مقدمه:

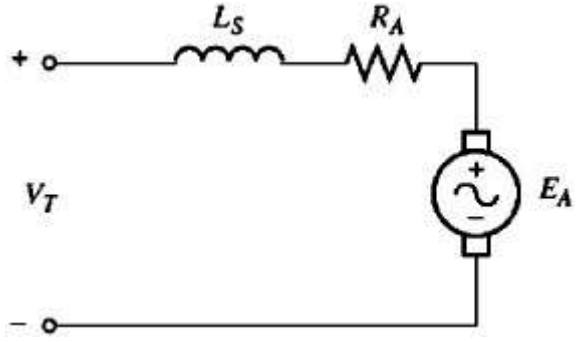
ماشین‌های الکتریکی سه فاز با اختلاف نسبت به سایر انواع متداول‌ترین ماشین‌ها در کاربردهای تجاری و صنعتی بزرگ به شمار می‌روند. با این وجود بیشتر صنایع کوچک و خانه‌ها از برق سه فاز محرومند. در این مکان‌ها تمام موتورها باید با استفاده از برق تکفاز کار کنند. در این بخش به تئوری عملکرد دو نوع اصلی از موتورهای تکفاز یعنی موتور یونیورسال و موتور القایی تکفاز پرداخته می‌شود. موتور یونیورسال در حقیقت یک تعمیم سرراست موتور DC سری است. مهمترین مشکل در رابطه با طراحی موتور القایی تکفاز آن است که برخلاف منبع سه فاز یک منبع تکفاز قادر به تولید میدان مغناطیسی دوار نیست. در واقع میدان مغناطیسی تولید شده به وسیله‌ی یک منبع تکفاز در مکان ساکن بوده و با زمان ضربانی است. بنابراین، از آنجا که میدان مغناطیسی دواری برای عملکرد موتورهای القایی تکفاز وجود ندارد این ماشین‌ها نیازمند طراحی‌های مخصوصی هستند. علاوه بر این دو نوع، انواع دیگری از ماشین‌های مخصوص نیز وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به موتورهای رلوکتانسی، موتورهای هیسترزیس، موتورهای پله‌ای و موتورهای DC بدون جاروبک اشاره نمود.

موتور یونیورسال:

شاید ساده‌ترین راه در طراحی یک موتور که با منبع AC تکفاز کار نماید آن است که یک ماشین DC را با یک منبع AC تغذیه کنیم. گشتاور القایی یک موتور DC با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\tau_{ind} = K\phi I_A \qquad (۱)$$

اگر پلاریته ولتاژ اعمال شده به موتور DC موازی یا سری معکوس گردد جهت شار میدان و جهت جریان آرمیچر هر دو برعکس خواهند شد اما جهت گشتاور القایی تغییر ننموده و در همان جهت قبل ادامه می‌یابد. در نتیجه، با اتصال موتور DC به منبع AC می‌توان گشتاور ضربانی اما یکسویه داشت. از آنجا که جهت جریان‌های آرمیچر و میدان دقیقاً در یک زمان باید معکوس گردد چنین طراحی فقط برای موتور DC سری عملی است (شکل ۱). در موتور DC موازی اندوکتانس بسیار زیاد سیم‌پیچ میدان باعث ایجاد تأخیر در تغییر جهت جریان میدان شده و در نتیجه به نحو غیر قابل قبولی از گشتاور القایی متوسط موتور کاسته می‌شود.



شکل ۱. مدار معادل یک موتور یونیورسال

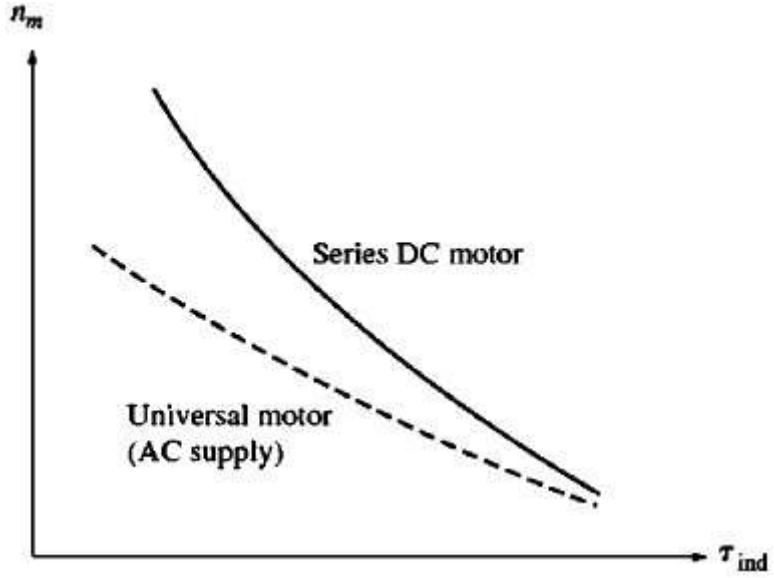
برای اینکه یک موتور DC سری پس از اتصال به منبع تغذیه AC به صورت کارآمدی عمل کند لازم است تا قطب‌های میدان و قاب استاتور کاملاً ورقه‌ای شده باشند. در غیر این صورت، تلفات هسته بسیار شدید خواهد بود. اگر قطب‌ها و استاتور به صورت ورقه‌ای باشند به چنین موتوری موتور یونیورسال گفته می‌شود زیرا می‌تواند هم با منبع DC و هم با منبع AC کار کند. هنگامی که

موتور با منبع AC تغذیه گردد کموتاسیون بسیار بدتر از وقتی است که با منبع DC کار می‌کند. در این حالت عمل ترانسفورماتوری موجب القای ولتاژ در سیم‌پیچ‌های تحت کموتاسیون شده و جرقه‌های بیشتری در محل جاروبک‌ها رخ خواهد داد. این جرقه‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای از عمر جاروبک کاسته و حتی می‌تواند باعث تداخلات فرکانسی رادیویی در محیط‌های خاص گردد.

مشخصه گشتاور–سرعت یک موتور یونیورسال در شکل (۲) نشان داده شده است. این مشخصه به دو علت با مشخصه همان موتور هنگامی که به منبع ولتاژ DC متصل شده متفاوت است:

۱. سیم‌پیچ‌های آرمیچر و میدان راکتانس‌های بسیار بزرگی در فرکانس ۵۰Hz یا ۶۰Hz دارند. به همین دلیل بخش قابل ملاحظه‌ای از ولتاژ ورودی روی این راکتانس‌ها افت می‌نماید و در نتیجه E_A از آنچه با منبع DC حاصل می‌شد کوچکتر خواهد بود. از آنجا که $E_A = K\varphi\omega$ سرعت موتور نیز به ازای یک جریان آرمیچر و گشتاور القایی مشخص در حالت AC کمتر از حالت DC می‌باشد.

۲. در یک سیستم AC حداکثر ولتاژ $\sqrt{2}$ برابر مقدار مؤثر ولتاژ است و بنابراین در نزدیکی حداکثر جریان امکان بروز اشباع مغناطیسی در ماشین وجود دارد. اثر این اشباع کاهش قابل ملاحظه مقدار مؤثر شار موتور (در یک جریان مشخص) و در نتیجه کاهش گشتاور القایی ماشین است. البته کاهش شار موجب افزایش سرعت ماشین DC گردیده و این اثر تا حدی باعث جبران کاهش سرعت ناشی از عامل اول می‌شود.



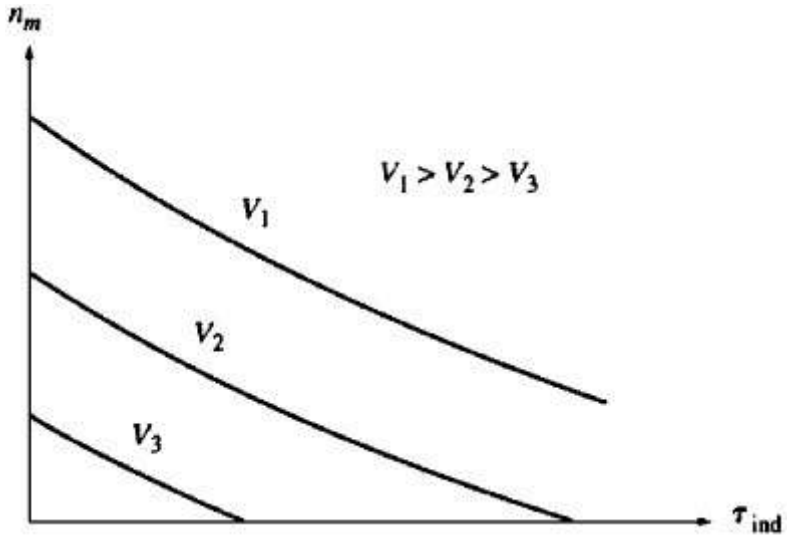
شکل ۲. مقایسه مشخصه‌های گشتاور–سرعت موتور یونیورسال هنگام تغذیه با منابع AC و DC

کاربرد موتورهای یونیورسال:

در مقایسه با موتور DC سری، موتور یونیورسال مشخصه گشتاور–سرعت شیب افتی تندی دارد و به همین دلیل برای کاربرد در سرعت‌های ثابت مناسب نیست. اما این موتور دارای ساختاری فشرده بوده و در مقایسه با هر موتور تکفاز دیگری دارای گشتاور بر آمپر بالاتری است. پس جایی که وزن پایین و گشتاور بالا مهم باشد موتور یونیورسال استفاده می‌گردد. برخی کاربردهای این نوع موتور عبارتند از: جارو برقی‌ها، مته‌ها و لوازم آشپزخانه.

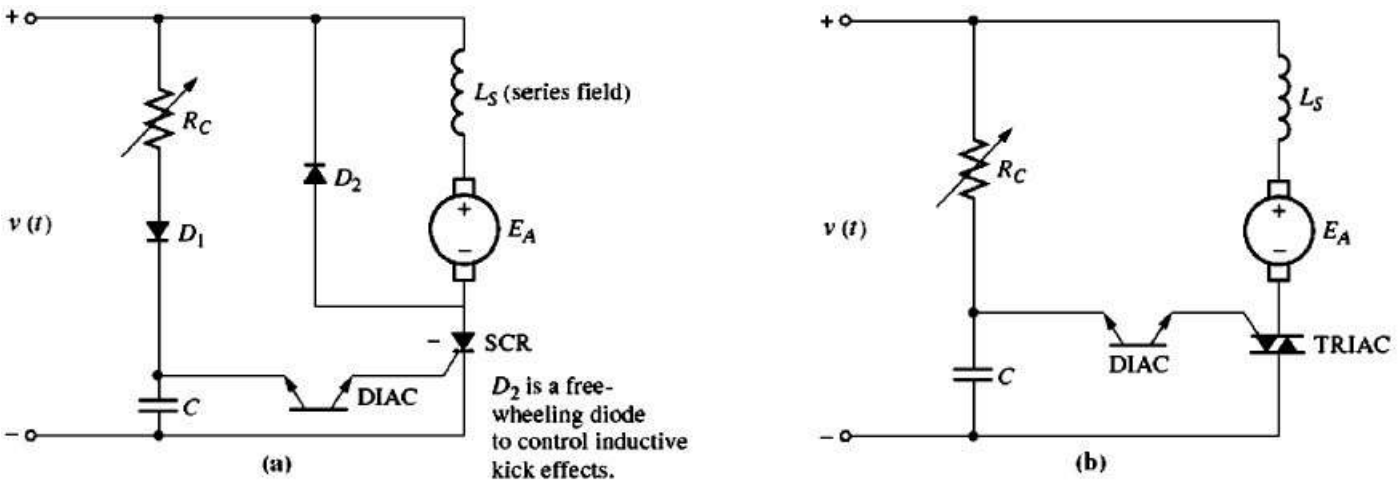
کنترل سرعت موتورهای یونیورسال:

همانند موتورهای DC سری بهترین راه کنترل سرعت موتور یونیورسال تغییر مقدار مؤثر ولتاژ ورودی آن است. هر چه مقدار مؤثر ولتاژ ورودی بیشتر باشد سرعت موتور نیز بالاتر خواهد بود. مشخصه‌های گشتاور–سرعت یک موتور یونیورسال به صورت تابعی از ولتاژ در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. اثر تغییر ولتاژ ترمینال بر مشخصه‌ی گشتاور–سرعت موتور یونیورسال

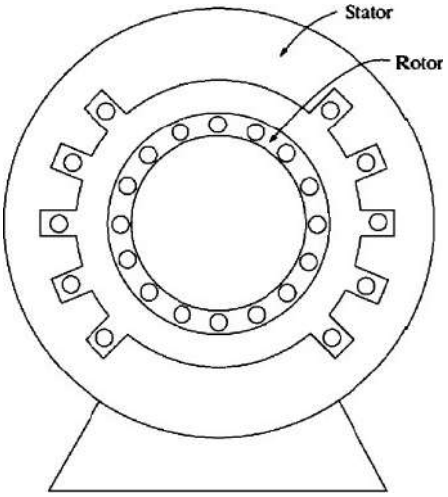
در عمل متوسط ولتاژ اعمال شده به موتور توسط یکی از مدارهای SCR یا TRIAC تغییر داده می‌شود. دو عدد از چنین مدارهای کنترل سرعتی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. مقاومت متغیر نشان داده شده در این شکل‌ها پیچ‌های دستی تنظیم سرعت موتور هستند (به عنوان نمونه، چنین مقاومتی ماشه یک مته با سرعت متغیر است).



شکل ۴. نمونه مدارهای کنترل سرعت موتور یونیورسال (a) نیم موج (b) تمام موج

مقدمه‌ای بر موتورهای القایی تکفاز:

یکی دیگر از متداول‌ترین انواع موتورهای تکفاز نسخه تکفاز از موتور القایی است. یک موتور القایی با روتور قفس سنجابی و استاتور تکفاز در شکل (۵) نشان داده شده است.

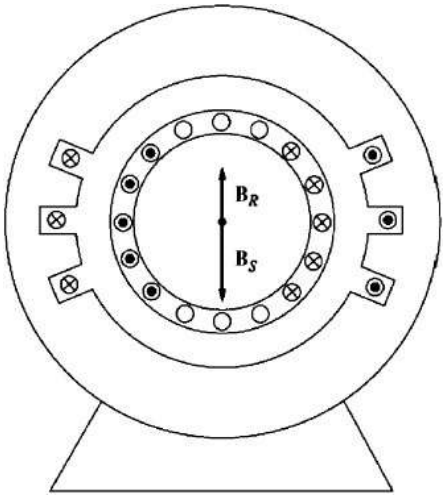


شکل ۵. ساختار یک موتور القایی تکفاز (روتور آن با روتور موتور القایی سه فاز یکسان است اما استاتور تنها یک فاز توزیع شده دارد)

موتورهای القایی تکفاز دارای یک نقطه ضعف اساسی هستند. از آنجا که تنها یک فاز روی استاتور قرار دارد میدان مغناطیسی در یک موتور القایی تکفاز دوار نیست. به جای آن، این میدان ضربانی است. یعنی دامنه آن بزرگ و کوچک می‌شود اما جهت آن همواره ثابت است. به دلیل عدم وجود میدان مغناطیسی دوار استاتور در موتور القایی تکفاز این موتور فاقد گشتاور راه‌اندازی می‌باشد. این مطلب به سادگی با بررسی موتور در حالت سکون روتور مشخص می‌گردد. شار استاتور ماشین ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد در حالی که جهت آن همیشه ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، هیچ حرکت نسبی بین میدان استاتور و میله‌های روتور وجود ندارد. در نتیجه هیچ ولتاژ و جریانی هم به خاطر این فقدان حرکت نسبی در روتور القاء نشده و هیچ گشتاوری نیز القاء نخواهد گردید. در واقع ولتاژی با عمل ترانسفورماتوری ($d\varphi/dt$) در میله‌های روتور القاء می‌گردد و از آنجا که این میله‌ها اتصال کوتاه شده هستند جریانی در آنها شارش می‌یابد. اما میدان مغناطیسی حاصل از جریان روتور همسو با میدان مغناطیسی استاتور بوده و هیچ گشتاور خالصی روی روتور تولید نمی‌کند.

