگانه که به لحاظ مغناطیسی از هم مستقل‌اند تشکیل‌شده است. استاتور دارای فریم مشترک اما ورق‌های استاتور هر تکه به‌طور محوری نسبت به هم جابه‌جایی دارند. به‌علاوه، ورق‌های استاتور به میزان یک‌سوم گام قطب استاتور (برای یک موتور سه‌تکه) چرخش زاویه‌ای دارند. در یک موتور با استاتور ۱۲ قطبی، گام قطب برابر با $30°$ است و بنابراین سه‌تکه استاتور باید مطابق شکل (۹-۴) به میزان $10°$ چرخش زاویه‌ای داشته باشند. در شکل (۹-۴-الف) تکه A با دندانه‌های استاتور یا قطب‌های ۳، ۲، ۱ و... نشان داده‌شده است. تکه B در شکل (۹-۴- ب) آمده است که قطب‌های آن با شماره‌های ۳، ۲، ۱ و .... نسبت به تکه A، $10°$ در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخش زاویه‌ای دارد. در شکل (۹-۴-ج)، تکه C با قطب‌های ۳، ۲، ۱و.. نشان داده‌شده است که نسبت به تکه B، $10°$ در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخش زاویه‌ای دارد. توجه شود که دندانه‌های رتور روی سه‌تکه، برخلاف قطب‌های استاتور، هیچ‌گونه جابه‌جایی زاویه‌ای ندارد.



شکل (۹-۳): سطح مقطع محوری یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر سه‌تکه‌ای



شکل (۹-۴): موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر سه‌تکه‌ای (الف و ب و ج) (تکه های A، B و C؛ د) تکهٔ Bتحریک‌شده است.

هنگامی‌که سیم‌پیچ فاز روی تکه A توسط جریان i_a تحریک می‌شوند مطابق شکل (۹-۴-الف) قطب‌های N و S پشت سرهم بر روی استاتور تولید می‌شوند. دندانه‌های رتور تمایل دارند که با قطب‌های استاتور به‌گونه‌ای آرایش یابند که رلوکتانس دیده‌شده توسط شار تکه A مینیمم گردد. این وضعیت در شکل (۹-۴-الف) نشان داده‌شده است.

هنگامی‌که جریان i_aدر سیم‌پیچ فاز تکه A به صفر می‌رسد و تکه B تغذیه می‌گردد آنگاه رتور به میزان یک پله ۱۰ درجه‌ای در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخند تا رلوکتانس دیده‌شده توسط شار تکه Bرا مینیمم نماید. این وضعیت در شکل (۹-۴-د) نشان داده‌شده است. چنانچه جریان i_b به صفر رسانده شود و i_cدر سیم‌پیچی فاز تکه C جاری گردد، رتور به‌اندازه یک پله ۱۰ درجه‌ای دیگر نسبت به تکه B استاتور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت خواهد چرخید. به‌علاوه ، با $i_{C=0}$ و تحریک مجدد سیم‌پیچی تکه A ، رتور به میزان ۱۰ درجه دیگر حرکت می‌کند تا چرخش یک گام قطب ۳۰ درجه‌ای از استاتور کامل گردد. چرخش بیشتر در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌تواند با تحریک سیم‌پیچی‌های استاتور با توالی BCABCA حاصل گردد. چنانچه ترتیب پالس‌های جریان به ACBA تغییر داده شود رتور در جهت عقربه‌های ساعت خواهد چرخید.

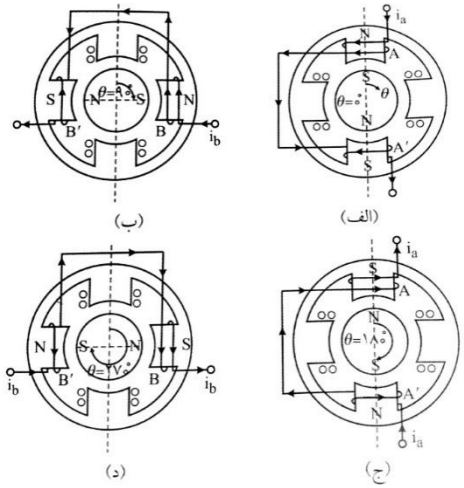
برای VRSMچندتکه ،اندازه زاویه پله از رابطه (۹-۱) به دست می‌آید. امّا اکنون m تعداد تکه‌هاست. برای مثال، در شکل(۹-۴)، m=3 و p=12، بنابراین زاویه پله برابر است با:

