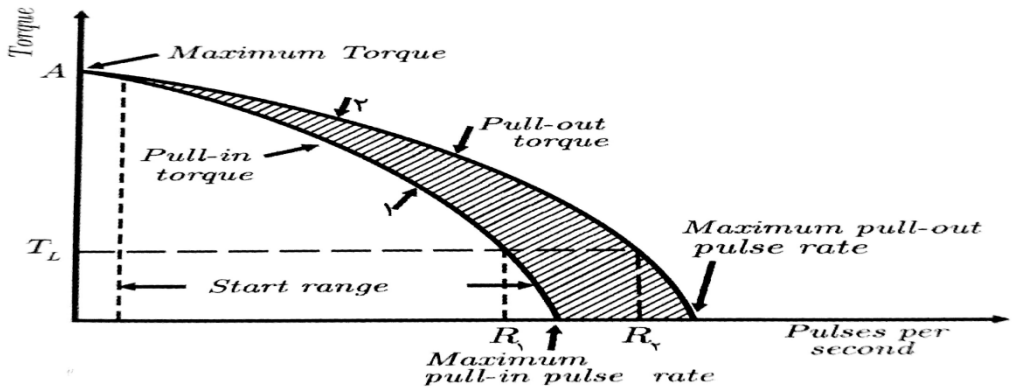
۲-۴-۳- مشخصه گشتاور –نرخ پالس

این مشخصه، تغییرات گشتاور الکتریکی را بر حسب نرخ پله (تعداد پله در ثانیه) ارائه می دهد. با افزایش نرخ پله، رتور زمان کمتری برای بردن با از یک موقعیت به موقعیت بعدی صرف می کند؛ بنابراین گشتاور مربوطه مطابق شکل (۹-۱۴) توصیف می شود یک موتور پله ای عموماً توسط دو منحنی مشخصه۱ و ۲ نشان داده شده در شکل (۴-۱۹) توصیف می شود. منحنی۱ مشخصه گشتاور ورود را مشخص می سازد.

این منحنی، ماکزیمم نرخ پله ای را نشان می دهد که به ازای آن موتور می تواند به ازای مقادیر مختلف گشتاور بار بچرخد مشروط بر این که قبلا وارد مود سنکرون شده باشد اما با این نرخ نمی تواند راه اندازی یا متوقف گردد یا تغییر جهت دهد . به عنوان مثال برای گشتاور بار T_L و R_1 معادل ماکزیمم نرخ پله بر حسب تعداد پالس در ثانیه می باشد و در این نرخ موتور می تواند بسته به نیاز راه اندازی و وارد مورد سنکرون شود متوقف گردد یا تغییر جهت دهد بعد از اینکه موتور راه اندازی شد و با گشتاور بار T_Lسنکرون گردید بدون انکه از مورد سنکرون خارج گردد نرخ پله می تواند تا حداکثر نرخ پله ای R_2 افزایش داده شود. نرخ پله از R_1 به R_2 برای T_L ، نرخ محدود تغییرات نامیده می شود . بازده محدوده تغییرات توسط فضای ما بین محنی های ۱ و ۲ در مشخصه گشتاور –نرخ پالس تعیین می گردد. مشخصه ما بین منحنی ۱ و خط عمود با نرخ پالس صفر، بازه راه اندازی نامیده می شود. بخش نقطه چین منحنی های ۱ و ۲ بر روی شکل (۹-۱۴) موسوم به ناحیه با نرخ پالس پایین در عمل هیچگاه استفاده نمی شود. زیرا بواسطه فقدان دمپر در نرخ پالس پایین می باشد و منحنی ۱ که معرف گشتاور ورود است قرار دارد.

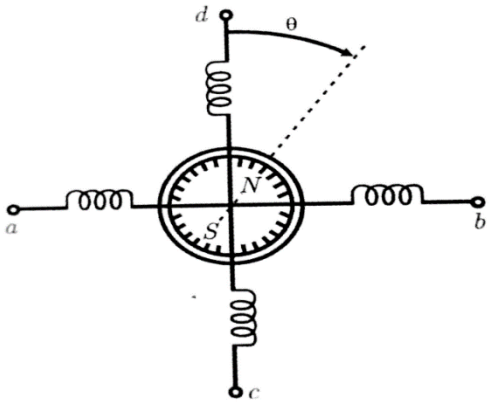


در بازه راه اندازی، موتور می تواند راه اندازی شده و با پالسهای ورودی سنکرون شود و یا متوقف و تغییر جهت دهد در بازه محدود تغییرات، موتور نمی تواند راه اندازی، متوقف و یا مطابق فرمان تغییر جهت دهد در بازه محدوده تغییرات، موتور نمی تواند راه اندازی متوقف و یا مطابق فرمان تغییر جهت دهد. برای عملکرد موتور در بازه محدود تغییرات باید موتور در بازه راه اندازی در ابتدا به حرکت درآید و سپس نرخ پالس را تا منحنی ۲ که مبیّن گشتاور خروج است دنبال می کند. برای نرخ پالسهای بالاتر از منحنی ۲ بار شروع به از دست دادن پالس می نماید. ماکزیمم گشتاور، نقطه A در شکل (۹-۱۴) معادل ماکزیمم گشتاور نگهدارنده موتور تحریک شده در قبال یک بار دائم می باشد.

مثال۲:

الف) مطابق شکل (۹-۱۵) موتور پله ای مغناطیس دائمی با سیم بندی چهار فاز آرایش داده شده است . ورودی دیجیتال به موتور از یک پردازنده چهار بیتی به دست می آید در منطق دودویی، "۱" به حالت روشنی و "۰" به حالت خاموشی اطلاق می گردد. بنابراین ۱۰۰۰ بدان معناست که صرفا فاز a تحریک می شود و ۱۰۱۰ به معنی تحریک سیم پیچهای a و c می باشد . جدولی از سیگنالهای چهار بیتی که متناظر با موقعیتهای زاویه ای رتور در زوایای 0° ، 45° ، 90° و ... و 360° هستند را به دست آورید (در جهت عقربه های ساعت).

ب) موتور معرفی شده در بند (الف) قرار است که با اعمال سیگنال دیجیتال ورودی با توالی مناسب به چهار سیم پیچی آن در سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه بچرخد. مطلوبست محاسبه بازه زمانی مابین اعمال دو سیگنال دیجیتال به موتور.



حل:

الف)برای چرخش در جهت عقربه های ساعت جدول مربوط به سیگنالهای چهار بیتی به صورت زیر خواهد بود.

جدول (۹-۱) : سیگنالهای چهاربیتی و توالی آنها جهت چرخش موتور در جهت عقربه های ساعت

↓ θ	a	b	c	d
0°	1	0	0	0
45°	1	1	0	0
90°	0	1	0	0
135°	0	1	1	0
180°	0	0	1	0
225°	0	0	1	1
270°	0	0	0	1
315°	1	0	0	1
360°	1	0	0	0

ب) برای یک دور گردش ۸ گام (هر یک ۴۵ درجه) نیاز است .این بدین معناست که زمان لازم برای یک دور گردش رتور نیز با زمان مورد نیاز ۸ گام یکی است بنابراین :

$$\text{زمان لازم برای } 8 \text{ گام} = \frac{60}{1500}\sec = \text{زمان برای یک دور گردش}$$

$$\rightarrow \text{زمان برای یک گام} = \frac{60}{1500} \times \frac{1}{8} \times 1000 = 5ms$$

لذا فاصله زمانی بین سیگنالهای دیجیتال باید ۵ ملی ثانیه باشد

۹-۳-۵- مدرات درایو موتورهای پله ای

منبع تغذیه DC جهت مدار درایو باید تا حد امکان عاری از هارمونیک باشد. به همین خاطر یکسوسازهای تک فاز توصیه نمی شوند اما یکسوسازهای سه فاز یا باتری بعنوان منبع تغذیه مدران درایو موتورهای پله ای مناسب هستند.