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S = kB_R B_S \sin(\gamma) = kB_R B_S \sin(180^\circ) = 0 \qquad (۲)$$

بنابراین می‌توان گفت که این موتور در حالت سکون مانند یک ترانسفورماتور می‌باشد که ثانویه آن اتصال کوتاه است (شکل ۶).



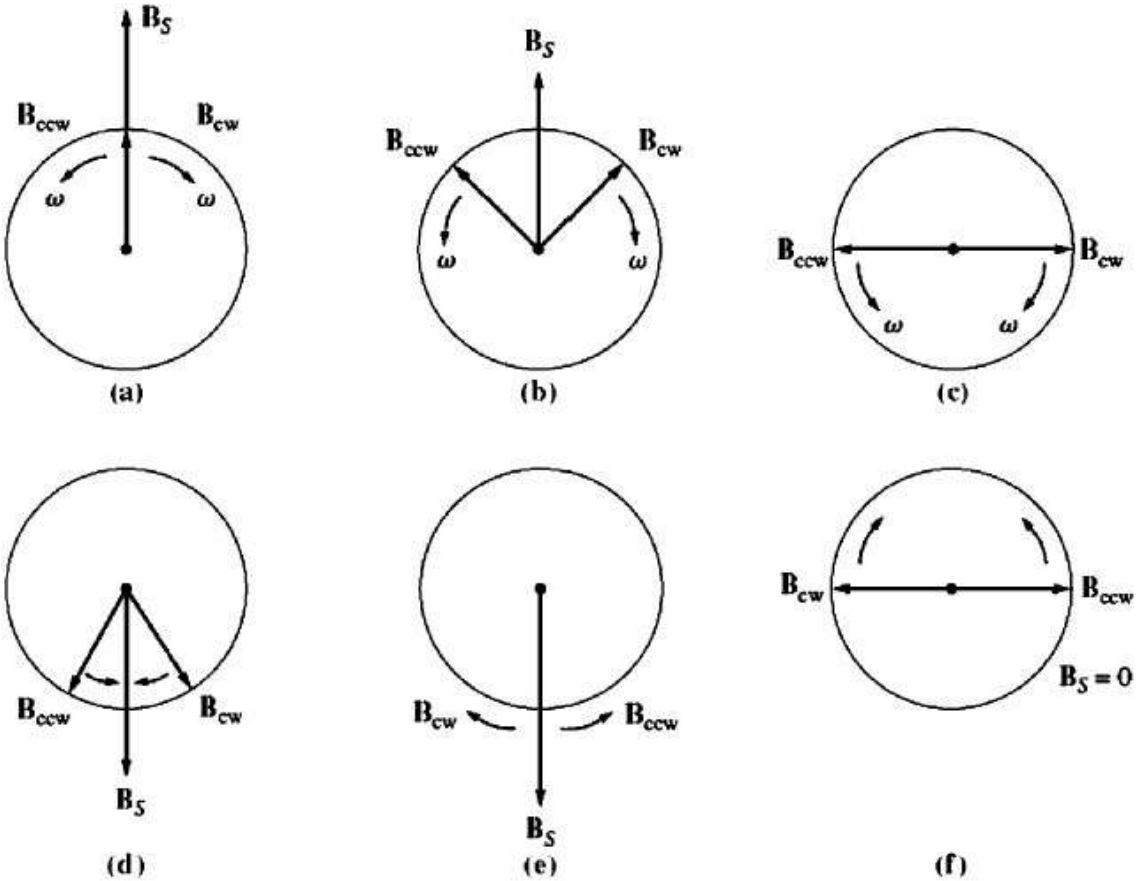
شکل ۶. موتور القایی تکفاز در شرایط سکون (سیم‌پیچ استاتور ولتاژ و جریان مخالف در روتور القاء می‌نماید که باعث همراستا شدن میدان مغناطیسی روتور با میدان مغناطیسی استاتور و صفر شدن گشتاور القایی می‌گردد)

این نکته که موتورهای القایی تکفاز فاقد گشتاور راه‌اندازی هستند یک معضل جدی در راه توسعه‌ی موتورهای القایی در بدو امر بود. هنگامی که موتورهای القایی در اواخر دهه‌ی ۱۸۸۰ و اوایل دهه‌ی ۱۸۹۰ میلادی مطرح گردیدند نخستین سیستم‌های قدرت AC آن روزها تکفاز با فرکانس ۱۳۳ هرتز بودند. با مواد و روش‌هایی که آن زمان در دسترس بودند ساخت موتوری که خوب کار کند غیرممکن بود. در نتیجه، موتور القایی تا زمان توسعه‌ی سیستم‌های قدرت سه فاز با فرکانس ۲۵ هرتز در اواسط دهه‌ی ۱۸۹۰ میلادی مورد توجه قرار نگرفتند.

با این وجود اگر روتور شروع به حرکت نماید گشتاور القایی در آن تولید می‌شود. دو تئوری پایه برای تشریح این که چرا گشتاور در روتور متحرک تولید می‌گردد امر وجود دارد. یک تئوری میدان‌های چرخان دوگانه در موتورهای القایی تکفاز نام دارد و دومی تئوری میدان متقاطع موتورهای القایی تکفاز نامیده می‌شود. در ادامه هر دوی این تئوری‌ها تشریح خواهند شد.

تئوری میدان‌های چرخان دوگانه در موتورهای القایی تکفاز:

بر اساس این تئوری یک میدان مغناطیسی ضربانی ساکن قابل تجزیه به دو میدان مغناطیسی دوار با دامنه‌های برابر است که جهت چرخش آنها برخلاف یکدیگر می‌باشد. موتور القایی به هر یک از این میدان‌ها جداگانه عکس‌العمل نشان داده و گشتاور خالص ماشین مجموع گشتاورهای حاصل از این دو میدان مغناطیسی خواهد بود. شکل (۷) چگونگی تجزیه یک میدان مغناطیسی ضربانی ساکن به دو میدان مغناطیسی دوار با دامنه‌های برابر و جهت چرخش مخالف را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمایش یک میدان مغناطیسی ضربانی در قالب دو میدان مغناطیسی دوار با دامنه برابر و جهت چرخش مخالف (در تمام حالات جمع برداری دو میدان دوار در صفحه عمودی قرار دارد)

شدت میدان مغناطیسی ساکن با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$B_S(t) = (B_{max}\cos(\omega t))\hat{j} \quad (۳)$$

میدان‌های مغناطیسی دوار ساعتگرد و پادساعتگرد عبارتند از:

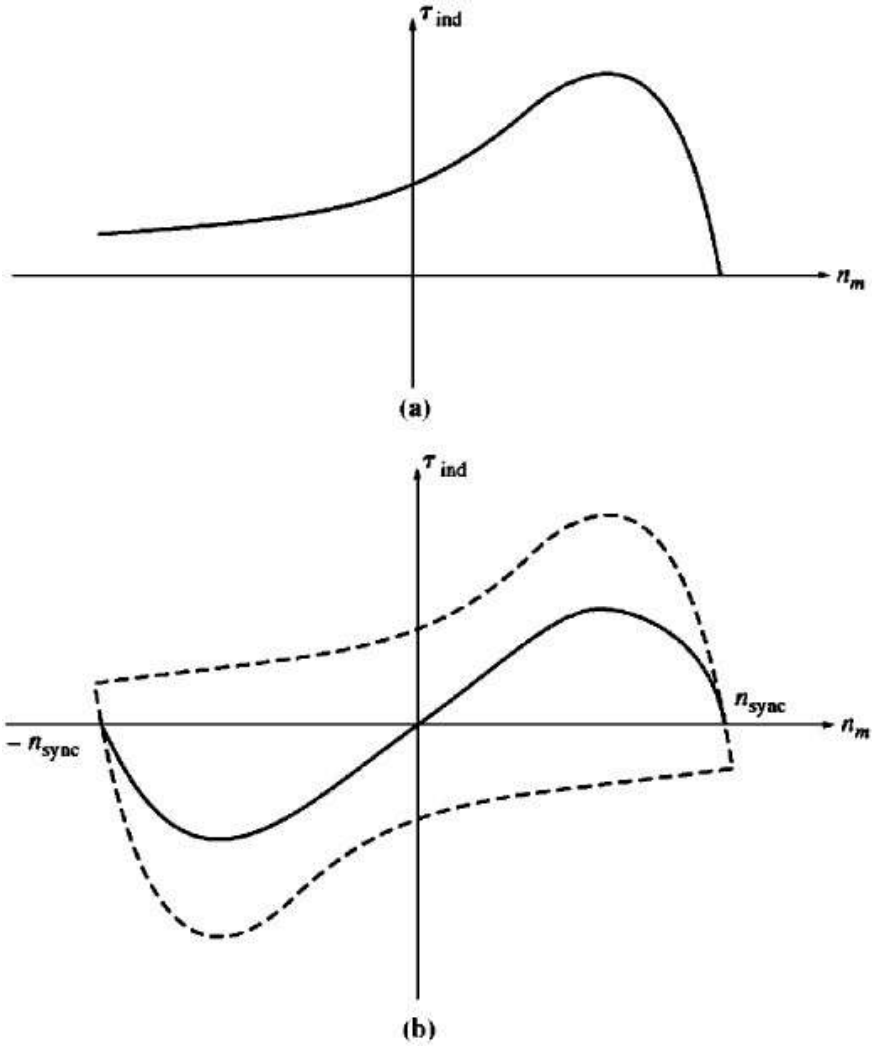
$$B_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos(\omega t)\right)\hat{\imath} - \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin(\omega t)\right)\hat{\jmath} \quad (۴)$$

$$B_{CCW}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos(\omega t)\right)\hat{\imath} + \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin(\omega t)\right)\hat{\jmath} \quad (۵)$$

در نتیجه مجموع میدان‌های مغناطیسی دوار ساعتگرد و پادساعتگرد همواره برابر با میدان مغناطیسی ضربانی ساکن است:

$$B_S(t) = B_{CW}(t) + B_{CCW}(t) \quad (۶)$$

قسمت (a) از شکل (۸) مشخصه گشتاور – سرعت یک ماشین القایی سه فاز را در پاسخ به تنها میدان مغناطیسی دوار خود نشان می‌دهد. یک موتور القایی تکفاز به هریک از دو میدان مغناطیسی گفته شده در درون خود پاسخ داده و بنابراین گشتاور القایی خالص موتور تکفاز القایی تفاضل دو منحنی گشتاور – سرعت است (قسمت (b) از شکل (۸)). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در سرعت صفر هیچ گشتاور خالصی وجود نداشته و بنابراین موتور القایی تکفاز فاقد گشتاور راه‌اندازی است.

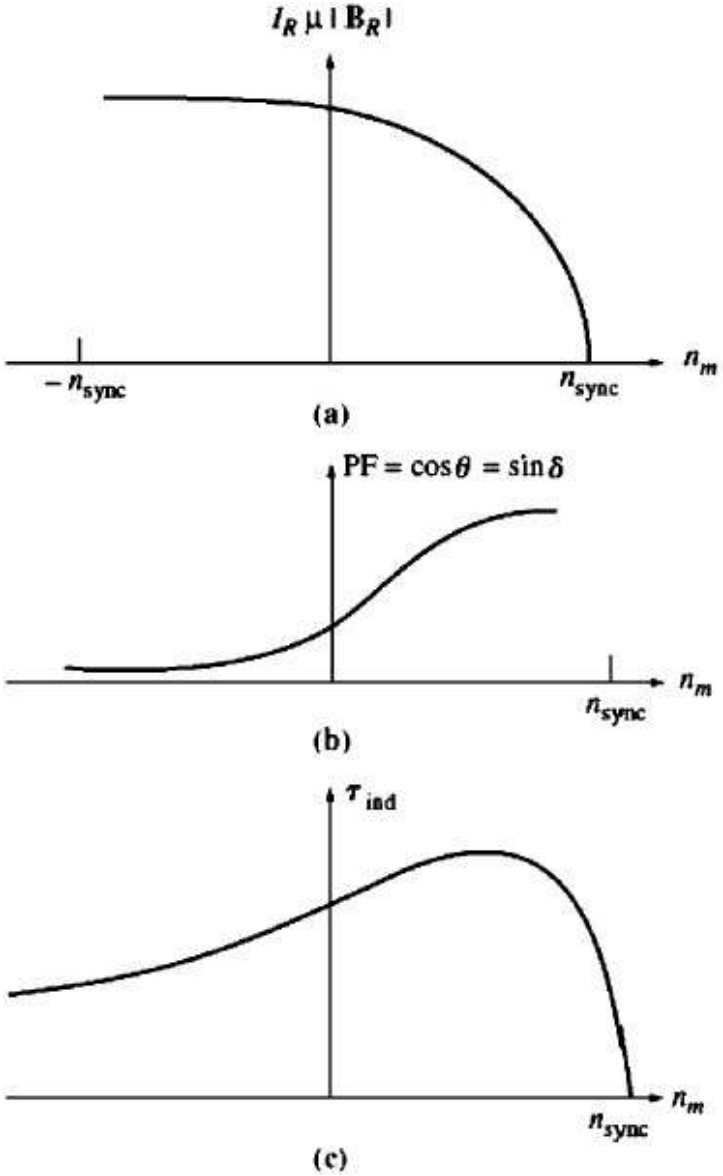


شکل ۸ مشخصه گشتاور–سرعت (a) موتور القایی سه فاز (b) ناشی از دو میدان مغناطیسی دوار با دامنه برابر اما جهت برعکس

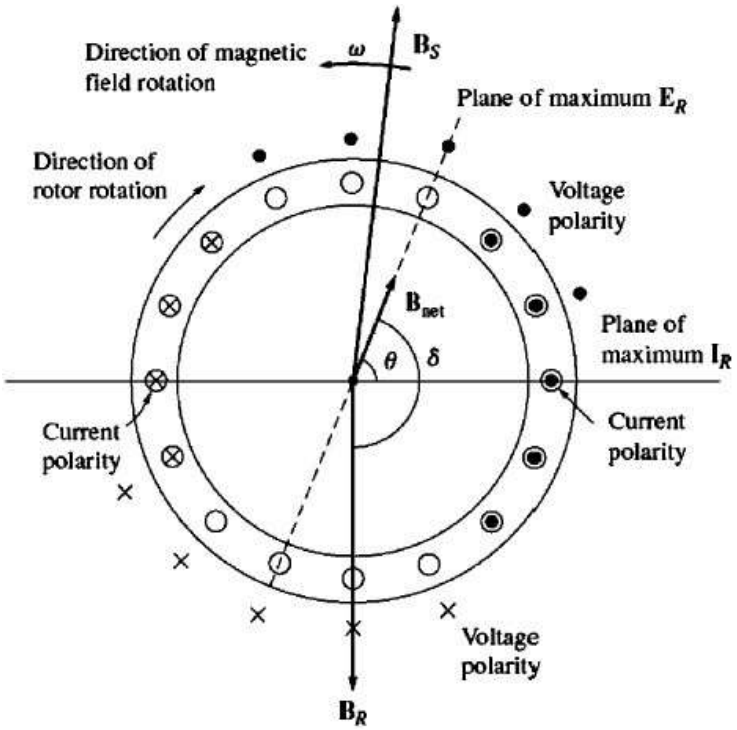
مشخصه گشتاور – سرعت نشان داده شده در قسمت (b) از شکل (۸) توصیف دقیقی از گشتاور موتور القایی تکفاز نیست. زیرا این

مشخصه بر اساس جمع آثار دو مشخصه سه فاز تشکیل گردیده و در آن از این واقعیت که هر دو میدان مغناطیسی به طور همزمان در موتور القایی تکفاز حاضر هستند چشم پوشی شده است.