$$\frac{360^\circ}{3 \times 12} = 1$$

موتورهای پله‌ای مغناطیس دائم

استاتور موتور پله‌ای مغناطیس دائم(PM)، مشابه استاتور VRSM ، دارای قطب‌های برجسته و سیم‌پیچی متمرکز هست. رتـور، همـان‌گونـه کـه از اسـم ایـن موتـور پیداسـت، شـامل قطب‌های PMهست. به‌منظور بیان اصول کار PMSM ، مطابق شکل (۹-۵)، یک فرم مقدماتی از یک موتور پله‌ای ۲/۴ قطب دو فاز را مدنظر قرار می‌دهیم. در اینجا دوبـاره ،سـیم بندی‌های متمرکز روی قطب‌های روبه روی‌هم به‌طور سری به هم وصل می‌گردند تا سیم‌پیچی دو فاز روی استاتور ایجاد شود. رتور نیز مطابق شکل دارای دو قطب هسـت. عملکـرد ایـن موتور به شرح ذیل است:

الف) در شکل (۹-۵- الف) دو پیچک سری A’ و A، سیم‌پیچی فاز A را تشکیل می‌دهند. هنگامی‌که مطابق شکل، این سیم‌پیچی توسط جریان i_a تحریک می‌شود، قطب‌های ایجادشـده بر روی استاتور، به‌گونه‌ای قطب‌های ایجادشده بر روی استاتور، به‌گونه‌ای قطب‌های pm رتور را جذب می‌کند که محورهای مغناطیسی آن‌ها بر هم منطبق شـوند. فـرض کنیـد تحریـک سیم‌پیچ فاز A، در شکل (۹-۵-الف) با A+ نشان داده شود.



شکل (۹-۵): فرم مقدماتی از یک موتور پله‌ای مغناطیس دائم ۲/۴ قطب دو فاز

ب) در شکل (۹-۵-ب)، جریان i_a در سیم‌پیچی فاز A به صفر رسانده می‌شود درحالی‌که سیم‌پیچی فاز B توسط جریان i_b تغذیه می‌گردد. اکنون قطب‌های ایجادشده بـر روی اسـتاتور، قطب‌های رتور را جذب نموده و باعث چرخش یک پله به میزان $\theta = 90°$ در جهت عقربه‌های ساعت می‌شود. تصور کنید تحریک‌فاز B در شکل (۹-۵-ب) با B+ نشان داده شود.

ج) در شکل (۹-۵-ج)، سیم‌پیچی فاز A دوباره تحریک می‌شود اما جهت جریان آن برخلاف شکل (۹-۵-الف) هست. در این صورت، قطب‌های رتور یک پلهٔ ۹۰ درجه‌ای دیگـر در جهـت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند، به‌گونه‌ای که $\theta = 180°$. این مرحله از تحریک سیم‌پیچی فاز A باید با A– در نظر گرفت شود.

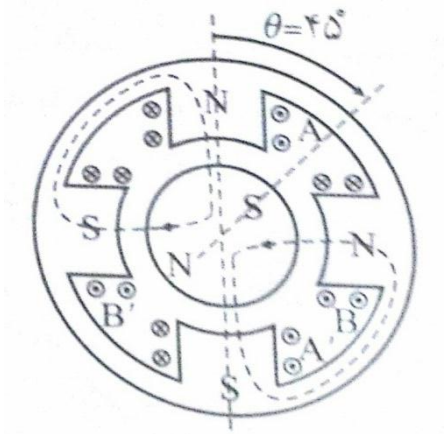
د) در شکل (۹-۵-د)، سیم‌پیچی فاز B دوباره تحریک می‌شود اما جهت جریان آن برخلاف شکل (۹-۵-ب) هست. در این صورت، قطب‌های رتور یک پله ۹۰درجه‌ای دیگ در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد، به‌نحوی‌که $\theta = 270°$. این روش تحریک‌فاز B باید با B– نشان داده شود.

جهت چرخشی یک پله دیگر در جهت عقربه‌های ساعت به قسمی که $\theta = 360°$، سیم‌پیچی فاز B در شکل (۰-۵-د) از تغذیه جدا و سیم‌پیچی فاز A مطابق شکل (۹-۵-الف) تحریک می‌گردد. این بررسی نشان می‌دهد که با چهار پله، رتور یک دور کامل می‌زند.