به منظور دستیابی به خروجی گشتاور بهینه از یک موتور پلاه ای مدارات درایو باید دارای خصوصیات ذیل باشند:

۱. در حین روشن شدن، جریان در سیم پیچی فاز در یک زمان کوتهای از مقدار صفر به سطح مطلوب سعود نماید.

۲. در حین خاموش شدن، جریان در سیم پیچی فاز باید الزام گردد تا در کوتاهترین زمان ممکن به صفر برسد.

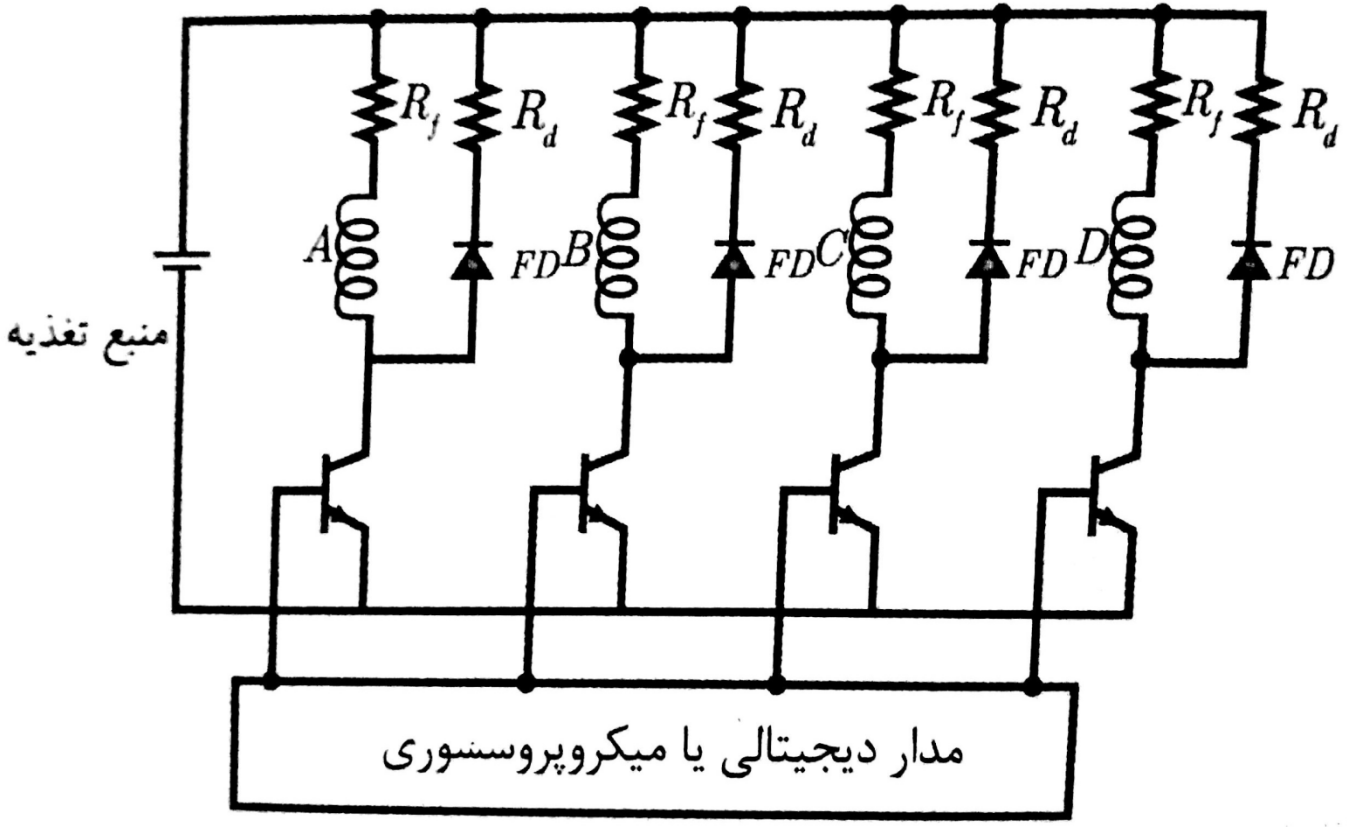
جهت تحقق اهداف فوق الذکر چندین مدار درایو ارائه شده اند. انتخاب هریک از این مدارها به زاویه گام، ظرفیت توانی موتور پله ای و امکان بازیابی انرژی ذخیره شده در سلف سیم پیچی فاز به منبع تغذیه DC بستگی دارد . در ادامه مدارات درایو ساده ای برای سه نوع موتور پله ای به اختصار تشریح می گردد.

۹-۳-۵-۱ مدار درایو تک قطبی برای موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VRSM)

در شکل (۹-۱۶) مدار درایو تم قطبی (یا بدون جهت) موتور پله ای VR چهار فاز نشان داده شده است. از آنجا که گشتاور در موتور رلوکتانسی با مجذور جریان متناسب است جهت جریان در سیم پیچهای فازها در عملکرد این موتور نقشی ندارد.

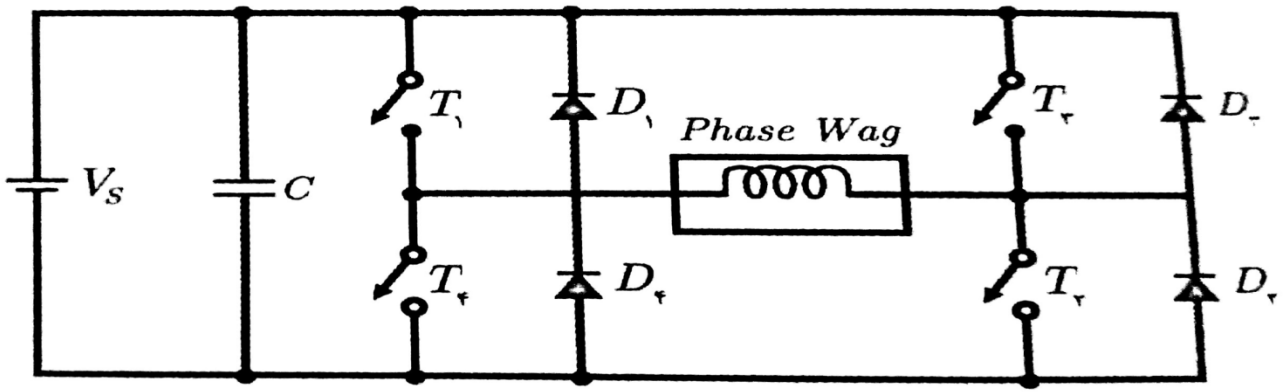
مدار مجتمع دیجیتال یا یک میکروپروسسور (پردازشگر) در لحظات معینی سیگنالهای مورد نیاز جهت اعمال به ترانزیستورها و روشن نمودن آنها را تولید می نمایند . در این روش سیم پیچهای چهار فاز D، C،B،A با یک توالی خاصی تحریک می شوند . سیم پیچهای هر فاز دارای اندوکتانس بزرگی است بنابراین به صورت سری با سیم پیچی هر فاز یک مقاومت مجبور کننده R_f اضافه می گردد تا ثابت زمانی مدار را کاهش دهد لذا این رایش صعود سریع جریان را در حین روشن شدن مجاز می سازد و کنترل سرعت و وسیع تری را نیز میسر می سازد اما مقاومتهای R_f راندمان مدار را کاهش می دهند به علاوه یک مقاومت R_d نیز با دیود هرزگرد به صورت سری قرار می گیرد تا انرژی دخیره شده در اندوکتانس سیم پیچی فاز را تلف نماید.