اگر در حالی که منبع تغذیه موتور سه فاز وصل است جهت چرخش آن به اجبار معکوس گردد جریان روتور بسیار بالا خواهد رفت (قسمت (a) از شکل (۹)). در این حالت فرکانس روتور نیز بسیار بالا است و بنابراین راکتانس روتور بسیار بیشتر از مقاومت آن خواهد بود. در نتیجه، جریان روتور به اندازه ۹۰° از ولتاژ روتور عقب‌تر بوده و میدان مغناطیسی حاصل تقریباً ۱۸۰° با میدان مغناطیسی استاتور اختلاف فاز خواهد داشت (شکل (۱۰)). گشتاور القایی در موتور متناسب با سینوس زاویه بین دو میدان مغناطیسی استاتور و روتور بوده و سینوس یک زاویه نزدیک به ۱۸۰° بسیار ناچیز است و در نتیجه گشتاور هم کوچک خواهد بود. البته، در این حالت جریان بسیار بالای روتور تا اندازه‌ای اثر زاویه بین میدان‌های مغناطیسی را خنثی می‌نماید(قسمت (b) از شکل (۹)).

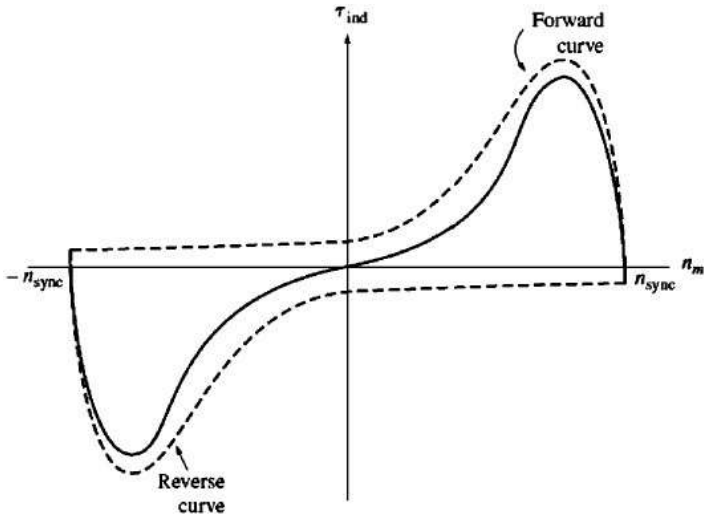


شکل ۹. مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی سه فاز هم به شدت میدان مغناطیسی روتور وابسته است و هم سینوس زاویه بین میدان‌ها (هنگامی که روتور در جهت معکوس چرخانده شود I_R و I_S هر دو بسیار بزرگ خواهند بود اما زاویه بین دو میدان نیز بزرگ است و این زاویه گشتاور موتور را محدود می‌نماید)



شکل ۱۰. هنگامی که روتور در جهت معکوس چرخانده شود زاویه γ بین B_R و B_S به ۱۸۰° نزدیک می‌شود

از سوی دیگر، در یک موتور تکفاز هر دو میدان مغناطیسی جلوگرد و عقبگرد حاضر بوده و هر دو توسط یک جریان تولید می‌شوند. این میدان‌های مغناطیسی جلوگرد و عقبگرد هرکدام در ساخت مؤلفه‌ای از ولتاژ استاتور مشارکت دارند (این مؤلفه‌ها با یکدیگر حالت سری دارند). از آنجا که هر دو میدان مغناطیسی حاضرند میدان مغناطیسی جلوگرد (که مقاومت مؤثر روتور R_2/s را ایجاد می‌کند) جریان استاتور را (که به وجود آورنده هر دو میدان جلوگرد و عقبگرد است) محدود می‌نماید. از آنجا که جریان تغذیه‌کننده میدان مغناطیسی عقبگرد استاتور به مقداری ناچیز محدود شده و از آنجا که میدان مغناطیسی عقبگرد روتور نسبت به میدان مغناطیسی عقبگرد استاتور در زاویه‌ای بزرگ قرار دارد گشتاور ناشی از میدان‌های مغناطیسی عقبگرد در سرعت سنکرون بسیار ناچیز خواهد بود. شکل (۱۱) مشخصه گشتاور – سرعت دقیق‌تر ماشین القایی تکفاز را نشان می‌دهد.

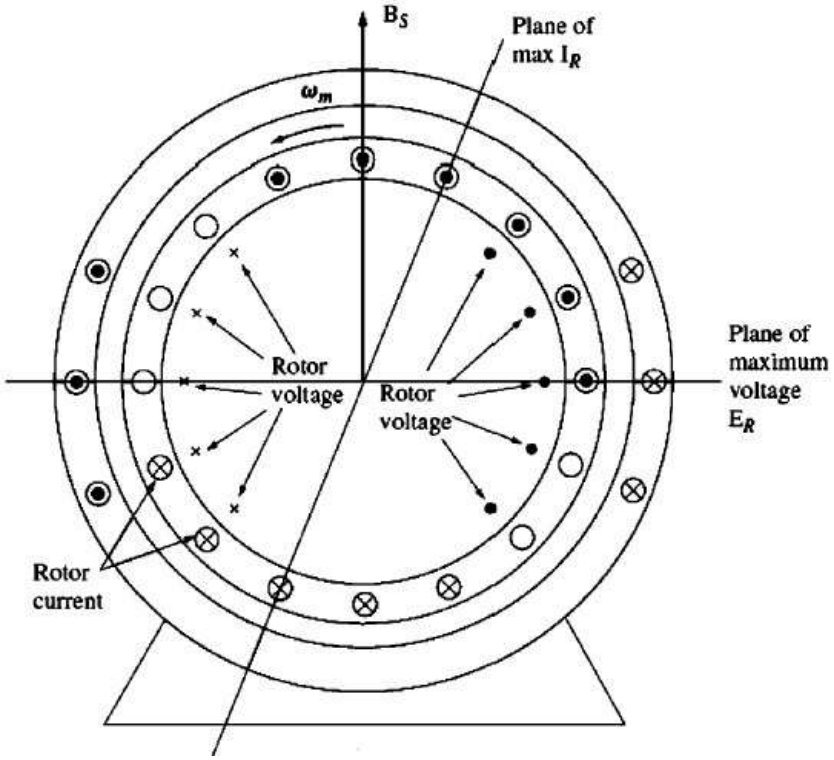


شکل ۱۱. مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی تکفاز با در نظر گرفتن محدودیت جریان روی میدان مغناطیسی عقبگرد ناشی از حضور میدان مغناطیسی جلوگرد

علاوه بر گشتاور خالص متوسط نشان داده شده در شکل (۱۱) ضربانات گشتاوری با دو برابر فرکانس استاتور نیز وجود دارند. این ضربانات گشتاور هنگامی به وجود می‌آیند که میدان‌های مغناطیسی جلوگرد و عقبگرد یکدیگر را دو بار در سیکل قطع می‌کنند. هر چند ضربانات گشتاور هیچ گشتاور متوسطی تولید نمی‌نمایند اما لرزش را افزایش داده و باعث می‌گردند تا موتورهای القایی تکفاز پر سر و صداتر از موتورهای القایی سه فاز هم اندازه خود باشند. از آنجا که قدرت لحظه‌ای در یک مدار تکفاز همواره حالت ضربانی دارد هیچ راهی برای از بین بردن این ضربانات نیست. بنابراین، طراح موتور باید در طراحی مکانیکی موتورهای تکفاز تدبیری برای لرزش ذاتی آنها بیاندیشد.

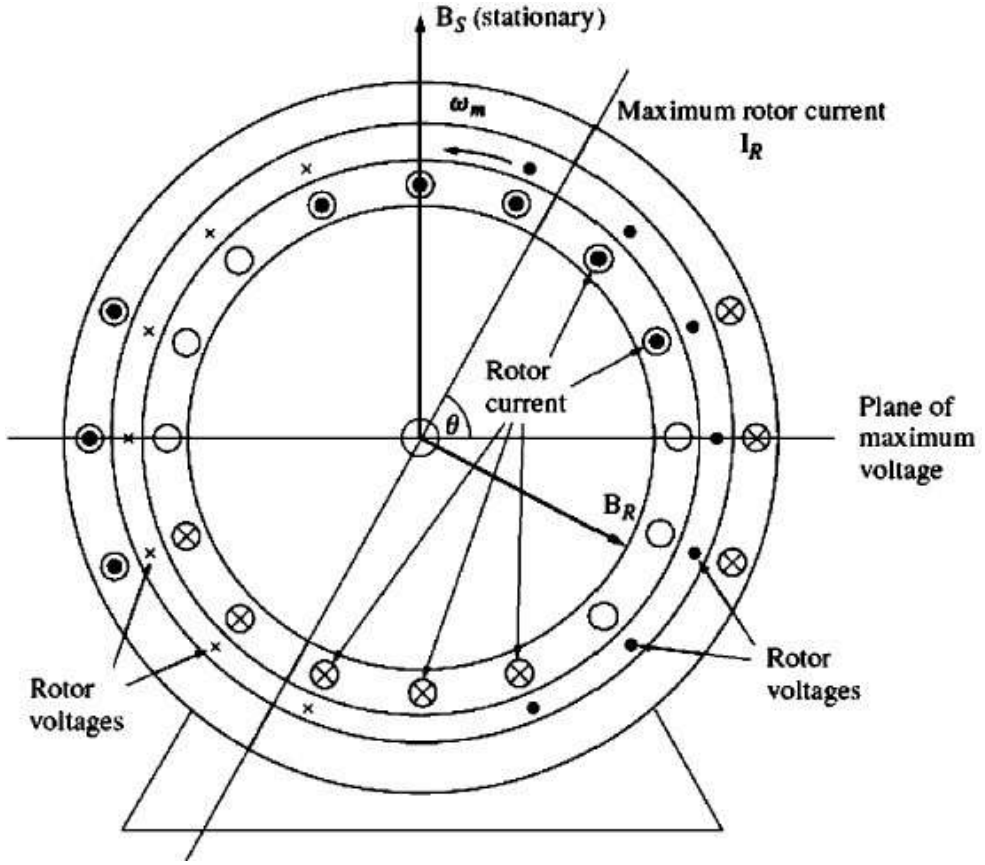
تئوری میدان متقاطع در موتورهای القایی تکفاز:

تئوری میدان متقاطع موتورهای القایی تکفاز در مقایسه با تئوری پیشین از زاویه دیدی متفاوت به این موتورها می‌نگرد. این تئوری مربوط به ولتاژ و جریانی است که میدان مغناطیسی ساکن استاتور می‌تواند در هنگام حرکت روتور در میله‌های روتور القاء نماید. موتور القایی تکفازی را در نظر بگیرید که همانند شکل (۱۲) روتور آن به نحوی سرعت گرفته است. ولتاژ القاء شده در میله‌های روتور به نحوی است که پیک لحظه‌ای آن در میله‌هایی است که دقیقاً از مقابل سیم‌پیچ‌های استاتور عبور می‌نمایند. این ولتاژ باعث عبور جریانی از میله‌های روتور می‌گردد که به دلیل راکتانس بالای روتور تقریباً به اندازه ۹۰° از ولتاژ روتور عقب‌تر است. از آنجا که روتور با سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون در حال گردش است این ۹۰° اختلاف فاز زمانی در جریان به ۹۰° اختلاف فاز زاویه‌ای بین صفحه حداکثر ولتاژ روتور و صفحه حداکثر جریان روتور منجر می‌شود.



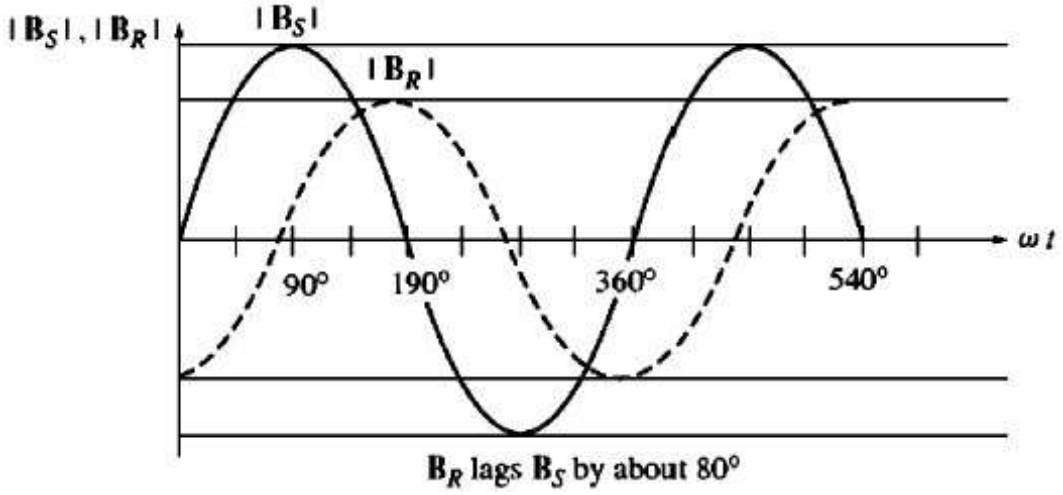
شکل ۱۲. توضیح چگونگی تولید گشتاور در ماشین القایی تکفاز توسط تئوری میدان متقاطع (اگر میدان استاتور ضربانی باشد ولتاژ القایی در میله‌های روتور توسط علائم نشان داده شده در شکل خواهد بود اما جریان روتور به اندازه تقریبی ۹۰° عقب‌تر از ولتاژ روتور است و اگر روتور در حال چرخش باشد پیک جریان روتور در زاویه‌ای متفاوت از پیک ولتاژ روتور رخ می‌دهد)

میدان مغناطیسی روتور در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به دلیل تلفات در روتور این میدان تا حدودی از میدان مغناطیسی استاتور کوچکتر است اما اختلاف فاز زمانی و مکانی آنها حدود ۹۰° می‌باشد.