ملاحظه می‌گردد که به‌کارگیری هر پالس جریان جهت سیم‌پیچی استاتور در یک توالی مناسب، رتور یک پلهٔ زاویه‌ای $90°$ ای مجزا طی می‌کند. این توالی (ترتیب) تحریک سیم‌پیچی‌های استاتور برای حرکت رد جهت عقربه‌های ساعت به‌صورت $\{+A, +B, -A, -B, +A, \dots\}$هست. به‌منظور چرخش رتور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به‌صورت $\{+A, -B, -A, +B, +A, -B \dots\}$. اگر هر دو سیم‌پیچ فاز با توالی (+A +B)تحریک گردند، میدان منتجه استاتور در راستای محور بین دو قطب قرار می‌گیرد و بنابراین رتور مطابق شکل (۹-۶) به‌اندازه $45°$در جهت عقربه‌های ساعت حرکت خواهد کرد. این مطلب نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک پله $45°$ در جهت عقربه‌های ساعت، ترتیب کلید زنی باید به فرم زیر باشد:

$$\{+A(+A+B), +B, (+B-A), -A, (-A-B), -B, (-B, +A), +A, \dots\}$$

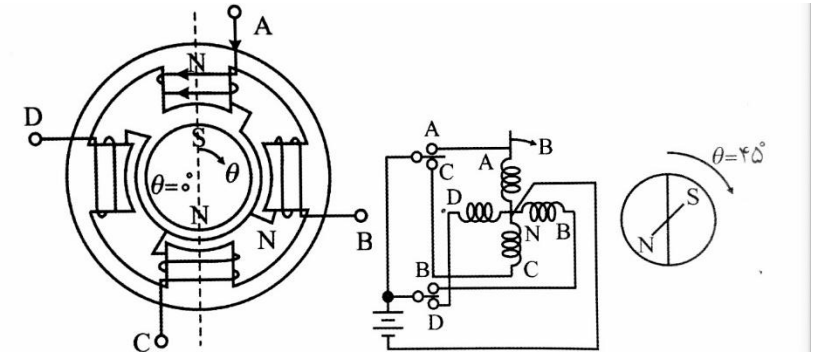
این روش کاهش زاویه به نصف پله نرمال را «مورد تحریک نیم پله» نامند. این روش در حالت کلی، توسط تحریک مناسب یک سیم‌پیچ فاز، دو سیم‌پیچ فاز باهم، یک سیم‌پیچ فاز و ... پیاده‌سازی می‌گردد. در شکل (۹-۱) نیز، تحریک نیم پله توسط تحریک سیم‌پیچی‌ها با توالی $\{+A, (+A+B), +B, (+B+C), +C, \dots\}$ به دست می‌آید که با آنچه قبلاً گفته شد هم‌خوانی دارد.



شکل (۹-۶): چرخش رتور به‌اندازه $45°$ با تحریک دو سیم‌پیچ فاز به‌طور همزمان در موتور پله‌ای مغناطیس دائم

مدار سوئیچینگ برای زاویه پله $45°$ در PMSM نشان داده‌شده در شکل (۹-۶)، تا حدی پیچیده است. به‌منظور تسهیل در کلید زنی از ساختار ۲/۴ قطب چهار فاز نشان داده‌شده در شکل (۹-۷-الف) استفاده می‌شود. سیم‌پیچی روی هر قطب به‌عنوان سیم‌پیچی یک‌فاز هست. این سیم بندی می‌تواند با ولتاژ تک فاز تغذیه گردد، درحالی‌که در شکل (۹-۶) به منبع ولتاژ دو فاز نیاز است. در سیم بندی چهار فاز، چهار ترمینال مشابه به هم وصل می‌گردند و نقطه نول N را به وجود می‌آورند. چهار ترمینال، A، C،B و D، توسط تغذیه چهار فاز با توالی مناسب تحریک می‌شوند. با تحریک سیم‌پیچی Aبه‌تنهایی، رتور مطابق شکل (۹-۷- الف) در وضعیت $\theta = 0°$ قرار می‌گیرد. چنانچه هر دو سیم‌پیچی فازهای A و B تحریک گردند رتور مطابق شکل (۹-۷-ب) در وضعیت $\theta = 45°$ قرار می‌گیرد.

توالی کلید زنی برای PMSM شکل (۹-۷) ساده است. رتور با پله‌های $45°$ در جهت عقربه ساعت حرکت می‌نماید و موقعیت‌های ۰، $45°$، $90°$، $135°$ و ... را اشغال می‌کند مشروط بر اینکه سیم‌پیچی‌ها با توالی $\{A, AB, B, BC, C, \dots\}$ تحریک شوند. برای حرکت در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، ترتیب کلید زنی باید به فرم $\{A, AD, D, DC, D, CB, B, \dots\}$باشد.