برای موتورهای پله ای VR با توان نسبتا بالا مدارهای درایو به گونه ای طراحی می شوند که انرژی سلفی دخیره شده در مدار مغناطیسی موتور بتواند به منبع تغذیه DC برگردانده شود


R_f
R_d
A
FD
B
C
D
منبع تغذیه
مدار دیجیتالی یا میکروپروسسوری

۹-۳-۵-۲ مدار درایو دو قطبی برای موتورهای پله ای PMو هیبرید

در موتورهای پله ای مغناطیس دائم و هیبرید گشتاور با جریان فاز متناسب است. لذا جهت چرخش در این موتورها به جهت جریان در سیم پیچ های فاز بستگی دارد . برای گردش در یک جهت بنابراین جریان دو قطبی (یا دو جهته) در سیم پیچ های موتور ضروری می باشد. بنابراین یک مدار درایو دو قطبی برای هر فاز لازم می باشد. یک اینورتر تمام پل تک فاز مطابق شکل (9-17) به طور مرسوم برای موتورهای پله ای PM و هیبرید به کار گرفته می شود. در اینجا T_1 الی T_4 چهار کلید قابل کنترل می باشند. این کلیده ها بسته به میزان جریانی که باید از خود عبور دهند می تواند ترانزیستور یا تریستور باشد هنگامی که این این کلیدها بسته می شوند جریان در جهت فلشهای مرتبط با انها جاری می شود. امروزه ماژولهای درایوی تکه تراشه نیز برای استفاده در موتورهای پله ای موجود هستند.



۹-۳-۶ ظرفیت توانی و کاربردها

ظرفیت توانی موتورهای پله ای معمولاً پایین است حداکثر رنج توانی ممکن است به 2/5 کیلو وات هم برسد و حداقل رنج توانی حدود چند میکرو وات می باشد. موتورهای پله ای VR درگام های کوتاه 15° و کمتر کار می کنند و قادر هستند با سیگنالهایی تا ۱۲۰۰ پالس در ثانیه سنکرون شوند. موتورهای پله ای PM در گامهای بلند، معمولا بالای 5° و تا ماکزیمم 90° کار می کنند و بگونه ای ساخته می شوند که به ماکزیمم نرخ پالس ۳۰۰ پالس در ثانیه پاسخ دهند موتورهای پله ای هیبرید دارای مشخصه هر دو نوع موتور پله ای PM و VR می باشند یک موتور پله ای هیبرید:

۱) می تواند برای داشتن اندازه –گام کوچک ($1/8^{\circ}$) ساختنر مغناطیسی ساده ای در مقایسه با موتور پله ای PM دارا باشد که در آن به ساختار چمد قطبی پیچیده ای نیاز خواهد بود.

۲) به علاوه به ازای یک گشتاور خواسته شده در مقایسه با موتور VR موتور هیبرید به تحریک کمتریی نیاز دارد. زیر بخشی از تحریک توسط مغناطیس های دائم تامین می گردد.

موتورهای پله ای به وفور در موقعیت یابی ابزرا در سیستم های ماشینی NC استفاده می شوند. زیرا:

الف) سیگنال خروجی در سیستم های NC به صورت دستورالعمل هایی بر روی نوار یا کاغذ پانچ شده می باشد . یک موتور پله ای می تواند بدون نیاز به مبدلهای آنالوگ به دیجیتال (A/D) و دیجیتال به آنالوگ (D/A) با چنین سیگنال های ورودی کار کند.

ب) موتور پله ای به حسگر مکانیکی و مدارات فیدبک نیازی ندارد که در ئرایوهای ماشین ابزار این مدارات بسیار پیچیده است.

ج) طراحی سیستم حلقه-باز ساده است و نیازی به بررسی مسائل پایداری نمی باشد.

علاوه بر استفاده موتورهای پله ای در ابزار ماشینی NC این موتورها به عنوان موتورهای تغذیه کننده کاغذ در پرینترها بکار گرفته می شوند . انها همچنین در پلاتر های y-x صنعت نساجی ، ساخت مدارات مجتمع ، روباتیک ، دوربین های ویدیوئی و دیسک درایوها در کامپیوترها استفاده می شوند در اندازه های خیلی کوچک ، موتورهای پله ای بعنوان تامین کننده کاغذ در ماشین حساب های دستی به کار می روند در محدوده میکرو وات ان نوع موتورها به وفودر در ساعت مچی کریستال-کوآرتز و ساعت ها استفاده می شوند.

۹-۴- موتورهای رلوکتانس متغیر

موتور رلوکتانس متغیر (VRM) به موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده مشهور است و این نام مبین آن است که جهت درایو نمودن یک موتور VR به اینورتر سوئیچینگ نیاز است. اصول عملکرد این موتور مشابه موتور پله ای رلوکتانس متغیر یک تکه می باشد که قبلا مطالعه گردید. اما برایندهای طراحی و استراتژی های کنترلی در VRM با آنچه که در موتورهای پله ای استفاده می شود متفاوت است به عنوان مثال VRMبه یک سنسور موقعیت موتور احتیاج دارد در حالی که در VRSM برای چرخش پله ای طراحی می گردد.VRM نباید با موتور رلوکتانسی سنکرون اشتباه گرفته شود یک موتور سنکرون دارای استاتور استوانه ای شکل با سیم بندی توزیع شده و رتور قطب برجسته با سیم پیچی متمرکز میدان می باشد.

VRM سیم پیچی های متمرکزی روی قطب های استاتور دارد و هیچگونه سیم پیچی روی دندانه های رتور آن نیست.

یک موتور سنکرون با تحریک سیم پیچ میدان به عنوان یک موتور سنکرون قطب برجسته تلقی گردد که می تواند با قطع سیم پیچی میدان به عنوان یک موتور سنکرون رلوکتانسی عمل نماید امروزه استفاده از موتورهای رلوکتانس متغییر در درایوهای با قابلیت کنترل سرعت به خاطر ویژگی های زیر رو به افزایش است:

با توجه به سیم پیچی متمرکز ساده بر استاتور و عدم وجود سیم پیچ بر روی رتور این موتور به لحاظ ساختار ساده است .Type equation here.

۱. سیم پیچی های استاتور می توانند به آسانی و با راندمان بالا خنک شوند.