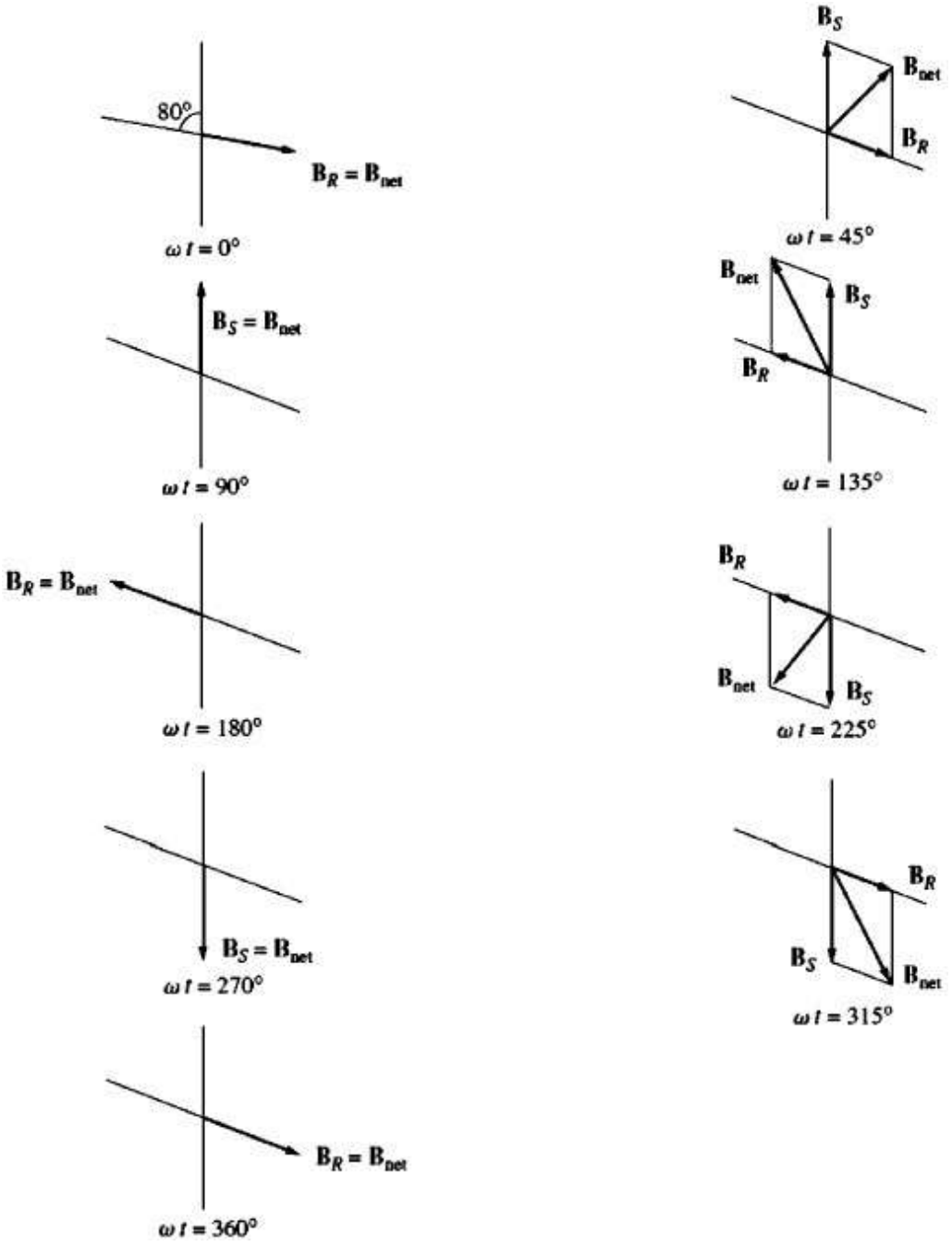


شکل ۱۳. جریان روتور (به دلیل تأخیر نسبت به ولتاژ) میدان مغناطیسی روتور را در زاویه‌ای متفاوت از میدان مغناطیسی استاتور تولید می‌نماید

اگر این دو میدان مغناطیسی با هم جمع شوند میدان برآیند در موتور در جهت پادساعتگرد می‌چرخد (شکل‌های (۱۴) و (۱۵)). در حضور یک میدان دوار در موتور القایی این موتور قادر است تا گشتاور خالصی در جهت چرخش تولید نموده و این گشتاور تداوم چرخش موتور را تضمین می‌نماید. اگر روتور موتور در ابتدا در جهت ساعتگرد چرخانده شده بود گشتاور حاصل نیز ساعتگرد بود و تداوم حرکت روتور نیز در همین جهت.



شکل ۱۴. دامنه میدان‌های مغناطیسی به صورت تابعی از زمان



شکل ۱۵. جمع برداری میدان‌های مغناطیسی استاتور و روتور به صورت تابعی از زمان که نشان‌دهنده چرخش میدان برآیند در جهت پادساعتگرد است

راه‌اندازی موتورهای القایی تکفاز:

همان‌طور که پیش از این گفته شد موتور القایی تکفاز به طور ذاتی فاقد گشتاور راه‌اندازی است. سه روش متداول برای راه‌اندازی این موتورها وجود دارد و موتورهای القایی تکفاز با توجه به شیوه‌ی تولید گشتاور راه‌اندازی در آنها طبقه‌بندی می‌گردند. روش‌های راه‌اندازی به لحاظ هزینه و میزان گشتاور راه‌اندازی تولید شده با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین، در هر کاربردی یک مهندس اغلب ارزان‌ترین روش که نیازمندی گشتاور را مرتفع می‌سازد انتخاب می‌نماید. این سه روش اصلی راه‌اندازی عبارتند از:

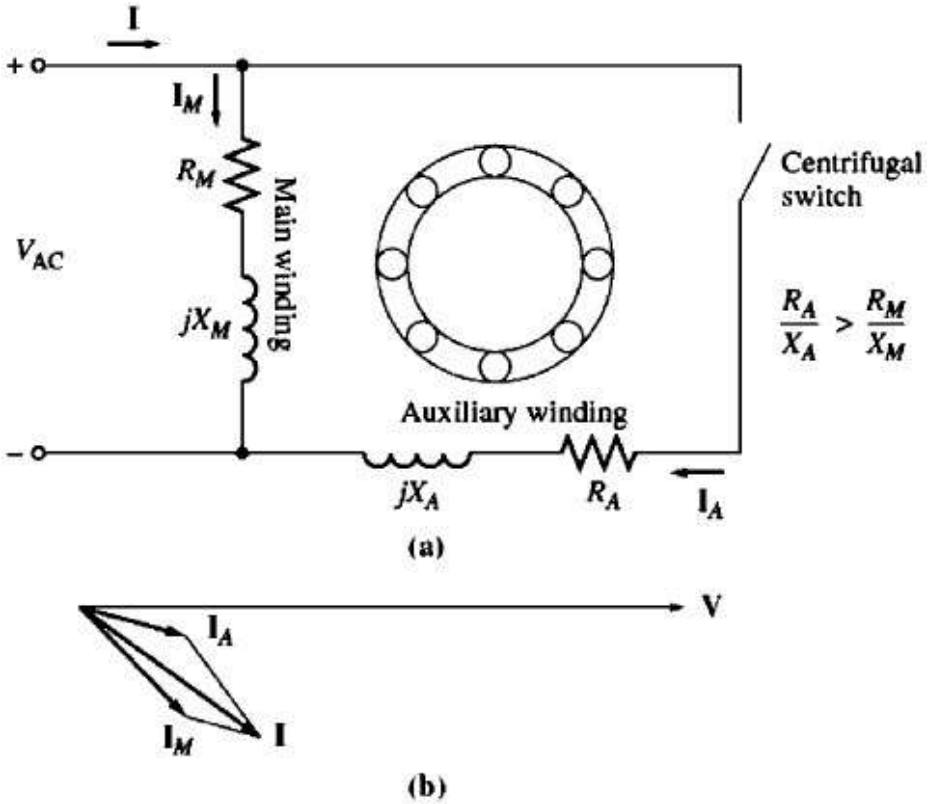
- سیم‌پیچی فاز شکسته
- سیم‌پیچی خازنی

- قطب‌های چاکدار استاتور

در هر سه‌ی این روش‌ها یکی از دو میدان دوار (ساعتگرد و پادساعتگرد) بیشتر از دیگری تقویت شده و در نتیجه به موتور تکان اولیه‌ای در آن جهت وارد می‌گردد.

سیم‌پیچی فاز شکسته:

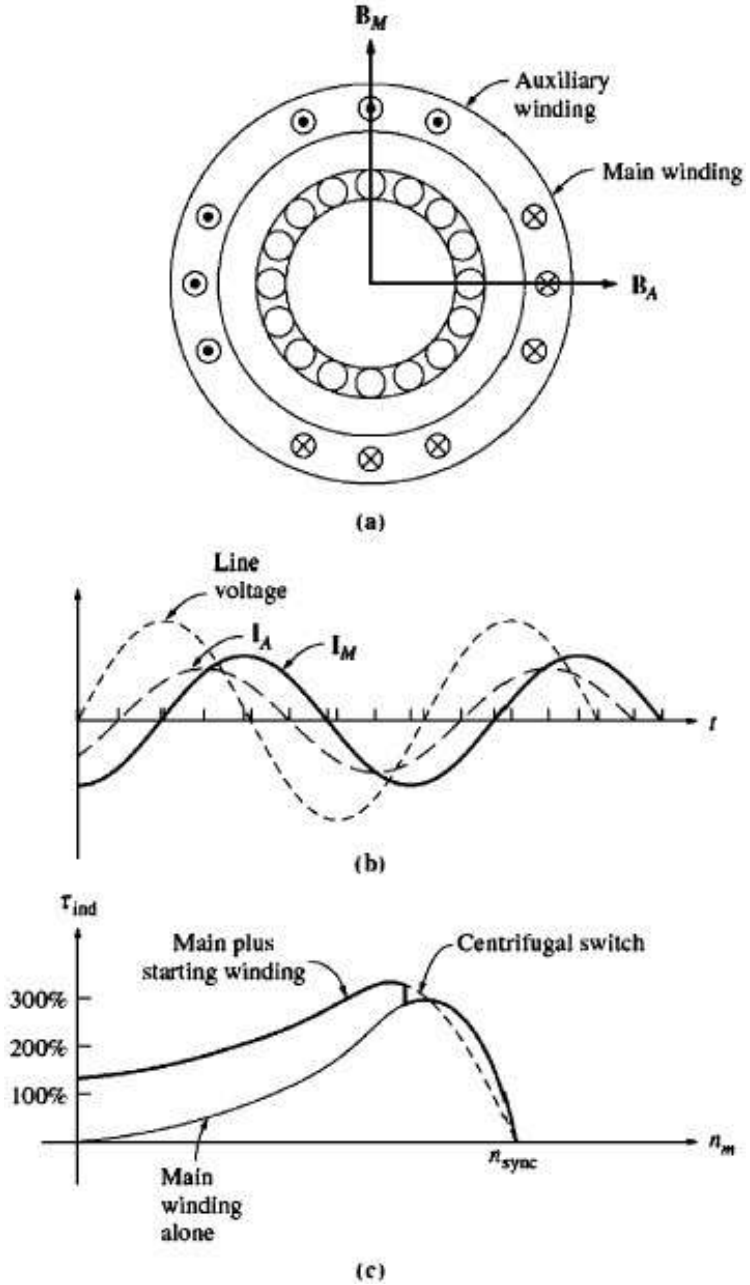
یک موتور فاز شکسته موتور القایی تکفازی است که دو سیم‌پیچ استاتور دارد: یکی سیم‌پیچ اصلی استاتور (M) و دیگری سیم‌پیچ راه‌انداز کمکی (A). شکل (۱۶) موقعیت این دو سیم‌پیچ را روی استاتور نشان می‌دهد که نسبت به هم ۹۰° اختلاف فاز الکتریکی دارند. سیم‌پیچ کمکی به نحوی طراحی شده است که در سرعتی مشخص توسط یک کلید گریز از مرکز از مدار خارج گردد. همچنین، این سیم‌پیچ به نحوی طراحی شده است که نسبت مقاومت به راکتانس آن بیشتر از سیم‌پیچ اصلی باشد تا جریان سیم‌پیچ کمکی پیش‌فازتر از جریان سیم‌پیچ اصلی باشد. این نسبت R/X بیشتر معمولاً از طریق استفاده از سیم‌هایی با مقطع کوچکتر برای سیم‌پیچ کمکی حاصل می‌شود. از آنجا که این سیم‌پیچ تنها در زمان راه‌اندازی حضور دارد و لازم نیست جریان بار نامی را به طور پیوسته عبور دهد استفاده از سیم با مقطع کوچک در آن مجاز است.



شکل ۱۶. (a) موتور القایی فاز شکسته (b) جریان‌ها در موتور در شرایط راه‌اندازی

به منظور آسان نمودن درک عملکرد سیم‌پیچ کمکی شکل (۱۷) رسم شده است. از آنجا که جریان سیم‌پیچ کمکی نسبت به جریان سیم‌پیچ اصلی پیش‌فازتر است پیک میدان مغناطیسی B_A قبل از پیک میدان مغناطیسی B_M رخ می‌دهد و به طور خالص گردشی پادساعتگرد در میدان مغناطیسی وجود دارد. به عبارت دیگر، سیم‌پیچ کمکی دامنه یکی از دو میدان دوار استاتور را از دیگری بزرگتر نموده و گشتاور راه‌اندازی خالصی برای موتور تأمین می‌کند. قسمت (c) از شکل (۱۷) مشخصه گشتاور – سرعت این

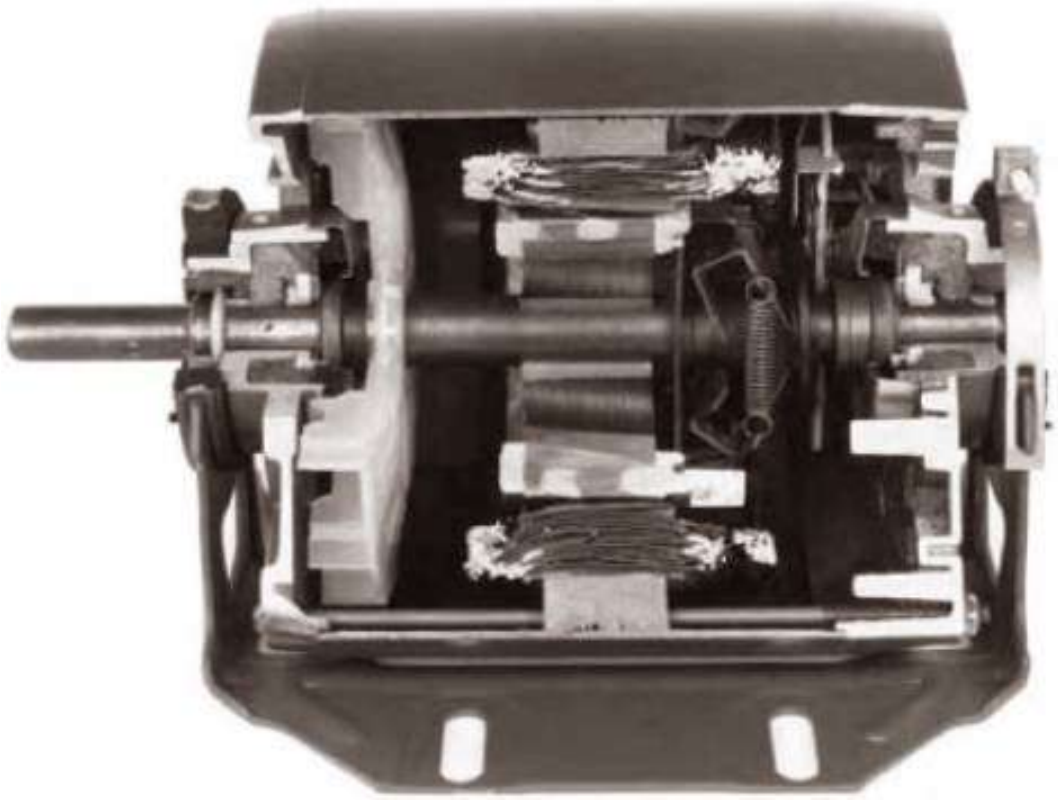
موتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. (a) ارتباط میدان‌های مغناطیسی اصلی و کمکی (b) حداکثر جریان I_A پیش از حداکثر جریان I_M رخ می‌دهد و به طور خالص میدان‌های مغناطیسی دورانی پادساعتگرد تولید می‌نماید (c) مشخصه گشتاور-سرعت حاصل

شکل (۱۸) برش مقطعی از موتور فاز شکسته را نشان می‌دهد. در این شکل سیم‌پیچ کمکی سیم‌های با مقطع کوچکتر هستند. هنگامی که موتور به سرعت قابل بهره‌برداری نزدیک شود کلید گریز از مرکز سیم‌پیچ کمکی را از مدار خارج می‌سازد. موتورهای فاز شکسته گشتاور راه‌اندازی متوسط و جریان راه‌اندازی نسبتاً پایینی دارند. بنابراین در کاربردهایی استفاده می‌شوند که به گشتاور راه‌اندازی بالایی نیاز ندارند (مانند: فن، دمنده و پمپ گریز از مرکز). اندازه قابل دسترس این موتورها غالباً کمتر از یک اسب بخار است و موتورهایی بسیار ارزان قیمت هستند. در یک موتور القایی فاز شکسته جریان سیم‌پیچ کمکی همیشه قبل از جریان سیم‌پیچ اصلی به مقدار حداکثر می‌رسد و در نتیجه میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ کمکی نیز قبل از میدان مغناطیسی سیم‌پیچ اصلی به

مقدار حداکثر خواهد رسید. جهت چرخش موتور وابسته به این است که زاویه فضایی میدان مغناطیسی سیم‌پیچ کمکی ۹۰° جلوتر از میدان مغناطیسی سیم‌پیچ اصلی است یا ۹۰° عقب‌تر از آن. این زاویه می‌تواند تنها با تغییر جهت جریان در سیم‌پیچ کمکی تغییر یابد. بنابراین، جهت چرخش موتور می‌تواند با تغییر اتصال سیم‌پیچ کمکی (بدون اِعمال هیچ تغییری در سیم‌پیچ اصلی) معکوس گردد.