شکل (۹-۷): موتور پله‌ای مغناطیس دائم ۲/۴ قطب چهار فاز

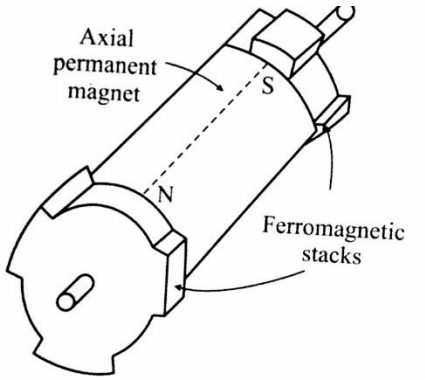
در PMSM ها حتی با جریان تحریک صفر، مقداری گشتاور تولید می‌شود که تمایل دارد قطب‌های PM رتور را با دندانه‌های استاتور هم‌محور سازد. اما این حالت در مورد VRSM ها وجود ندارد. بنابراین، PMSM ها دارای این مزیت هستند که می‌توانند با تولید مقداری گشتاور در حضور خطاهای مقداری درایو، موقعیت را ثابت نگه‌دارند. عیب PMSM ها این است که به دلیل محدودیت‌های ساختاری دستیابی به پله‌های کوچک‌تر میسر نمی‌باشد.

موتورهای پله‌ای هایبرید

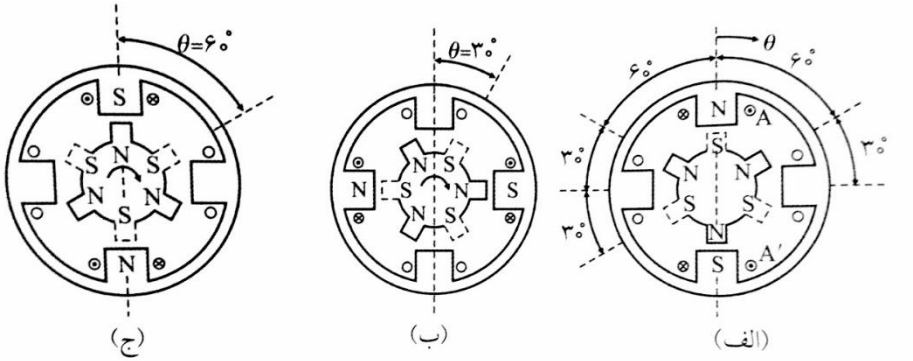
موتور پله‌ای هایبرید ویژگی‌های هر دو نوع موتور پله‌ای PM و VR را به همراه دارد. شمای رتور موتور پله‌ای هایبرید (HSM) در شکل (۹-۸) نشان داده‌شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد این رتور شامل یک مغناطیس دائم محوری است که به انتها آن، دوتکه فرو مغناطیس یکسان متصل شده است. این دوتکه دارای تعداد دندانه‌های یکسان هستند. در این شکل، هر تکه دارای سه دندانه هست. در یک انتها تکه دارای پلاریته مغناطیسی N و در انتهای دیگر دارای پلاریتهٔ Sهست. این دوتکه به‌اندازه نصف گام دندانه رتور نسبت به هم جابه‌جایی زاویه‌ای دارند. استاتور این نوع موتورها قطب برجسته است و از یک انتها به انتهای دیگر پیوسته (سرتاسری) است قطب‌های استاتور، مشابه انواع دیگر موتورهای پله‌ای، دارای سیم‌پیچی‌های متمرکز هستند. ساختار قطب‌های استاتور در VRSMسه‌تکه به‌صورت گسسته (جدا جدا) و در HSM به شکل پیوسته است.

به‌منظور درک اصول کار HSM به شکل (۹-۹) رجوع کنید. در این شکل، قطب‌های N در انتهای جلویی شکل (۹-۸) با خطوط پررنگ و قطب‌های S در انتهای عقبی شکل (۹-۸) با خطوط نقطه‌چین نشان داده‌شده‌اند. هنگامی‌که سیم‌پیچی فاز A با جریان i_a تحریک می‌شود، قطب N در A و قطب S در A’ بر روی استاتور ایجاد می‌شوند. مطابق شکل (۹-۹- الف)، قطب مربوط به A، قطب S انتهای عقبی و قطب مربوط به A’، قطب N انتهای جلویی را جذب می‌کند. این موقعیت تعادلی ساختار رتور منجر به ماکزیمم کوپلاژ شار با سیم‌پیچی فاز Aمی‌شود. به‌منظور چرخش رتور در جهت عقربه‌های ساعت به میزان یک پله، سیم‌پیچ فاز A از تغذیه قطع می‌گردد و سیم‌پیچ فاز Bبه‌گونه‌ای تحریک می‌گردد که قطب N در B و قطب S در B’ روی استاتور ایجاد شود.