۲. این موتور به واسطه فقدان هر گونه سیم پیچ بر روی رتور و ساختار محکم رتور می تواند به طور موفقیت امیز در سرعت های بالا (تقریباً $2 \times 10^5\ rpm$)بچرخد. به خاطر خنک کنندگی موثر استاتور ، به ازای مقادیر نامی معین، ابعاد ماشین کاهش می یابد.

۳. چونVRM می تواند با مدارات درایو یک جهته کار کند، هزینه مدرات الکترونیک قدرت و میکرو پروسسور آن کاسته می گردد.

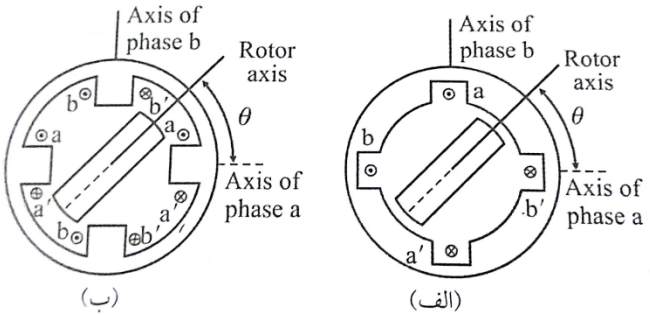
۴. VRM حتی اگر یک یا چند فاز آن بر اثر خطا از مدار خارج شوند می تواند در یک قدرن پایین تر به کار خود ادامه دهد.

۵. ازانجا که این متورها می توانند با تعداد زیادی دندانه بر روی رتور و استاتور ساخته شوند. نسبت گشتاور به واحد حجم در آنها بالاست.

با توجه به خصوصیات مطلوب فوق امروزه VRM یک گزینه مناسب برای درایوهای با قابلیت کنترل سرعت محسوب می شود به گونه ای که درایوهای VRM اکنون می توانند با درایوهای AC القایی و DC رقابت نماید.

۹-۴-۱- خصوصیات ساختاری

VRM ها می توانند مطابق شکل (۹-۱۸-الف) دارای ساختار تک برجسته و یا همانند شکل (۹-۱۸-ب) دارای جفت برجسته باشند. در شکل (۹-۱۸-الف) ، VRM تک برجسته دیده می شود که شامل یک استاتور غیر برجسته و یک رتور برجسته با دو قطب می باشد . همان گونه که نشان داده شده است رتور هیچ گونه سیم پیچی ندارد اما استاتور دارای سیم پیچ دو فاز است. در یک ماشین واعی تعداد سیم پیچ های فاز می تواند بیش از دو تا باشد اندوکتانس هر سیم پیچ فاز استاتور با موقعیت رتور تغییر می کند و هنگامی دارای ماکزیمم مقدار است که محور سیم پیچ فاز استاتور با محور رتور همراستا گردد. شکل (۹-۱۸-ب) یک VRM جفت برجسته را نشان می دهد که شامل چهار قطب برجسته روی استاتور و دو قطب برجسته روی رتور (بدون هیچگونه سیم پیچی) می باشد. سیم پیچ های متمرکز روی قطب های روبه روی هم به گونه ای به صورت سری یا موازی قرار می گیرند که سیم پیچی دو فاز روی استاتور ایجاد شود.



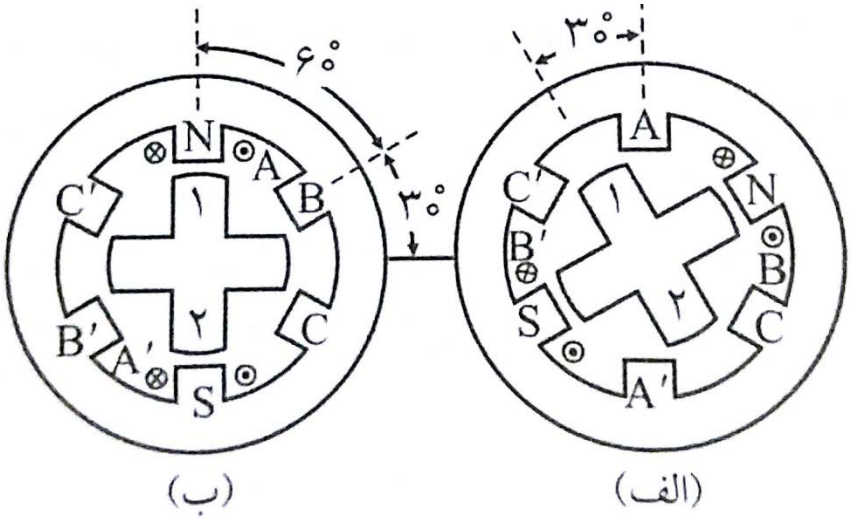
(۹-۱۸): VRM دو فاز مقدماتی: الف) برجستگی یگانه، ب) برجستگی دوبل

این مطلب نشان می دهد که هر دو VRM های شکل (۹-۱۸) دارای یک سیم پیچی استاتور دو فاز و یک رتور برجسته دو قطب می باشد به ازای یک سایز فریم یکسان ، VRM باجفت برجسته در مقایسه با متور تک برجسته ، گشتاور بیشتری تولید می کند. بنابراین VRM ها با جفت برجسته متداول ترند. لذا در ادامه فقط این نوع VRMها مورد بررسی قرار می گیرد.

VRMها همانند موتورهای پله ای VR یک تکه معمولاً با تعداد نامساوی دندانه (قطب) روی استاتور و رتور ساخته می شوند. مدارهای مغناطیسی رتور و استاتور این ماشین ها جهت کاهش تلفات فوکو و دستیابی به راندمان بالا به هنگام استفاده از درایوهای VRM به صورت مورق ساخته می شوند.

۹-۴-۲ اصول عملکرد

هماگونه قبلا اشاره شد اصول کار VRM مشابه موتورهای پله ای VR یک تکه می باشد شکل (۹-۱۹) یک موتور رلوکتانس متغیر ۴/۶ سه فاز را نشـان مـی دهـد بـا تحریک فاز a رتور مطابق شکل (۹-۱۹-الف) قرار می گیرد و کوپلاژ شاربا فاز b ماکزیمم شود برای چرخش بیشتر در خلاف جهت عقربه های ساعت فـاز b قطـع و c تحریک می گردد با تحریک سیم پیچ ها در جهت عقربه ساعت رتور در خلاف جهت عقربه ساعت می چرخد (یعنی ترتیب ABC برای موتور) شکل (۹-۱۹) در واقـع جریان های فاز به طور سنکرون با موقعیت رتور به نحوی روی فازهای استاتور کلیدزنی می شوند که چرخش پیوسته رتور حاصل گردد و گشتاور متوسطی تولی شود.