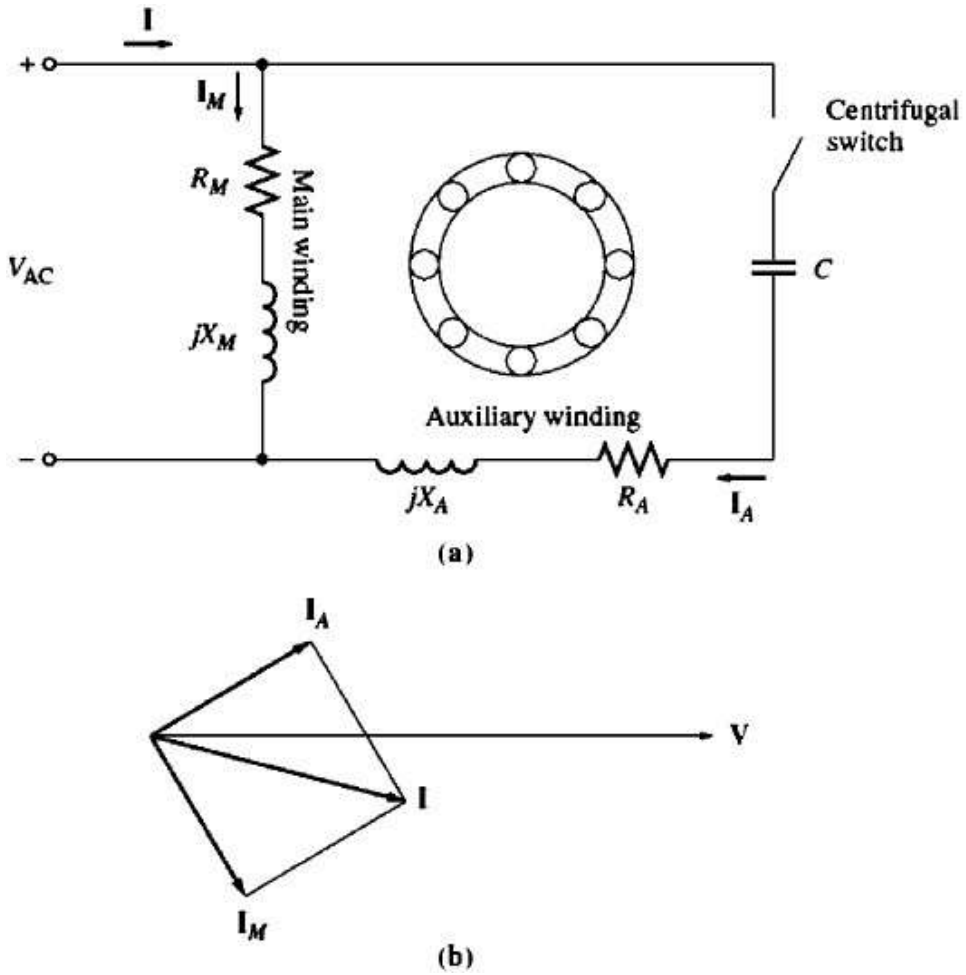
شکل ۱۸. برش مقطعی از یک موتور فاز شکسته

موتورهای با راه‌انداز خازنی:

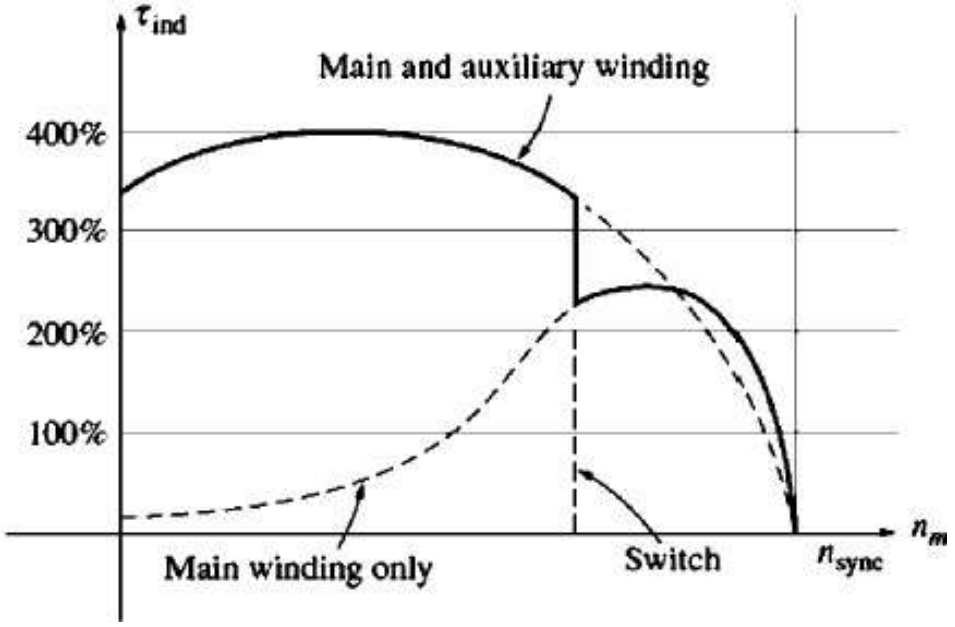
در برخی کاربردها ممکن است گشتاور راه‌اندازی تأمین شده توسط یک موتور فاز شکسته برای شروع چرخش بار روی محور موتور کافی نباشد. در این حالات می‌توان از موتورهای با راه‌انداز خازنی استفاده نمود (شکل (۱۹)). در این نوع موتورها یک خازن به صورت سری در مدار سیم‌پیچ کمکی قرار می‌گیرد. با انتخاب مناسب اندازه این خازن، MMF جریان راه‌اندازی در سیم‌پیچ کمکی را می‌توان به گونه‌ای تنظیم نمود که با MMF جریان در سیم‌پیچ اصلی برابر و نیز زاویه فاز جریان در سیم‌پیچ کمکی به اندازه ۹۰° از زاویه جریان در سیم‌پیچ اصلی جلوتر باشد. از آنجا که دو سیم‌پیچ به طور فیزیکی نیز به اندازه ۹۰° اختلاف فاز مکانی دارند یک اختلاف زاویه‌ی ۹۰° در جریان آنها بیانگر یک میدان مغناطیسی دوار یکنواخت برای استاتور خواهد بود و موتور طوری رفتار می‌نماید که گویی از یک منبع تغذیه سه فاز راه‌اندازی شده است. در این حالت گشتاور راه‌اندازی موتور می‌تواند بیش از سه برابر گشتاور نامی آن باشد (شکل (۲۰)).

موتورهای با راه‌انداز خازنی گران‌تر از موتورهای فاز شکسته بوده و در کاربردهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که گشتاور راه-اندازی مورد نیاز بالا است. برخی از این کاربردها عبارتند از: کمپرسورها، پمپ‌ها، دستگاه‌های تهویه هوا و سایر تجهیزاتی که باید

زیر بار شروع به کار نمایند. شکل (۲۱) نمونه‌ای از این موتورها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. (a) موتور القایی با راه‌انداز خازنی (b) جریان‌ها در موتور در شرایط راه‌اندازی



شکل ۲۰. مشخصه گشتاور–سرعت یک موتور القایی با راه‌انداز خازنی

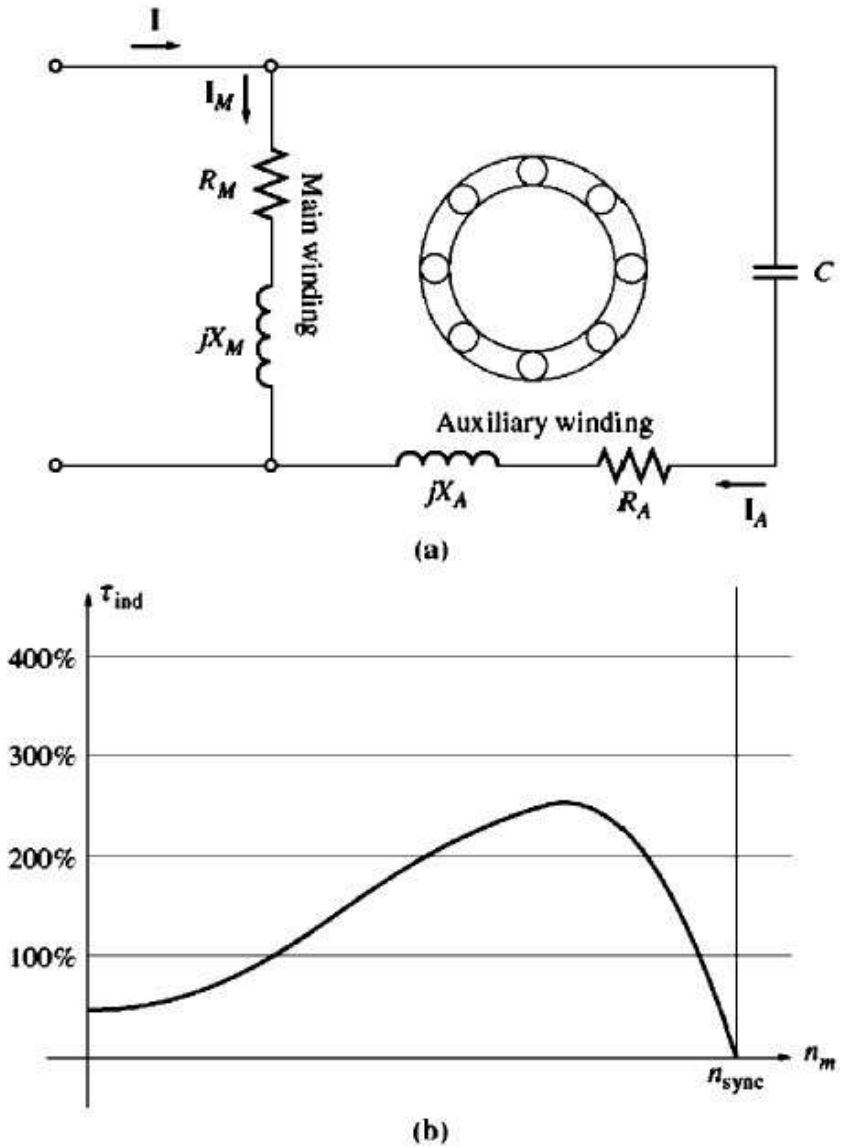
شکل ۲۱. یک موتور القایی با راه‌انداز خازنی

موتورهای با خازن دائمی:

راه‌انداز خازنی در بهبود مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی آنچنان موفق عمل می‌نماید که گاهی یک سیم‌پیچ کمکی با خازنی کوچک به طور دائمی در مدار موتور قرار داده می‌شود. اگر اندازه این خازن به درستی انتخاب شود این موتور در باری مشخص دارای میدان مغناطیسی دوار یکنواخت و عالی خواهد بود تا جایی که در آن نقطه دقیقاً همانند یک موتور القایی سه فاز رفتار می‌کند. این طراحی موتور با خازن دائمی نام دارد که شماتیک و مشخصه گشتاور–سرعت آن در شکل (۲۲) نشان داده شده است. موتورهای با خازن دائمی ساده‌تر از موتورهای با خازن راه‌انداز هستند زیرا کلید راه‌انداز در آنها وجود ندارد. همچنین، این موتورها در بارهای معمولی راندمان و ضریب توان بالاتری داشته و گشتاور آنها نیز در مقایسه با موتورهای القایی تکفاز معمولی هموارتر است. با این وجود، از آنجا که در این موتورها اندازه خازن برای متعادل نمودن جریان سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی در شرایط بار نامی تعیین می‌گردد گشتاور راه‌اندازی موتورهای با خازن دائمی پایین‌تر از موتورهای با خازن راه‌انداز است. از سوی دیگر، چون جریان راه‌اندازی بسیار بیشتر از جریان بار نامی موتور است خازنی که فازها را در شرایط بار نامی متعادل می‌سازد در شرایط راه‌اندازی آنها را بسیار نامتعادل خواهد نمود.

اگر در یک موتور هم گشتاور راه‌اندازی بالا و هم شرایط بار نامی مطلوب مورد نظر باشد می‌توان مانند آنچه در شکل (۲۳) نشان داده شده است از دو خازن در مدار سیم‌پیچ کمکی آن استفاده نمود. به چنین موتورهایی موتورهای دوخازنی گفته می‌شود. خازن بزرگتر (C_{start}) تنها طی مدت راه‌اندازی در مدار است و تعادل تقریبی جریان‌های سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی را تضمین می‌نماید. در نتیجه، گشتاور راه‌اندازی موتور بسیار بالا خواهد رفت. هنگامی که روتور سرعت گرفت کلید گریز از مرکز باز شده و تنها خازن دائمی (C_{run}) در مدار سیم‌پیچ کمکی باقی خواهد ماند. اندازه این خازن به نحوی انتخاب شده که جریان‌های گفته شده را در بار نامی متعادل نموده و بنابراین موتور در این شرایط نیز با گشتاور بالا و ضریب توان مناسب به نحوی کارآمد بهره‌برداری

می گردد.