شکل (۹-۸): شمای رتور یک موتور پله‌ای هایبری



شکل (۹-۹): موتور پله‌ای هایبرید ۶/۴ قطب، دو فازه. الف) سیم‌پیچی فاز A تحریک می‌شود. ب) سیم‌پیچی فاز B تحریک می‌شود. ج) سیم‌پیچی فاز A در جهت عکس تحریک می‌شود.

قطب مربوط به B، قطب S مربوط به انتهای عقبی را جذب می‌کند و قطب مربوط به B’ ، قطب N انتهای جلویی را جذب می‌کند. بنابراین مطابق شکل (۹-۹-ب) یک چرخش پله‌ای 30درجه‌ای در جهت عقربه‌های ساعت حاصل می‌گردد. در این وضعیت تعادلی، ماکزیمم کوپلاژ شار با سیم‌پیچی فاز B اتفاق می‌افتد. قطب روی A، N جلویی را جذب می‌کند و قطب روی A’، S عقبی را می‌رباید. در این صورت مطابق شکل (۹-۹-ج)، یک چرخش پله‌ای ۳۰ درجه‌ای دیگر در جهت عقربه‌های ساعت انجام می‌گیرد. بدین روش با دوازده پله، رتور یک دور کامل می‌چرخد. توالی تحریک سیم‌پیچ‌های فاز برای چرخش در جهت عقربه‌های ساعت $\{ABA'B'A\}$هست و بنابراین برای چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، توالی به فرم $\{AB'A'BA\}$ خواهد بود. مشابه PMSM ها، قطب‌های رتور در HSM نیز تمایل دارند، حتی غیاب جریان‌های تحریک استاتور، خود را با دندانه‌های استاتور هم‌راستا سازند. اندازه زاویه‌ای پله یک موتور پله‌ای هایبرید نیز از رابطه (۹-۱) به دست می‌آید. اما اکنون P باید معادل کلی تعداد دندانه‌های رتور روی هر دوتکه باشد.

بعضی اصطلاحات کاربردی در موتورهای پله‌ای عبارت‌اند از:

۱- «زاویه پله» عبارت است از زاویه‌ای که شافت در پاسخ به یک پالس ورودی می‌چرخد.

۲- «دقت یک پله» که به‌طور معکوس با زاویه پله متناسب است. هر چه زاویه پله کوچک‌تر، تعداد پله‌ها در چرخش یک دور رتور بیشتر و بنابراین «دقت یک پله» بالاتر.

۳- در حالت سکون، موتور تحریک‌شده با چرخش رتور به‌واسطه گشتاور بار مقابله می‌کند. «گشتاور نگه‌دارنده» اصطلاحی است که برای گشتاور به کار می‌رود. گشتاور نگه‌دارنده به‌عنوان ماکزیمم گشتاور باری که می‌تواند به شافت یک موتور تحریک‌شده اعمال گردد تعریف می‌شود مشروط بر اینکه چرخش پیوسته رتور حادث نشود.

۴- در وضعیتی که موتور تحریک نمی‌شود موتور پله‌ای PM و هایبرید قادرند گشتاوری تولید کنند که مانع چرخش رتور گردد. اصطلاح «گشتاور قفل» به‌عنوان ماکزیمم گشتاور باری تعریف می‌شود که می‌تواند به شافت یک موتور تحریک نشده اعمال گردد بدون آنکه سبب چرخش پیوسته آن گردد.