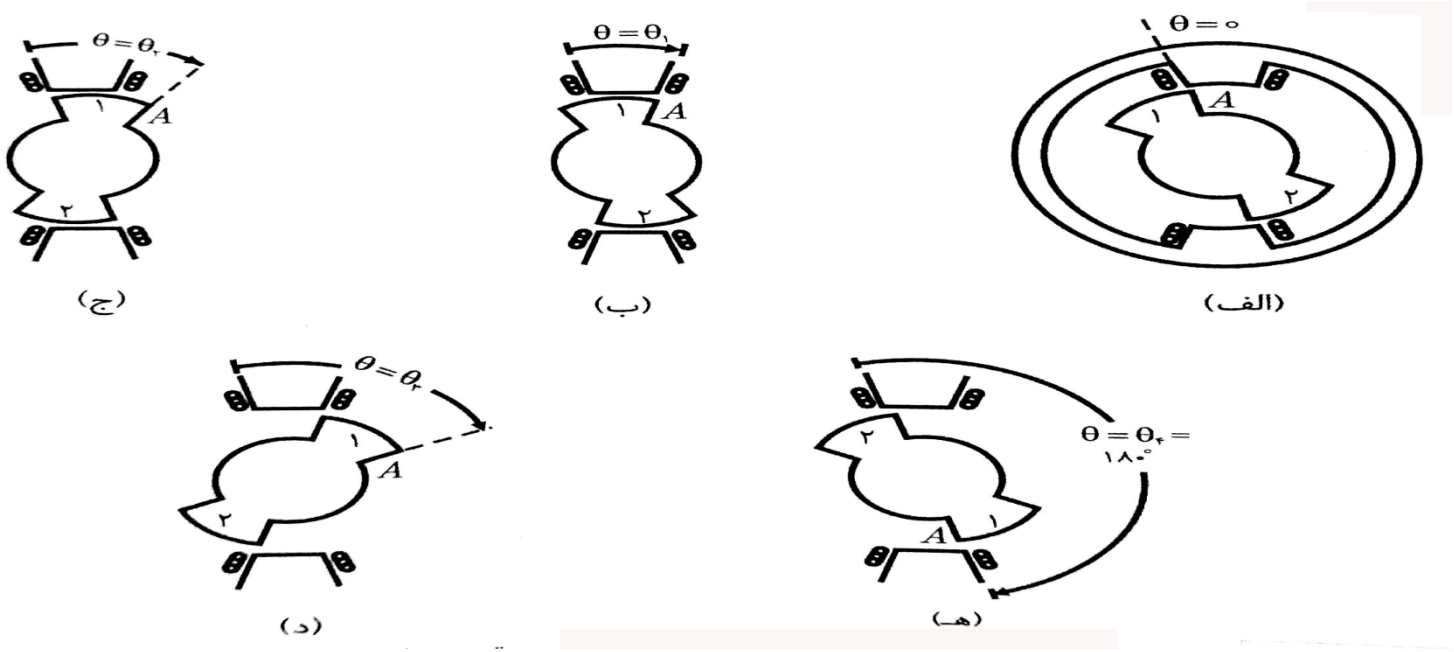


۹-۴-۳ تولید گشتاور

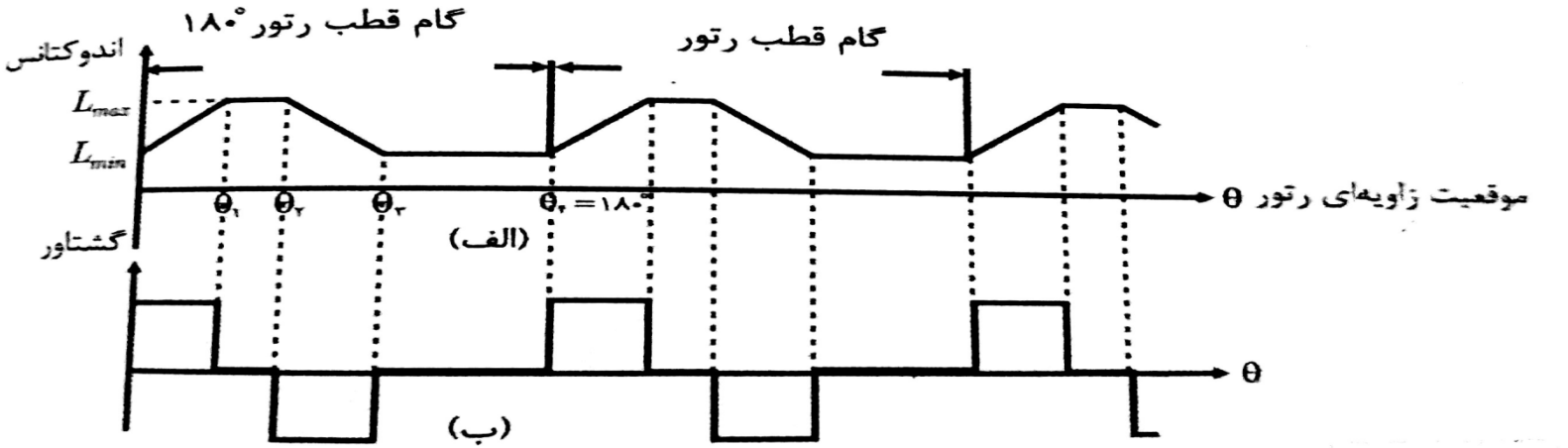
با فرض خطی بودن مدار مغناطیسی گشتاور رلوکتانسی تولیدی در موتور رلوکتانس متغیر عبارتست از :

$$T_0 = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \qquad (۹-۲)$$

که در ان I مقدار لحظه ای جریان تحریک در سیم پیچی فاز و L اندوکتانس خودی سیم پیچی فاز می باشد . از آنجا که گشتاور به تغییرات با مجذور جریان فاز است گشتاور مستقل از جهت جریان می باشد اما علامت گشتاور به تغییرات اندوکتانس با θ به ۱ (تعداد قطب های رتور و استاتور و ۲) قوس قطب های رتور و استاتور بستگی دارد برای درک بهتر نحوه تولید گشتاور به شکل (۹-۲۰) رجوع نمایید که در ان یک موتور VR مقدماتی با برجستگی دوبل با دو قطب روی هر یک از استاتور و رتور دیده می شود



در شکل (۹-۲۰-الف) زاویه θصفر در نظر گرفته می شود و اندوکتانس ، مینیمم یا L_minمی باشد. در این شکل سمت Aقطب ۱ رتور همراستا با لبه چپ قطب استاتور است. هنگامیکه رتور در جهت عقربه ساعت حرکت می کند ، قطب های رتور و استاتور شروع به همپوشانی همدیگر می کنند و در نتیجه بطور خطی رلوکتانس کاهش و اندوکتانس، افزایش می یابد . هنگامی که مطابق شکل شکل (۹-۲۰-ب) θ=θ_1می گردد همپوشانی قطب های استاتور و رتور کامل می شود و ملاحظه می گردد که رلوکتانس مینیمم و اندکتانس ، ماکزیمم یا L_maxمی باشد. تغییرات اندوکتانس از L_minبه L_maxخطی فرض می شود. هنگام حرکت رتور از θ_1به θ_2رلوکتانس همچنان مینیمم است و لذا در طول زائیه همپوشان (θ_2 -θ_1)اندوکتانس در مقدار ماکزیمم خود ثابت باقی می ماند. هنگامی که مطابق شکل (۹-۱۲-ج) رتور به میزان زوایای بزرگتر از θ_2حرکت کند همپوشانی قطب های رتور و استاتور رو به کاهش می گذارد و بالطبع اندوکتانس شروع به کاهش و رلوکتانس به مقدار مینیمم L_minکاهش می یابد. مشابه وضعیتی که قبلا به ازای ^⟦0°⟧ =θدر شکل (۹-۱۲-الف) به دست امد. در طول بازه حرکت رتور از θ_3به θ_4=180°آندوکتانس درمقدار مینیمم L min ثابت باقی می ماند تغیرات اندوکتانس در شکل (۹-۲۱-الف) ایده ال است.