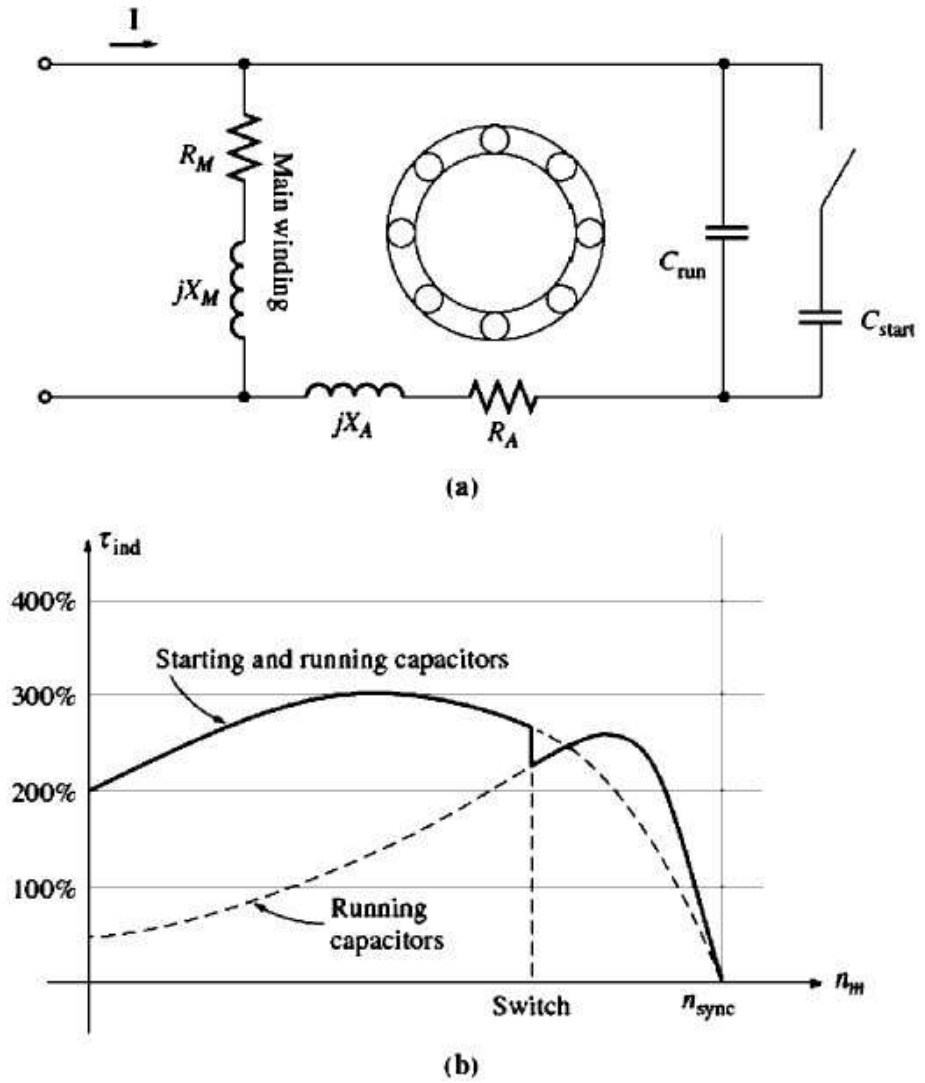
شکل ۲۲. (a) موتور القایی با خازن دائم (b) مشخصه گشتاور–سرعت این موتور

در موتورهای با دو خازن معمولاً اندازه خازن دائمی حدود ۱۰٪ الی ۲۰٪ اندازه خازن راه‌انداز در این موتورها می‌باشد. جهت چرخش هر موتور دارای خازن را نیز می‌توان با جابه‌جا نمودن اتصالات سیم‌پیچ کمکی برعکس نمود.

موتورهای با قطب چاکدار:

یک موتور القایی قطب چاکدار موتور القایی است که تنها دارای یک سیم‌پیچ اصلی می‌باشد. به جای داشتن یک سیم‌پیچ کمکی، قطب‌های این ماشین برجسته بوده و یک قسمت از هر قطب توسط سیم‌پیچی اتصال کوتاه شده (موسوم به shading coil) احاطه گردیده است (قسمت (a) از شکل (۲۴)). شاری متغیر با زمان توسط سیم‌پیچ اصلی در قطب‌ها القاء می‌شود. هنگامی که شار زیر قطب‌ها با زمان تغییر می کند ولتاژ و جریانی در shading coil القاء می‌شود که مطابق قانون لنز با تغییرات شار اصلی مقابله خواهد نمود. این مخالفت تغییرات شار تحت shading coil را کُند نموده و بنابراین قدری عدم تعادل بین دو میدان مغناطیسی دوار(ساعتگرد و پادساعتگرد) استاتور ایجاد می کند. جهت چرخش از سمت قسمت بدون سیم‌پیچ قطب به سمت قسمت دارای سیم‌پیچ آن خواهد

بود. قسمت (b) از شکل (۲۴) مشخصه گشتاور – سرعت این موتور را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳. (a) موتور القایی دو خازنی (b) مشخصه گشتاور–سرعت این موتور

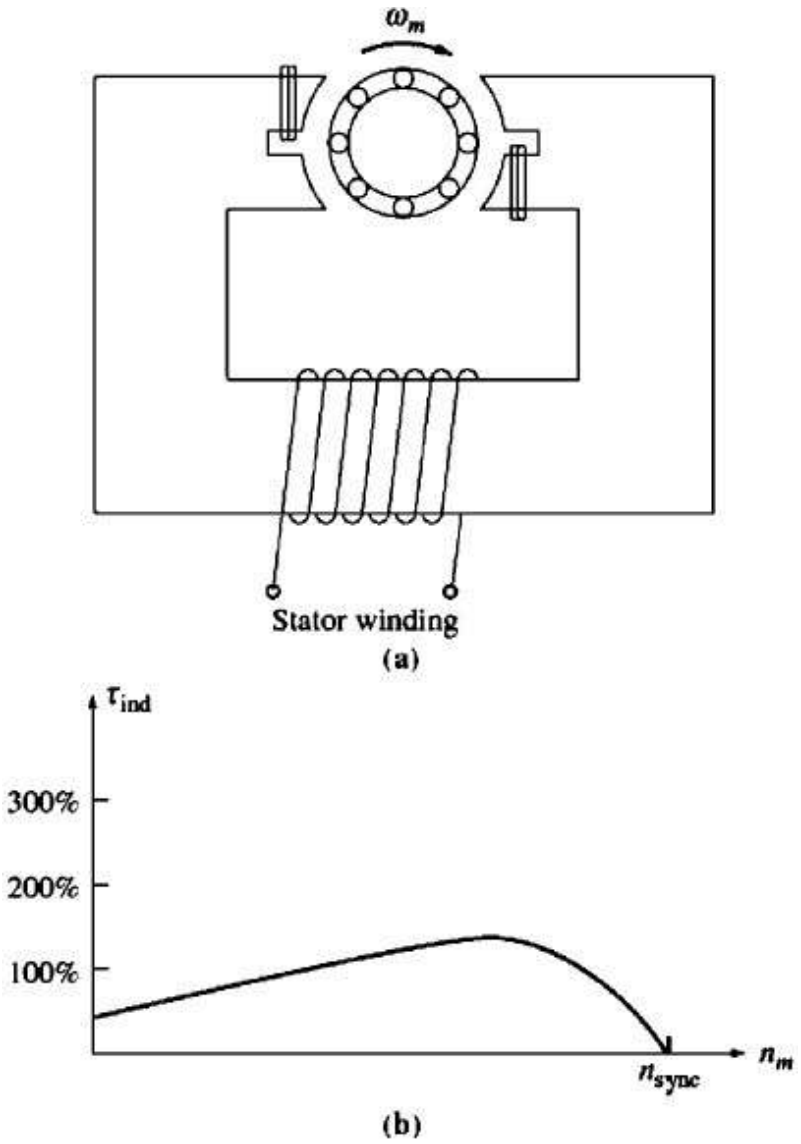
گشتاور راه‌اندازی موتورهای قطب چاکدار در مقایسه با سایر انواع موتورهای القایی تکفاز پایین‌تر است. راندمان این موتورها نیز پایین‌تر بوده و لغزشی بسیار بالاتر از سایر انواع موتورهای القایی تکفاز دارند. طراحی قطب چاکدار تنها در موتورهای بسیار کوچک (۵٪ اسب بخار و کمتر) با گشتاور راه‌اندازی بسیار پایین کاربرد دارد. جایی که امکان به کار گرفتن این موتورها فراهم باشد این موتورها ارزان‌ترین گزینه ممکن خواهند بود.

از آنجا که موتورهای قطب چاکدار برای تولید گشتاور راه‌اندازی خود تنها به سیم‌پیچ اتصال کوتاه شده‌ی روی قطب متکی هستند هیچ راه ساده‌ای برای معکوس نمودن جهت چرخش آنها وجود ندارد. برای این منظور باید از دو سیم‌پیچ در هر قطب استفاده نمود و برحسب جهت چرخش مورد نیاز آنها را در وضعیت اتصال کوتاه قرار داد.

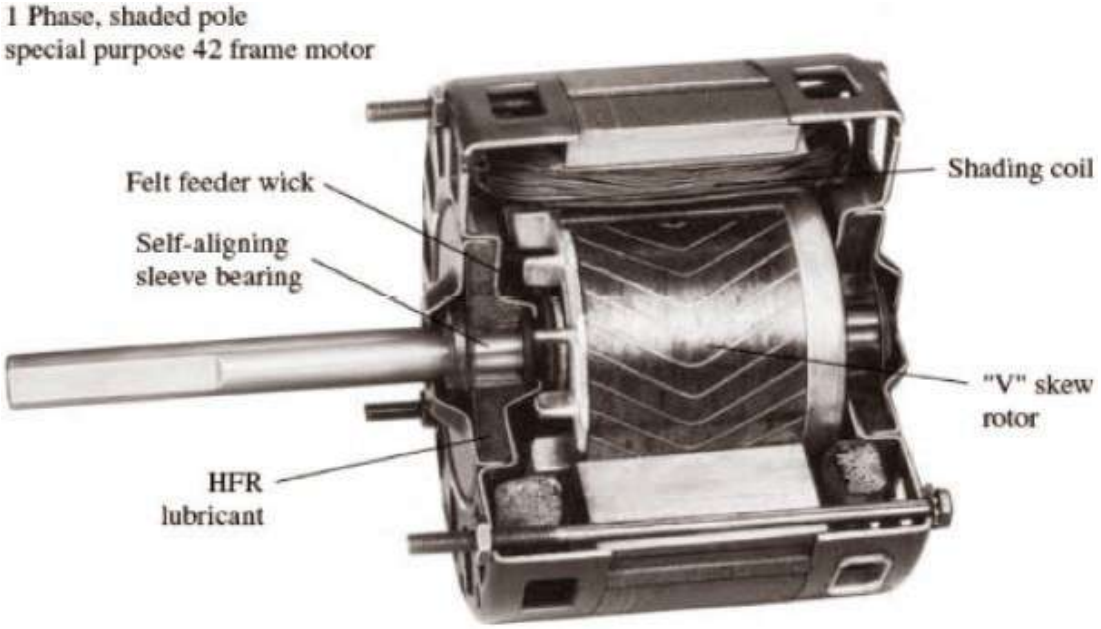
مقایسه موتورهای القایی تکفاز:

موتورهای القایی تکفاز را می‌توان با توجه به مشخصات راه‌اندازی و کار عادی از بهترین به بدترین به صورت زیر مرتب نمود:

۱. موتور با دو خازن؛



شکل ۲۴. (a) موتور القایی قطب چاکدار (b) مشخصه گشتاور–سرعت این موتور



شکل ۲۵. برش مقطعی از یک موتور القایی قطب چاکدار

۲. موتور با خازن راه‌انداز؛
۳. موتور با خازن دائمی؛
۴. موتور فاز شکسته؛
۵. موتور قطب چاکدار.

به طور طبیعی، بهترین موتور گران‌ترین و بدترین موتور ارزان‌ترین هستند. همچنین، تمام این انواع در تمام اندازه‌ها ساخته نمی‌شوند. در واقع این وظیفه مهندس طراح است که ارزان‌ترین موتور را با توجه کاربرد مورد نظر تعیین نماید.

کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز:

به طور کلّی، کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز به همان طریق کنترل سرعت موتورهای القایی سه فاز انجام می‌شود. برای موتورهای قفس سنجابی روش‌های زیر موجود است:

۱. تغییر فرکانس استاتور؛
۲. تغییر تعداد قطب‌ها؛
۳. تغییر ولتاژ ترمینال اِعمال شده (V_T).

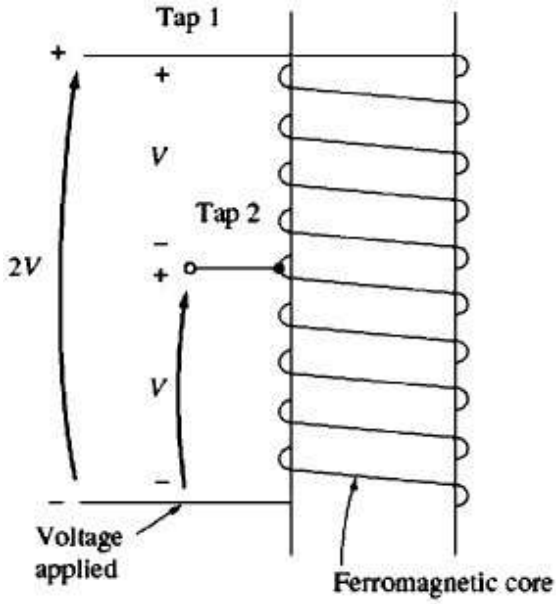
در طراحی‌های عملی موتورهای لغزش بالا روش غالب در کنترل سرعت تغییر ولتاژ ترمینال موتور است. ولتاژ اِعمال شده به موتور به یکی از این سه روش قابل تغییر است:

- استفاده از یک اتوترانسفورماتور که می‌تواند ولتاژ خط را به صورت پیوسته تنظیم نماید. این روش پرهزینه‌ترین روش کنترل سرعت به وسیله‌ی ولتاژ است و تنها در مواردی استفاده می‌شود که کنترل بسیار هموار سرعت مورد نیاز باشد.
- استفاده از یک مدار SCR یا TRIAC به منظور کاهش مقدار مؤثر ولتاژ اِعمال شده به موتور. در این روش، شکل موج متناوب برش زده شده و تا حدودی صدا و لرزش موتور افزایش می‌یابد. مدارهای کنترلی حالت جامد به مقدار قابل ملاحظه‌ای ارزان‌تر از اتوترانسفورماتورها هستند و هر روز بیش از پیش مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- اضافه نمودن یک مقاومت در مدار استاتور. این روش ارزان‌ترین راه کنترل ولتاژ است اما نقطه ضعف آن اتلاف توان اضافه در این مقاومت می‌باشد که موجب کاهش راندمان کل خواهد شد.

یک روش دیگر نیز در موتورهای لغزش بسیار بالا مانند موتورهای قطب چاکدار استفاده می‌شود. به جای استفاده از یک اتوترانسفورماتور مجزا به منظور تغییر ولتاژ اِعمال شده به استاتور موتور از خود سیم‌پیچ استاتور به عنوان اتوترانسفورماتور استفاده می‌گردد. شکل (۲۶) شماتیکی از سیم‌پیچ اصلی استاتور با تعدادی تپ در طول آن را به نمایش گذاشته است. از آنجا که سیم‌پیچ استاتور به دور یم هسته آهنی پیچیده می‌شود کل مجموعه به صورت یک اتوترانسفورماتور عمل می‌نماید.

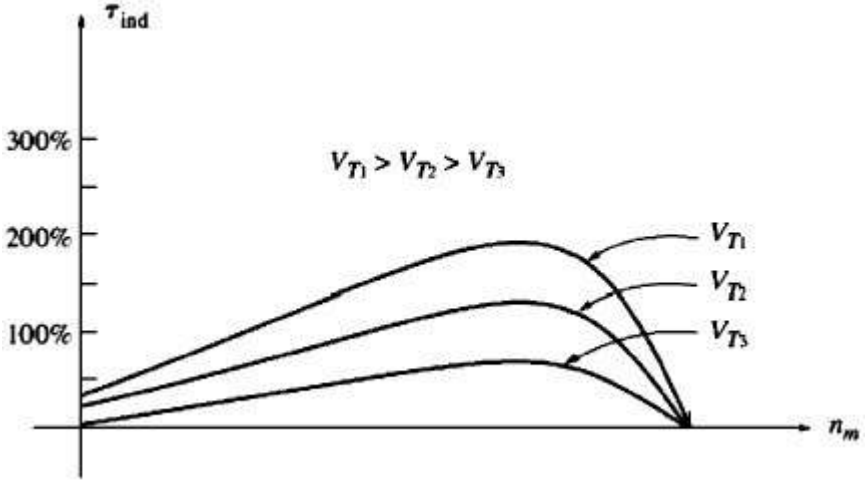
هنگامی که کل ولتاژ خط (V) به کل سیم‌پیچ اصلی اِعمال گردد موتور القایی به صورت طبیعی کار خواهد نمود. به جای این حالت فرض کنید کل ولتاژ به تپ شماره ۲ در وسط سیم‌پیچ اعمال شود. در این حالت ولتاژی یکسان در نیمه بالایی سیم‌پیچ توسط عمل

ترانسفورماتوری القاء شده و کل ولتاژ سیم‌پیچ دو برابر ولتاژ اعمال شده می‌گردد. بنابراین، کل ولتاژ اِعمال شده به نحو کارآمدی دو برابر گردیده است.