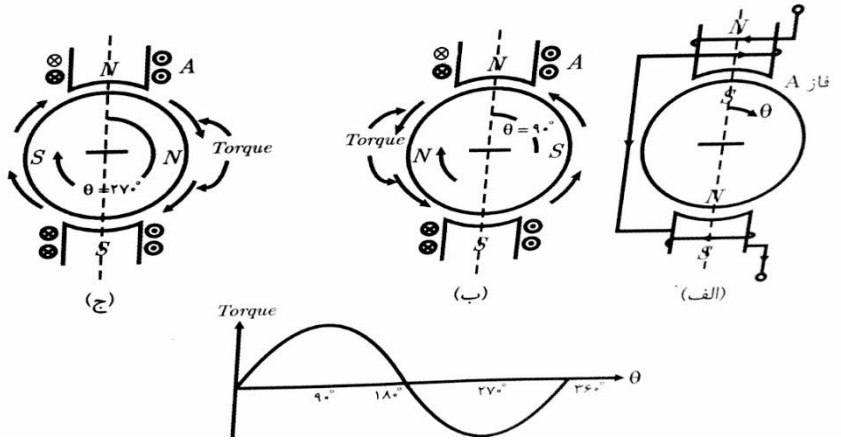
مشخصه‌های موتورهای پله‌ای

دو مشخصه مهم موتورهای پله‌ای عبارتنداز: ۱) مشخصه گشتاور- جابجایی و ۲) مشخصه گشتاور- نرخ پله. اکنون به‌اختصار، این مشخصه‌ها تشریح می‌گردند.

مشخصه گشتاور – جابجایی

در یک ماشین پله‌ای، این مشخصه بیانگر تغییرات گشتاور الکتریکی تولیدی برحسب موقعیت θ رتور هست که با تحریک مداوم یکی از سیم‌پیچ‌های استاتور و اندازه‌گیری موقعیت تعادل پایدار رتور به دست می‌آید.

در ماشین پله‌ای PM نشان داده‌شده در شکل (۹-۱۰- الف) فرض می‌گردد که سیم‌پیچی فاز Aبه‌تنهایی به‌طور دائم تحریک می‌گردد. در این شکل، محورهای مغناطیسی رتور و استاتور هم‌راستا هستند، $\theta = 0$ ، و گشتاور تولیدی (متناسب با حاصلضرب نیروی محرکه مغناطیسی استاتور، نیروی محرکه مغناطیسی رتور و $sin\ \theta$) برابر صفر هست.

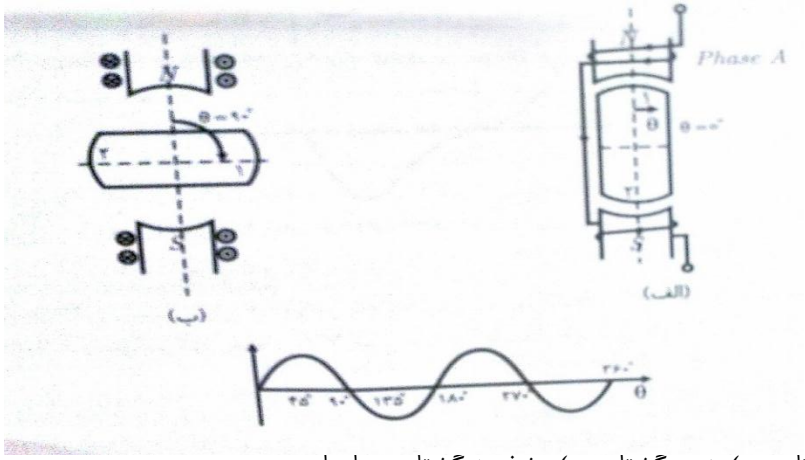


شکل (۹-۱۰): نمایش موتور پله‌ای PM، الف) بدون گشتاور، ب) گشتاور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، ج) گشتاور در جهت عقربه‌های ساعت و د) مشخصه گشتاور- جابجایی

با افزایش θ از صفر، گشتاور افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۹-۱۰ ب) در $\theta = 90°$، گشتاور، ماکزیمم می‌گردد. هنگامی‌که θ از $90°$فراتر می‌رود گشتاور شروع به کاهش می‌کند.

توجه نمایید که به ازای $0 < \theta < 180°$، گشتاور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به رتور اعمال می‌گردد. زمانی که $\theta = 180°$ است، گشتاور صفر هست. به ازای $\theta > 180°$، گشتاور در جهت عقربه‌های ساعت افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۹-۱۰- د) به تصویر کشیده شده است.