شکل (۹-۲۱): الف) تغییرات اندوکتانس سیم‌پیچی فاز استاتور بر حسب θ ؛ ب) مشخصهٔ گشتاور - زاویه

براساس معادله (۹-۲) به ازای جریان ثابت در سیم پیچ های فازهای استاتور ، گشتاور رلوکتانسی بر حسب موقعیت زاویه ای رتور θ در شکل (۹-۲۱-ب) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد گشتاور رلوکتانسی مثبت است هنگامی که $\frac{dL}{d\theta}$ مثبت باشد و این گشتاور با منفی بودن مقدار $\frac{dL}{d\theta}$ منفی خواهد بود . هنگامی که L ثابت است هیچ گشتاوری تولید نمی گردد.
بررسی شکل (۹-۲۱-ب) آشکار می سازد که به ازای جریان ثابت و سیم پیچی ، متوسط گشتاور صفر است. گشتاور متوسط مقدار مثبتی خواهد داشت چنانچه سیم پیچی فاز به ازای بازه $\frac{dL}{d\theta}$ مثبت تحریک گردد و هنگامی که $\frac{dL}{d\theta}$ منفی است تحریک نشود . این رویه به ترتیب برای همه سیم پیچ های استاتور اجرا می گردد به نحوی که گشتاور مثبتی تولید گردد و رتور بچرخد. به منظور تعیین لحظات کلیدزنی برای سیم پیچ های فازهای مختلف وجود حسگر موقعیت رتور ضروری است.

در حالتی که همه سیم پیچ های فازها در طول بازه ایکه منحصراً $\frac{dL}{d\theta}$ منفی است تحریک شوند یک گشتاور متوسط منفی تولید می گردد.
عملکرد موتور در شرایط گشتاور منفی به معنای فرایند بازیابی انرژی سیستم درایو VRM می باشد. این امر نشانگر آن است که گشتاور در VRM می تواند صرفاً با شیفت دادن لحظات خاموش و روشن نمودن سیم پیچ هتی فازها در طول سیکل تغییرات اندوکتانس کنترل شود از انجا که درایو VRM به سهولت قابل کا در چهار ربع می باشد ، استفاده از این درایو موتور در حال گسترش است.

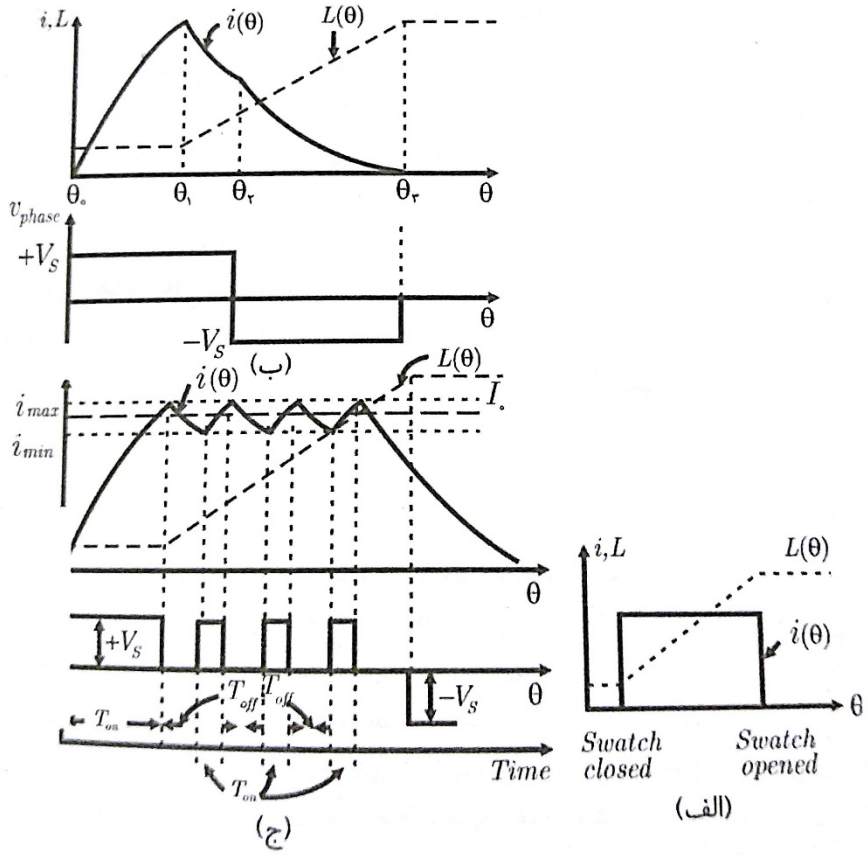
۹-۴-۴ مودهای کاری

موتور VR می تواند در دو مود کاری متمایز کار کند مود تک پالسه و مود مدولاسیون پهنای پالس (PWM) . این دسته مبتنی بر طبیعت شکل موج جریان در سیم پیچ های فازهای موتور رلوکتانس متغیر می باشد.

مود تک پالسه

در این مود سرعت بالا نیز معروف است . خیزجریان در طول بازه زمانی کوتاه تحریک هر فاز با محدودیت هایی همراه است . انی محدودیت جریان بواسطه اندوکتانس سیم پیچی و ولتاژ حرکتی تولید شده در سیم پیچ استاتور می باشد. شکل موج ایده آل جریان و تغییرات اندوکتانس بر حسب زاویه θ در شکل (۹-۲۲-الف) نشان داده شده است . در این شکل هنگامی که اندوکتانس شروع به افزایش می کند کلید بسته می شود و جریان بلافاصله به مقدار ثابتی می رسد. هنگامی که افزایش $L(\theta)$ متوقف می گردد کلید باز می شود و جریان بلافاصله به مقدار صفر کاهش داده می شود. در طول این زمان پالس جریان دارای مقدار مثبت ثابتی است و $L(\theta)$ در حال لفزایش است و لذا گشتاور مثبت تولید می شود. در عمل، چنین شکل موجهای ایده آلی وجود ندارند.