شکل ۲۶. استفاده از سیم‌پیچ استاتور به عنوان اتوترانسفورماتور (اگر ولتاژ V به تپ مرکزی اعمال شود مجموع ولتاژ سیم‌پیچ $2V$ خواهد بود)

در نتیجه، هر چه ولتاژ به قسمت کمتری از کل سیم‌پیچ اعمال شود ولتاژ کل سیم‌پیچ بیشتر شده و سرعت موتور نیز در یک بار خاص بالاتر خواهد رفت (شکل (۲۷)).



شکل ۲۷. مشخصه گشتاور–سرعت یک موتور القایی قطب چاکدار با تغییر ولتاژ ترمینال (افزایش V_T می‌تواند توسط افزایش ولتاژ ورودی یا با کلیدزنی روی یک تپ پایین‌تر استاتور انجام شود)

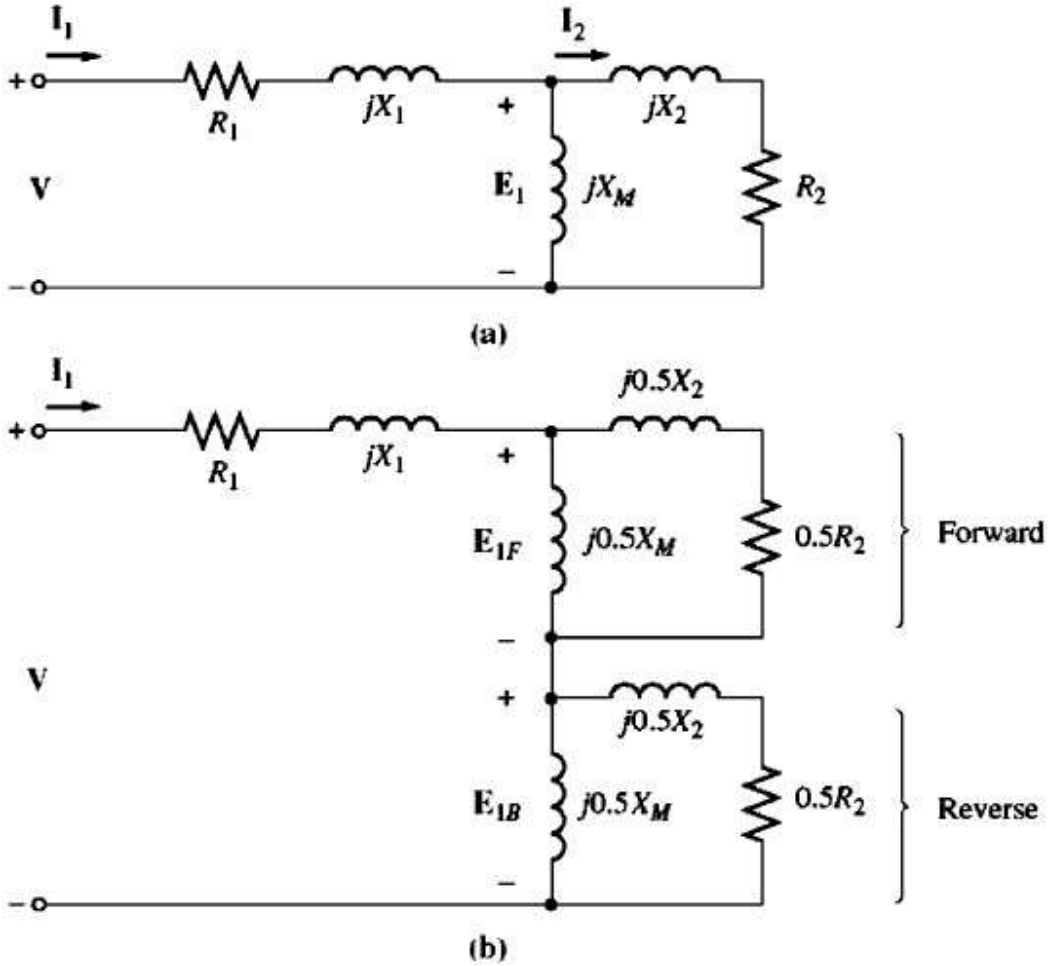
این رویکرد استاندارد در کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز مورد استفاده در فن‌ها و دمنده‌ها است. از آنجا که تنها عناصر مورد نیاز تپ‌ها و یک کلید معمولی چندوضعیتی است این روش کنترل سرعت کاملاً ارزان قیمت می‌باشد. مزیت دیگر این روش در فقدان تلفاتی است که در روش مقاومتی وجود دارد.

مدل مداری یک موتور القایی تکفاز:

همان‌طور که پیشتر گفته شد درک چگونگی القای گشتاور در موتور القایی تکفاز می‌تواند هم از طریق تئوری میدان‌های دوّار

دوگانه و هم از راه تئوری میدان متقاطع موتور القایی تکفاز ممکن گردد. هر کدام از این دو روش می‌توانند به یک مدار معادل برای موتور منجر شوند و مشخصه گشتاور – سرعت می‌تواند از هر دو روش به دست آید. این بخش به بررسی یک مدار معادل بر اساس تئوری میدان‌های دوّار دوگانه (و در واقع تنها یک حالت خاص این تئوری) محدود شده است. در اینجا مدار معادل سیم‌پیچ اصلی موتور القایی هنگامی که به تنهایی در حال کار است ارزیابی خواهد شد. در هنگام حضور هر دو سیم‌پیچ اصلی و کمکی استفاده از روش مؤلفه‌های متقارن برای تحلیل عملکرد موتور القایی تکفاز ضروری است. در این بخش به منظور حفظ سهولت از این تحلیل چشم‌پوشی شده است.

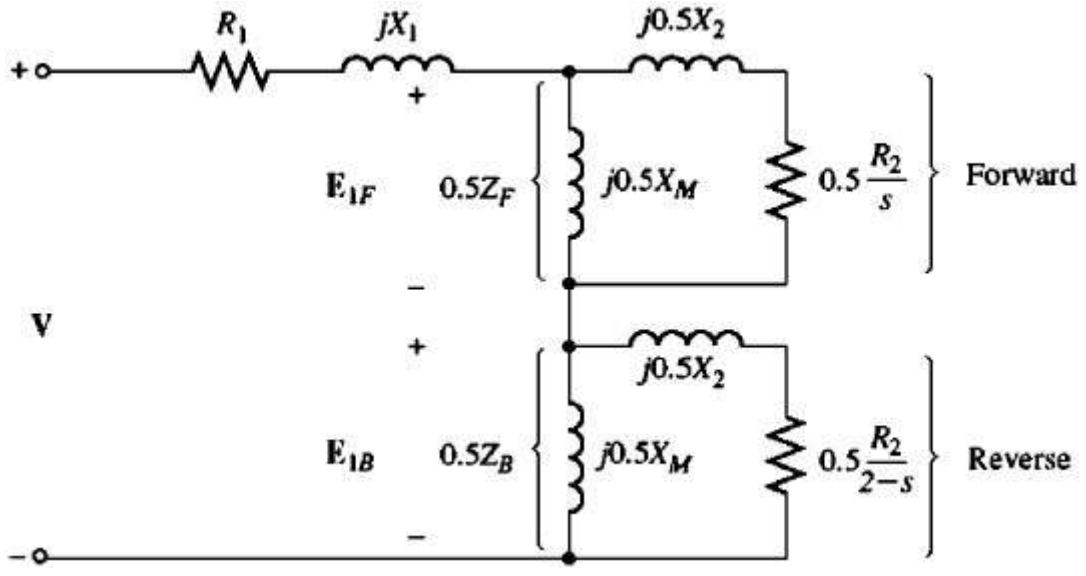
بهترین راه برای شروع تحلیل موتور القایی تکفاز بررسی این موتور در حالت سکون است. در این حالت، موتور همانند یک ترانسفورماتور تکفاز به نظر می‌رسد که ثانویه آن اتصال کوتاه گردیده است و بنابراین مدار معادل موتور نیز در این حالت همان مدار معادل ترانسفورماتور است (قسمت (a) از شکل (۲۸)). در این شکل R_1 و X_1 مقاومت و راکتانس سیم‌پیچ استاتور، X_M راکتانس مغناطیس‌کنندگی، R_2 و X_2 مقادیر ارجاع یافته‌ی مقاومت و راکتانس روتور هستند. همچنین باید توجه نمود که در این شکل تلفات هسته‌ی ماشین نمایش داده نشده است و این تلفات به همراه تلفات مکانیکی و اصطکاک به صورت تلفات چرخشی موتور در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲۸. (a) مدار معادل موتور القایی تکفاز در حالت سکون (تنها سیم‌پیچ اصلی آن برقدار است) (b) مدار معادل با مجزا نمودن اثر میدان‌های مغناطیسی پیشرو و پسرو

همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، شار ضربانی در فاصله‌ی هوایی موتور در شرایط سکون قابل تجزیه به دو میدان مغناطیسی با دامنه برابر اما جهت چرخش مخالف است. از آنجا که این میدان‌ها دارای اندازه برابر هستند هرکدام سهمی مساوی از افت ولتاژ مقاومتی و راکتیو در مدار روتور دارند. بنابراین، می‌توان مدار روتور را به دو قسمت تفکیک نمود که هرکدام متناظر با اثر یکی از این دو میدان مغناطیسی می‌باشند. قسمت (b) از شکل (۲۸) مدار معادل موتور پس از این تفکیک را نشان می‌دهد.

اکنون فرض کنید روتور به کمک یک سیم‌پیچ کمکی شروع به چرخش نموده و این سیم‌پیچ کمکی پس از رسیدن روتور به سرعت مشخص از مدار خارج گردد. همان‌طور که می‌دانید مقاومت مؤثر روتور یک موتور القایی به اختلاف سرعت بین میدان روتور و میدان دوار استاتور وابسته است. اما در اینجا دو میدان مغناطیسی (پیشرو و پسرو) وجود دارد که باعث می‌شود اختلاف سرعت نسبت به هریک مقداری متفاوت گردد. برای میدان مغناطیسی پیشرو اختلاف نرمالیزه شده بین سرعت روتور و این میدان مغناطیسی همان پارامتر لغزش (s) است. این لغزش همانند آنچه در مورد موتورهای القایی سه فاز متداول است تعریف می‌گردد. در نتیجه، مقاومت روتور در قسمتی از مدار معادل که مربوط به میدان مغناطیسی پیشرو است برابر با $0.5R_2/s$ خواهد بود. از آنجا که میدان مغناطیسی پیشرو با سرعت n_s و میدان مغناطیسی پسرو با سرعت $-n_s$ می‌چرخند اختلاف سرعت نرمالیزه شده‌ی بین این دو میدان مغناطیسی برابر با ۲ است. از آنجا که روتور با سرعتی به ضریب s آهسته‌تر از سرعت میدان مغناطیسی پیشرو در حال چرخش است اختلاف سرعت بین روتور و میدان مغناطیسی پسرو $s-2$ خواهد بود. در نتیجه، مقاومت روتور در قسمتی از مدار معادل که مربوط به میدان مغناطیسی پسرو است برابر با $0.5R_2/(2\text{-}s)$ می‌باشد. مدار معادل نهایی موتور القایی تکفاز در شکل (۲۹) نشان داده شده است.

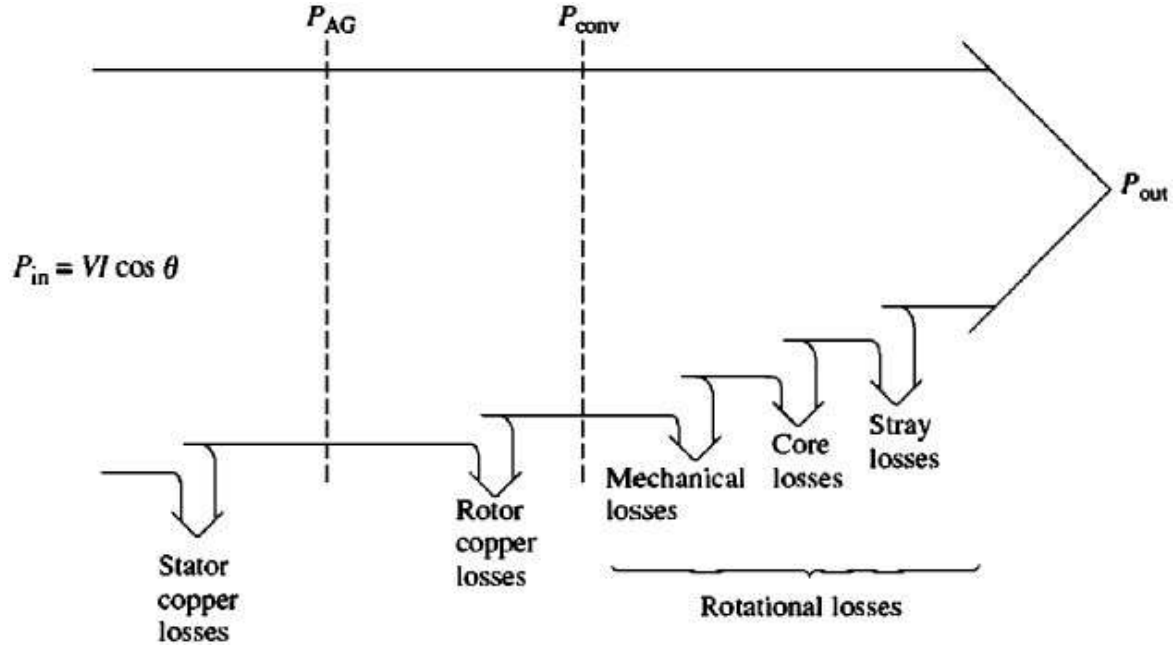


شکل ۲۹. مدار معادل موتور القایی تکفاز در حالت متحرک در حالی که تنها سیم‌پیچ اصلی آن برقدار است

تحلیل مدار معادل موتور القایی تکفاز:

مدار معادل موتور القایی تکفاز در شکل (۲۹) همانند مدار معادل موتور القایی سه فاز است با این تفاوت که هر دو جزء پیشرو و پسرو در توان و گشتاور حضور دارند. همان روابط توان و گشتاور که در موتورهای سه فاز کاربرد داشت اینجا نیز برای هریک از

اجزاء پیشرو یا پسرو موتور القایی تکفاز قابل استفاده است. اما در موتور القایی تکفاز توان خالص و گشتاور خالص در ماشین تفاضل بین اجزاء پیشرو و پسرو می‌باشد. دیاگرام شارش توان در یک موتور القایی تکفاز در شکل (۳۰) نشان داده شده است.