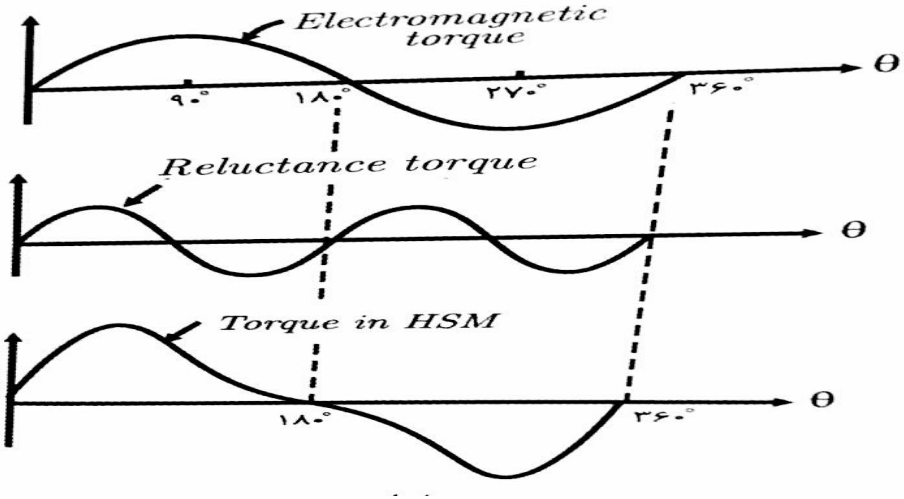
در موتور پله‌ای VR نشان داده‌شده در شکل (۹-۱۱-الف) فرض می‌گردد که صرفاً سیم‌پیچی فاز Aبه‌طور دائم تحریک می‌شود. هنگامی‌که محور طولی رتور با محور سیم‌پیچی استاتور هم‌محور می‌گردد، $\theta = 0°$ و گشتاور رلوکتانسی معادل صفر هست. با دور شدن محور رتور از موقعیت $\theta = 0°$، گشتاور رلوکتانسی افزایش می‌یابد.



شکل (۹-۱۱): موتور پله‌ای VR، الف) بدون گشتاور، ب) بدون گشتاور، ج) مشخصه گشتاور- جابجایی

این گشتاور تولید شد در خلاف جهت عقربه‌های ساعت هنگامی ماکزیمم می‌گردد که محور رتور به‌اندازه $45°$، یعنی $\theta = 45°$ دور گردد. به ازای θ های فراتر از $45°$، گشتاور رلوکتانسی کاهش می‌یابد. به ازای $0 < \theta < 90°$، گشتاور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت ایجاد می‌شود. مطابق شکل (۹-۱۱ب)، هنگامی‌که $\theta = 90°$ است، گشتاور رلوکتانسی صفر می‌باشد. برای θ های بزرگ‌تر از $90°$، گشتاور در جهت عقربه‌های ساعت از صفر افزایش می‌یابد. در $\theta = 90°$ در هر یک از دو جهت موافق یا مخالف جهت عقربه‌های ساعت از صفر افزایش می‌یابد. در $\theta = 90°$ در هر یک از دو جهت موافق یا مخالف جهت عقربه‌های ساعت می‌تواند حرکت نماید. بنابراین وضعیت در رتور در $\theta = 90°$ ناپایدار است. در $\theta = 135°$ مجدداً گشتاور ماکزیمم می‌گردد اما این بار در جهت عقربه‌های هست. هنگامی‌که $\theta = 180°$ است دوباره گشتاور صفر می‌شود. در بازهٔ $90° < \theta < 180°$، گشتاور رلوکتانسی در جهت عقربه‌های ساعت خواهد بود. مشخصه گشتاور- جابجایی موتور VR در شکل (۹-۱۱ج)، نمایانگر تغییرات گشتاور رلوکتانسی برحسب موقعیت θ رتور میباشد.

همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید یک موتور پله‌ای هیبرید، مشخصه‌های پله‌ای VR و PMرا ترکیب می‌نماید. بنابراین، گشتاور برآیند در موتور پله‌ای هیبرید مطابق شکل (۹-۱۲) با جمع زدن الف) گشتاور الکترومغناطیسی مشابه با موتور پله‌ای مغناطیس دائم و ب) گشتاور رلوکتانسی مشابه موتور پله‌ای رلوکتانسی متغیر به دست می‌آید.