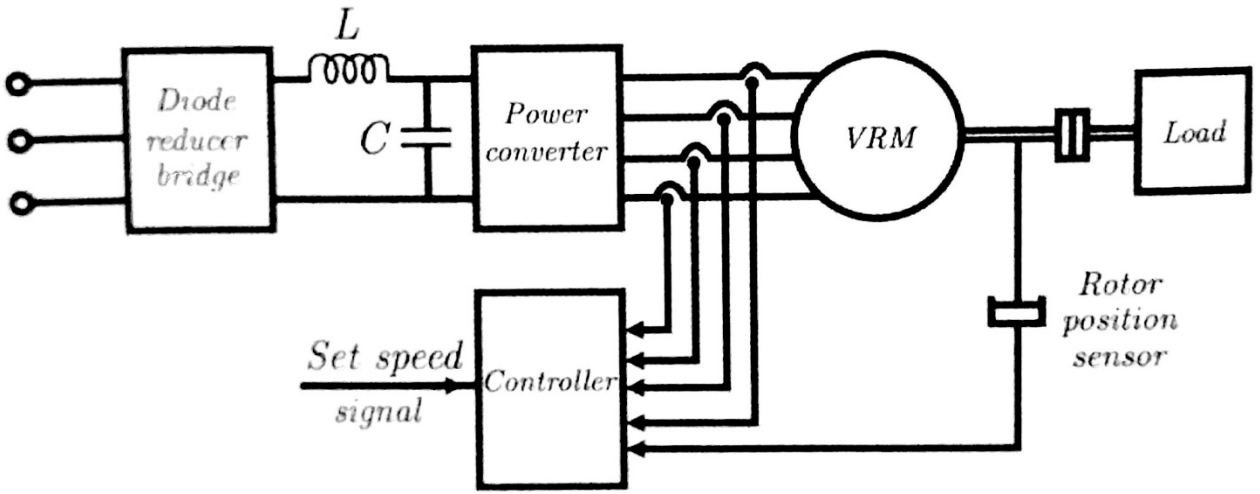
لحظه کلیدزنی سیم پیچ های فازها نسبت به زاویه θ رتور باید به گونه ای تنظیم شود که مطابق شکل (۹-۲۲-ب) گشتاور حاصله VRM ماکزیمم گردد. در این شکل ملاحظه می گردد که منبع ولتاژ V_S باید تا حدودی پیش از لحظه شروع صعود $L(\theta)$ به سیم پیچ اعمال گردد . اندوکتانس کوچک سیم پیچ این اجازه را به جریان $i(\theta)$ می دهد تا سریعتر به مقدار بزرگی صعود نماید پیش از انکه ناحیه تولید گشتاور آغاز گردد . بعد از θ_1 جریان $i(\theta)$ بواسطه خیزش $L(\theta)$ و ولتاژ حرکتی شروع به تنزل می کند تا اینکه در θ_2 سوئیچ باز می گردد . در زاویه θ_2 رتور، ولتاژ منفی به سیم پیچ فاز اعمال می گردد . این موضوع باعث سریع جریان می شود و نهایتاً $i(\theta)$ در لحظه θ_3 به صفر می رسد. زاویه $(\theta_2 - \theta_0)$ زاویه هدایت ترانزیستور (یا تریستور) و $(\theta_3 - \theta_2)$ زاویه هدایت دیود یک اینورتر می باشد. منبع تغذیه در بازه $(\theta_2 - \theta_0)$ انرژی به موتور تحویل می دهد و در بازه $(\theta_3 - \theta_0)$ توان از سمت ماشین به منبع باز گردانده می شود. زاویه $(\theta_3 - \theta_0)$ موسوم به زاویه هدایت θ_c یک پارامتر کنترلی مهم می باشد . زاویه θ_0 زاویه روشن شدن و θ_2 زاویه خاموش شدن نامیده می شود . زاویه$(\theta_1 - \theta_0)$ زاویه پیشروی گفته می شود.



اعمال ولتاژ منفی به سیم پیچی فاز در زاویه خاموش شدن θ_2 باید قبل از آنکه مقدار ماکزیمم $L(\theta)$ کاسته گردد صورت گیرد. این کار تضمین می نماید که جریان به صفر تنزل می کند و از ناحیه گشتاور منفی پرهیز می شود در سرعت های موتور بالا بطور قابل توجهی زاویه پیشروی باید افزایش داده شود به منظور اینکه به جریان فاز اجازه داده شود تا پیش از شروع صعود اندوکتانس ، به سرعت تا مقدار چشمگیری صعود نماید . برای فرآیند بازیابی ، پالسهای جریان و افت اندوکتانس باید به طور همزمان اتفاق بیفتد . در مورد بازیابی جریان دیود فراتر از جریان ترانزیستور (یا تریستور) می باشد و در کل انرژی به منبع بازگردانده می شود. بنابراین ملاحظه می گردد که زاویه روشن شدن زاویه پیشروی و زاویه خاموش شدن کلیدها ، پارامتر های کنترلی درایو VRM می باشد.

مود PWM یا برش دهنده

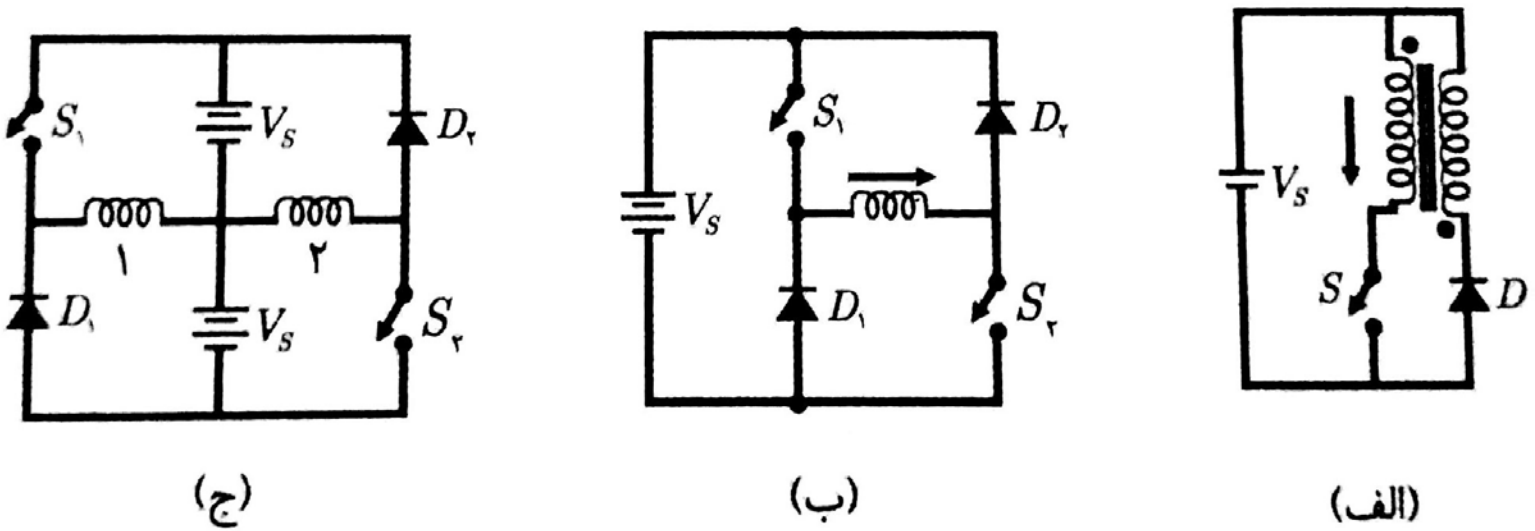
در این مود سرعت پایین نیز مشهور است هر یک از سیم پیچ های فاز برای یک بازه به اندازه کافی طولانی تحریک می شود دامنه جریان ساخته شده در طول این بازه زمانی بلند ممکن است به نحو خطرناکی بزرگ باشد. به منظور نگه داشتن صعود جریان در رنج قابل قبول موتور و اجزای اینورتر، مطابق شکل (۹-۲۳) یک وسیله محدود کننده جریان قبل از VRM در نظر گرفته می شود. این امر با نصب یک حسگر جریان در هر فاز جهت نمونه برداری از جریان تحقق می یابد. سپس این سنسور جریان لحظاتی روشنی و خاموشی کلیدهای مبدل قدرت را به گونه ای کنترل می کند تا جریان را بین سطوح بالا و پایین مجاز نگه دارد . جریان فاز برش داده شده بر حسب موقعیت θ رتور در شکل (۹-۲۲-ج) نشان داده شده است.
در این شکل $I_{\min}$ به $I_{\max}$ سطوح از پیش تعیین شده بالا و پایین جریان فاز برش داده شده و I_0 مقدار متوسط آن است. همچنین تغییرات اندوکتانس نیز در این شکل دیده می شود. چنانچه حدود بالا و پایین جریان هر فاز به سمت بالا یا پایین شیفت داده شود مقدار متوسط جریان موتور تغییر خواهد کرد. این مساله منجر به کنترل گشتاور و لذا تنظیم سرعت بر روی مقدار دلخواه می گردد بنابراین یک مانیتورینگ دقیق از جریان فاز ضروری است تا درایو انعطاف پذیری مبتنی بر VRM بدست اید.