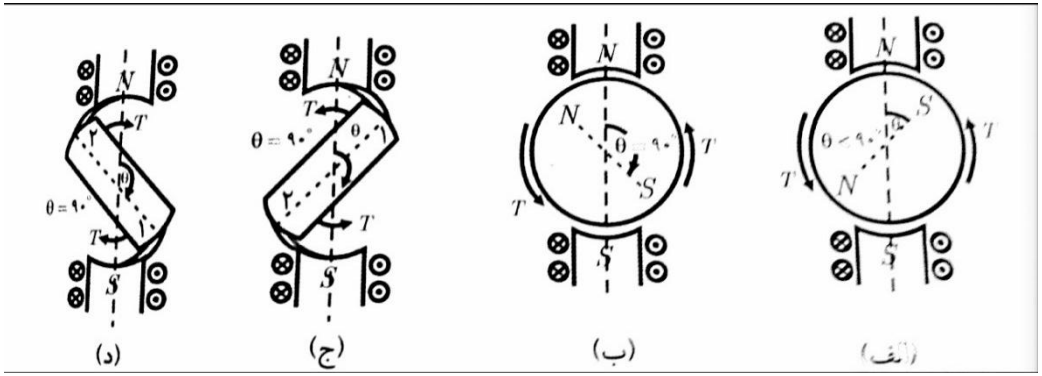
شکل (۹-۱۲): مشخصهٔ گشتاور- جابجایی در موتور پله‌ای هیبرید

مثال۱:

به ازای هر الگوی سیم‌پیچی در موتور پله‌ای، رتور موتور پله‌ای PM فقط یک موقعیت پایدار دارد درحالی‌که رتور موتور پله‌ای VR دو وضعیت پایدار ممکن دارد. این موضوع را توضیح دهید.

حل:

در موتور پله‌ای با PM، مطابق شکل (۹-۱۳-الف)، هنگامی‌که $\theta < 90°$ است گشتاور الکترومغناطیسی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت ایجاد می‌شود. لذا، رتور نیز در خلاف جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند تا محور مغناطیسی رتور را با محور مغناطیسی استاتور هم‌راستا نماید به‌صورتیکه نهایتاً $\theta = 0°$ گردد.



شکل (۹-۱۳): مربوط به مثال ۱

هنگامی‌که $\theta > 90°$، مطابق شکل (۹-۱۳ب)، دوباره گشتاور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت خواهد بود. گشتاور در $\theta = 180°$ نیز صفر است اما این وضعیت، ناپایدار است. یک اغتشاش زاویه‌ای کوچک حول موقعیت $\theta = 180°$ باعث می‌گردد که رتور مغناطیس دائم از موقعیت ۱۸۰ دور گردد و درنهایت در $\theta = 0°$آرام گیرد. این مطلب مؤید آن است که به ازای یک الگوی سیم‌پیچی، رتور موتور پله‌ای PM یک موقعیت پایدار و کاملاً شناخته‌شده در $\theta = 0°$ برای $0 < \theta < 360°$ دارد.

در یک موتور پله‌ای VR با رتور فرو مغناطیس، مطابق شکل (۹-۱۳ ج)، هنگامی‌که $\theta < 90°$، گشتاور رلوکتانسی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت هست. درنتیجه، رتور در خلاف جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌نماید به‌نحوی‌که سر شماره «۱» رتور به‌سوی قطب N استاتور و سر شماره «۲» آن به‌سوی قطب S استاتور جذب می‌شوند. درنهایت، محور طولی رتور با محور مغناطیسی استاتور هم‌راستا می‌گردد و گشتاور رلوکتانسی در $\theta = 0$ صفر می‌شود. شکل (۹-۱۳ د) موقعیت سر شماره «۱» رتور را در بازهٔ $90 < \theta < 180°$ نشان می‌دهد. اکنون، سر شماره «۱» قطب N و سر شماره «۲» قطب S محسوب می‌شود. درنتیجه، باجذبه سر شماره «۱» به‌سوی قطب S و سر شماره «۲» به‌سوی قطب N، گشتاوری در جهت عقربه‌های ساعت به رتور وارد خواهد شد. درنهایت، رتور در $\theta = 180°$ به آرامش می‌رسد. به‌طور مشابه می‌توان نشان داد هنگام قرار داشتن رتور در موقعیتی مابین $180° > \theta < 360°$ و $\theta < 360°$ ، رتور نهایتاً در $\theta = 180°$ یا $\theta = 360°(= 0°)$آرام می‌گیرد. گرچه هنگام $\theta = 0°$ یا $\theta = 270°$، گشتاور رلوکتانسی صفر است اما این وضعیت‌ها، ناپایدار هستند. یک اغتشاش زاویه‌ای کوچک حول امتداد $\theta = 90°$ یا $\theta = 270°$، موجب می‌گردد رتور به موقعیت $\theta = 0°$ یا $\theta = 180°$ منتقل گردد. این مطلب نشان می‌دهد که به ازای یک الگوی سیم بندی روی استاتور موتور پله‌ای VR، دو وضعیت پایدار امکان‌پذیر است (برای رتور فرو مغناطیس) یکی در $\theta = 0$ و دیگری در $\theta = 180°$.