۹-۴-۵- مدارات درایو اینورتر برای موتورهای VR

همانگونه که قبلا اشاره شد سیم پیچ های فازهای موتور VR به پالس های جریانی تک جهته نیاز دارند و رتور به نحو مناسبی باید موقعیت یابی شود. اینورتر باید به سیم پیچ فاز در ان رتور ولتاژ مستقیم اعمال نماید تا جریان آن به سرعت بالا رود هنگامی که لازم می شود تا ان سیم پیچ فاز خاموش گردد ساختار اینورتر باید مسیر جایگزینی برای افت سریع جریان فاز را فراهم سازد تابه علاوه درطول بازه زمانی کاهش یابد به منبع تغذیه بازگردد . این فرایند که بازیابی مشهور است باعث می گردد ساختار اینورتر در مقایسه با حالتی که انرژی مغناطیسی ذخیره شده به صورت گرما تلف گردد دارای راندمان بالاتری باشد.

بررسی هر یک از مدارات درایو نشان داده شده در شکل (۹-۲۴) آشکار می سازد که همواره سیم پیچ فاز با کلید نیمه هادی قدرت به صورت سری قرار دارد در نتیجه هیچگته جریان خطا از طریق منبع DC بوجود نخواهد آمد بنابراین این ساختارهای مدارات درایو کاملا جان سخت و قابل اعتماد هستند . کلید نیمه هادی در این مدارات می تواند تریستور GTO ترانزیستور قدرت IGBT ، MCT، یا MOSFET باشد اما سه نوع آخر برای برش جریان در فرکانس بالا و معقول در مود PWM مناسبتر است. مدارست درایو اینورتری نشان داده شده در شکل های (۹-۲۴-الف و ب) برای سیم پیچی یک فاز و شکل (۹-۲۴-ج) برای سیم پیچ های دو فاز می باشد که به سهولت می توانند بررسی و مطالعه گردند . اما این مدارات می توانند برای تحریک تعداد سیم پیچ فاز بیشتری تعمیم داده شوند.



(ج) (ب) (الف)

مدار اینورتری شکل (۹-۲۴-الف) سیم پیچ های فازی نوع بایفیلار استفاده می کند. سیم پیچی بایفیلار شامل دو سیم پیچ جداگانه است که به لحاظ مغناطیسی بگونه ای آرایش داده شده اند که به طور کامل کوپل باشند. این دو سیم پیچ را می توان به عنوان دو سیم پیچ یک ترانسفورماتور در نظر گرفت با بسته شدن کلید S سیم پیچ اولیه با جریانی که چهت ان بروی شکل نشان داده شده است انرژی می گیرد . این انرژی از منبع به سیم پیچ فاز تحویل می گردد. هنگامی که کلید S باز می کردد ، کاهش در جریان فاز سیم پیچ اولیه ولتاژی در سیم پیچ ثانویه به گونه ای القاء می نماید که دیود D به صورت مستقیم بایاس می گردد. با عمل ترانسفورماتوری ، جریان سیم پیچ اولیه به سیم پیچ ثانویه منتقل می گردد و به سمت صفر میل می کند و همچنین انرژی خیره شده در مدار مغناطیسی موتور به منبع باز می گردد.

مدار اینورتری شکل (۹-۲۴-ب) از سیم پیچ بایفیلار استفاده نمی کند اما در هر فاز به دوکلید و دو دیود فیدبک نیاز دارد . هر دو این کلید ها با هم خاموش و روشن می شود هنگامی که S_1 S_2 روشن می شوند جریان در جهت نشان داده شده بر روی شکل در سیم پیچ فاز جاری می شود و انرژی از منبع به سمت ماشین جاری می گردد هنگامی که سوئچ های S_1 S_2 باز می گردند جریان در همان جهت شروع بهکاهش می کند. در نتیجه ولتاژی دو سیم پیچ فاز می گردد که D_1 D_2 را بایاس مستقیم نموده و انرژی سلفی ذخیره شده را به منبع DCبار می گرداند.

در مدار اینورتری شکل (۹-۲۴-ج) دو منبع DC که هریک دارای V_S هست نیاز می باشد هر فاز نیاز به یک کلید و یک دیود دارد با بسته شدن S_1 سیم پیچ فاز ۱ از منبع DC بالایی تحریک می گردد در نتجیه اکنون جریان تزولی مسیر خود را از طریق منبع DC پائیینی منتقل می نماید.

بنابراین ملاحظه می کردد سیم پیچ فاز ۱ بوسیله منبع DC بالایی تحریک می گردد و انری آن ه داخل منبع DC پایینی باز گردانده می شود. مدار به گونه ای آرایش می یابد که فاز ۲ بر خلاف فاز ۱ متصل می گردد به عبارت دیگر سیم پیچ فاز ۲ از طریف منبع DC پایینی تحریک می گردد و در منبع DC بالایی ارزیابی می شود. این نشانگر آن است که مدار این اجازه را به منبع DC می دهد که به طور مساوی شارژ و دشارژ شوند و مقدار انرژی تحویلی به سیم پیچ ها تئسط دو منبع تقریبا یکسن است.

۹-۴-۶ کاربردها

موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شونده یا VRM ها دارای خصوصیات منحصر به فرد هستند که قبلا اشاره شد به نحوی که آنها را برای استفاده در درایوهای سرعت متغیر جذاب می سازد رشد محبوبیت VRM ها تئجه مهندسین کاربردی را به استفاده از این نوع موتور در بسیاری از کاربردها از رنج توانی کسر کیلو وات تا درایوهای چند کیلوواتی جلب نموده است از جمله کاربردهای موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده ، سیستم های کنترل دقیق موقعیت در ربات ها سروموتورهای توان پایین، وسایل خانگی ، خودروهای برقی و درایوهای حمل و نقل توان بالای ریلی می باشند سیستم های درایو سرعت متغیر مبتنی بر VRMها قابل رقابت با درایورهای DC تغذیه شونده با کانورتور ها و درایورهای موتور القایی با اینورتور می باشند.

سرعت رتور از انجا که رتور موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده حامل هیچگونه سیم پیچی نمی باشند، موتورهای با سرعت رتور پیش از 2×10^5 دور در دقیقه نیز ساخته می شوند.

در مجموع ساختار ساده و مقاوم موتور رلولکتاسی سوئیچ شونده و در عین حال چگالی توان بالا قابلیت اطمینان ، کنترل پذیری و بازدهی باعث توسعه روزافزون این موتور در صنعت و کاربردها درایوهای الکتریکی گردیده است

پایان