شکل ۳۰. شارش توان در موتور القایی تکفاز

به منظور ساده‌سازی محاسبه جریان ورودی به موتور امپدانس‌های Z_F و Z_B را تعریف می کنیم. Z_F امپدانس منفردی است که معادل تمام المان‌های امپدانسی میدان مغناطیسی پیشرو می‌باشد. به صورت مشابه، Z_B نیز امپدانس منفردی است که معادل تمام المان‌های امپدانسی میدان مغناطیسی پسرو است (شکل (۳۱)). این امپدانس‌ها با روابط زیر محاسبه می گردند:

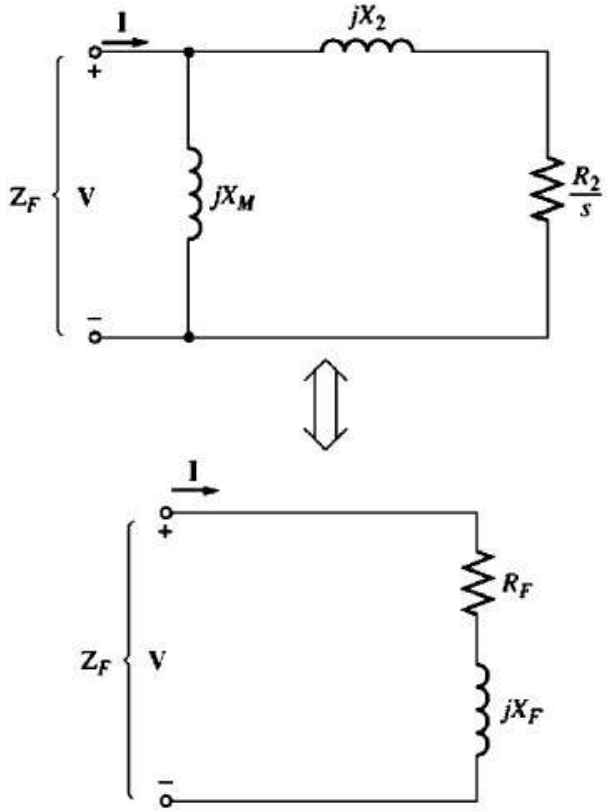
$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(R_2/s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/s + jX_2\right) + jX_M} \quad (۷)$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(R_2/2-s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/2-s + jX_2\right) + jX_M} \quad (۸)$$

اکنون جریان ورودی به سیم‌پیچ استاتور موتور القایی برحسب امپدانس‌های Z_F و Z_B قابل تبیین است:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} \quad (۹)$$

توان فاصله هوایی هر فاز از یک موتور القایی سه فاز توانی است که در مقاومت مدار روتور $0.5R_2/s$ مصرف می‌شود. به طور مشابه، توان‌های فاصله هوایی پیشرو و پسرو در یک موتور القایی تکفاز توان‌هایی هستند که به ترتیب در مقاومت‌های $0.5R_2/s$ و $0.5R_2/(2-s)$ مصرف می گردند. بنابراین، برای محاسبه توان فاصله هوایی موتور ابتدا توان مصرفی مقاومت پیشرو $0.5R_2/s$ و سپس توان مصرفی مقاومت پسرو $0.5R_2/(2-s)$ محاسبه شده و در انتها تفاضل آنها مقدار توان فاصله هوایی موتور را به دست می‌دهد. دشوارترین بخش این محاسبه تعیین جریان‌های مجزایی است که از این دو مقاومت می گذرد. خوشبختانه ساده‌سازی این محاسبه ممکن است. برای این منظور باید توجه داشت که تنها مقاومت در المان‌های مدار که امپدانس Z_F را تشکیل می‌دهد مقاومت R_2/s است. از آنجا که Z_F معادل تونن مدار است توان مصرفی آن باید با توان مصرفی مدار اصلی برابر باشد و چون R_2/s تنها مقاومت در مدار اصلی است توان مصرفی آن باید با توان مصرفی امپدانس Z_F برابر باشد.



شکل ۳۱. ترکیب سری R_F و jX_F همان معادل تونن المان‌های امپدانسی میدان پیشرو است و بنابراین در یک جریان مشخص R_F باید همان توانی را مصرف نماید که R_2/s مصرف می‌کند

با توجه به توضیحات فوق، توان فاصله هوایی برای میدان مغناطیسی پیشرو عبارت است از:

$$P_{AG,F} = (0.5R_F)I_1^2 \quad (۱۰)$$

و برای توان فاصله هوایی میدان مغناطیسی پسرو می‌توان نوشت:

$$P_{AG,B} = (0.5R_B)I_1^2 \quad (۱۱)$$

مزیت استفاده از دو رابطه‌ی اخیر در این نکته است که تنها با محاسبه یک جریان I_1 می‌توان هر دو توان فاصله هوایی را محاسبه نمود. کل توان فاصله هوایی در یک موتور القایی تکفاز عبارت است از:

$$P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} = 0.5(R_F - R_B)I_1^2 \quad (۱۲)$$

پس از تعیین توان فاصله هوایی خالص موتور، گشتاور القایی موتور نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (۱۳)$$

تلفات مس روتور از مجموع تلفات مس روتور به واسطه‌ی میدان پیشرو و تلفات مس روتور به واسطه‌ی میدان پسرو تعیین می‌گردد:

$$P_{Cu} = P_{Cu,F} + P_{Cu,B} \quad (۱۴)$$

تلفات مس روتور در یک موتور القایی سه فاز از حاصلضرب پارامتر لغزش در توان فاصله‌ی هوایی قابل تعیین بود. بنابراین، تلفات مس روتور به واسطه‌ی میدان پیشرو در یک ماشین القایی تکفاز برابر است با:

$$P_{Cu,F} = sP_{AG,F} \quad (۱۵)$$

و تلفات مس روتور به واسطه‌ی میدان پسرو:

$$P_{Cu,B} = sP_{AG,B} \quad (۱۶)$$

توان الکتریکی تبدیل شده به توان مکانیکی در یک ماشین القایی تکفاز با همان رابطه‌ی ماشین القایی سه فاز قابل محاسبه است:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m = \tau_{ind} \cdot (1-s)\omega_s = (1-s)P_{AG} \quad (۱۷)$$

همانند موتور القایی سه فاز، توان خروجی محور با P_{conv} برابر نیست زیرا تلفات چرخشی نیز باید از آن کسر گردد. در این مدل ارائه شده برای ماشین القایی تکفاز تلفات هسته، تلفات مکانیکی و تلفات سرگردان از P_{conv} کم می‌شوند تا P_{out} به دست آید.

مثال: یک موتور القایی تکفاز از نوع فاز شکسته با مشخصات ⅓-hp، ۱۱۰V، ۶۰Hz و شش قطب دارای امپدانس‌های زیر است:

$$R_1 = 1.52^{\Omega}, X_1 = 2.1^{\Omega}, R_2 = 3.13^{\Omega}, X_2 = 1.56^{\Omega}, X_M = 58.2^{\Omega}$$

تلفات هسته این موتور ۳۵W بوده و تلفات ناشی از مقاومت هوا، اصطکاک و غیره ۱۶W است. موتور در حال کار در ولتاژ و فرکانس نامی با سیم‌پیچ راه‌انداز مدار باز شده در لغزش ۵٪ می‌باشد. این کمیّت‌ها را محاسبه نمایید: الف) سرعت روتور ب) جریان استاتور ج) ضریب قدرت استاتور د) توان ورودی ه) توان فاصله هوایی و) توان تبدیل شده ز) گشتاور القایی ح) توان خروجی ط) گشتاور بار ی) راندمان.

حل: ابتدا با استفاده از روابط (۷) و (۸) امپدانس‌های پیشرو و پسروی موتور در لغزش ۵٪ تعیین می‌گردند.

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(R_2/s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(3.13/0.05 + j1.56\right)(j58.2)}{3.13/0.05 + j1.56 + j58.2} = \frac{-90.792 + j3643.32}{62.6 + j59.76}$$

$$= \frac{3644.45\angle 91.43°}{86.54\angle 43.67°} = 42.11\angle 47.76° = 28.31 + j31.18$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(R_2/2-s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/2-s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(3.13/1.95 + j1.56\right)(j58.2)}{3.13/1.95 + j1.56 + j58.2} = \frac{-90.792 + j93.42}{1.61 + j59.76}$$

$$= \frac{130.27\angle 134.18°}{59.78\angle 88.46°} = 2.18\angle 45.72° = 1.52 + j1.56$$

مقادیر امپدانس‌های فوق در محاسبه‌ی جریان، توان و گشتاور مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

الف) $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120\times 60}{6} = 1200^{rpm} \rightarrow n_m = (1-s)n_s = (1-0.05)\times 1200 = 1140^{rpm}$

ب) $I_1 = \frac{V}{R_1+jX_1+0.5Z_F+0.5Z_B} = \frac{110\angle 0°}{1.52+j2.1+0.5(28.31+j31.18)+0.5(1.52+j1.56)} = \frac{110\angle 0°}{16.435+j18.47} = \frac{110\angle 0°}{24.72\angle 48.34°} = 4.45\angle -48.34°$

ج) $PF = \cos(-48.34°) = 0.665^{lag}$

د) $P_{in} = |V||I|\cos(\theta) = 110 \times 4.45 \times \cos(-48.34°) = 325.5^{W}$

ه) $P_{AG,F} = 0.5R_F|I_1|^2 = 0.5 \times 28.31 \times 4.45^2 = 280.3^{W},$

$P_{AG,B} = 0.5R_B|I_1|^2 = 0.5 \times 1.52 \times 4.45^2 = 15.05^{W} \rightarrow P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} = 280.3 - 15.05 = 265.25^{W}$

و) $P_{conv} = (1-s)P_{AG} = (1-0.05) \times 265.25 = 251.99^{W}$

ز) $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} = \frac{265.25}{\frac{1200}{60}\times 2\pi} = 2.11^{N\cdot m}$

ح) $P_{out} = P_{conv} - P_{loss} = 251.99 - 35 - 16 = 200.99^{W}$

ط) $\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{200.99}{\frac{1140}{60}\times 2\pi} = 1.68^{N\cdot m}$

ی) $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{200.99}{325.5} \times 100\% = 61.7\%$

مثال: یک موتور القایی تکفاز از نوع فاز شکسته با مشخصات ⅓-hp، ۱۲۰V، ۶۰Hz و چهار قطب دارای امپدانس‌های زیر است:

$R_1 = 1.8^{\Omega}, X_1 = 2.4^{\Omega}, R_2 = 2.5^{\Omega}, X_2 = 2.4^{\Omega}, X_M = 60^{\Omega}$

کل تلفات این موتور در لغزش ۵٪ مقدار ۵۱W بوده و این تلفات در سراسر بازه‌ی کار عادی آن ثابت فرض می‌گردد. این کمیّت‌ها را در لغزش ۵٪ محاسبه نمایید: الف) سرعت روتور ب) جریان استاتور ج) ضریب قدرت استاتور د) توان ورودی ه) توان فاصله هوایی و) توان تبدیل شده ز) گشتاور القایی ح) توان خروجی ط) گشتاور بار ی) راندمان.

حل: ابتدا با استفاده از روابط (۷) و (۸) امپدانس‌های پیشرو و پسروی موتور در لغزش ۵٪ تعیین می‌گردند.

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(R_2/s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(2.5/0.05 + j2.4\right)(j60)}{2.5/0.05 + j2.4 + j60} = \frac{-144 + j3000}{50 + j62.4} = \frac{3003.45\angle 92.75^\circ}{79.96\angle 51.3^\circ}$$
$$= 37.56\angle 41.45^\circ = 28.15 + j24.86$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(R_2/2-s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/2-s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(2.5/1.95 + j2.4\right)(j60)}{2.5/1.95 + j2.4 + j60} = \frac{-144 + j76.92}{1.28 + j62.4}$$
$$= \frac{163.26\angle 151.89^\circ}{62.41\angle 88.82^\circ} = 2.62\angle 63.07^\circ = 1.19 + j2.34$$

مقادیر امپدانس‌های فوق در محاسبه‌ی جریان، توان و گشتاور مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

الف) $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120\times 60}{4} = 1800^{rpm} \rightarrow n_m = (1-s)n_s = (1-0.05)\times 1800 = 1710^{rpm}$

ب) $I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} = \frac{120\angle 0^\circ}{1.8 + j2.4 + 0.5(28.15 + j24.86) + 0.5(1.19 + j2.34)} = \frac{120\angle 0^\circ}{16.47 + j16} = \frac{120\angle 0^\circ}{22.96\angle 44.17^\circ} = 5.23\angle -44.17^\circ$

ج) $PF = \cos(-44.17^\circ) = 0.717^{lag}$

د) $P_{in} = |V||I|\cos(\theta) = 120 \times 5.23 \times \cos(-44.17^\circ) = 449.99$

ه) $P_{AG,F} = 0.5R_F|I_1|^2 = 0.5 \times 28.15 \times 5.23^2 = 384.99^{W},$

$P_{AG,B} = 0.5R_B|I_1|^2 = 0.5 \times 1.19 \times 5.23^2 = 16.27^{W} \rightarrow P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} = 384.99 - 16.27$
$= 368.72^{W}$

و) $P_{conv} = (1-s)P_{AG} = (1-0.05) \times 368.72 = 350.28^{W}$

ز) $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} = \frac{368.72}{\frac{1800}{60}\times 2\pi} = 1.96^{N\cdot m}$

ح) $P_{out} = P_{conv} - P_{loss} = 350.28 - 51 = 299.28^{W}$

ط) $\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{299.28}{\frac{1710}{60}\times 2\pi} = 1.67^{N\cdot m}$

ی) $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{299.28}{449.99} \times 100\% = 66.5\%$

مثال: اگر سیم‌پیچ کمکی موتور القایی مثال قبل پس از رسیدن به سرعت ۴۰۰rpm باز شود آیا گشتاور القایی تولید شده توسط سیم‌پیچ اصلی برای ادامه چرخش روتور کافی است یا اینکه سرعت آن کاهش یافته و متوقف خواهد شد؟

حل: ابتدا لغزش ماشین در سرعت ۴۰۰rpm محاسبه می‌گردد:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{1800 - 400}{1800} = 0.778$$

اکنون امپدانس‌های پیشرو و پسروی موتور در این لغزش تعیین می‌شوند:

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(R_2/s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(2.5/0.778 + j2.4\right)(j60)}{2.5/0.778 + j2.4 + j60} = \frac{-144 + j192.8}{3.21 + j62.4} = \frac{240.64\angle 126.76°}{62.48\angle 87.06°}$$
$$= 3.85\angle 39.7° = 2.96 + j2.46$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(R_2/2 - s + jX_2\right)(jX_M)}{\left(R_2/2 - s + jX_2\right) + jX_M} = \frac{\left(2.5/1.222 + j2.4\right)(j60)}{2.5/1.222 + j2.4 + j60} = \frac{-144 + j122.75}{2.05 + j62.4}$$
$$= \frac{189.22\angle 139.55°}{62.43\angle 88.12°} = 3.03\angle 51.43° = 1.89 + j2.37$$

با محاسبه جریان استاتور و با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) توان فاصله‌ی هوایی قابل محاسبه است:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} = \frac{120\angle 0°}{1.8 + j2.4 + 0.5(2.96 + j2.46) + 0.5(1.89 + j2.37)} = \frac{120\angle 0°}{4.225 + j4.815}$$
$$= \frac{120\angle 0°}{6.41\angle 48.73°} = 18.72\angle -48.73°$$

$$P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} = 0.5(R_F - R_B)I_1^2 = 0.5 \times (2.96 - 1.89) \times 18.72^2 = 187.48^W$$

در نهایت توان تبدیل شده عبارت است از:

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} = (1 - 0.778) \times 187.48 = 41.62^W$$

و از آنجا که این عدد از تلفات چرخشی ماشین یعنی ۵۱W کمتر است روتور متوقف خواهد شد.

سایر انواع موتورهای مخصوص:

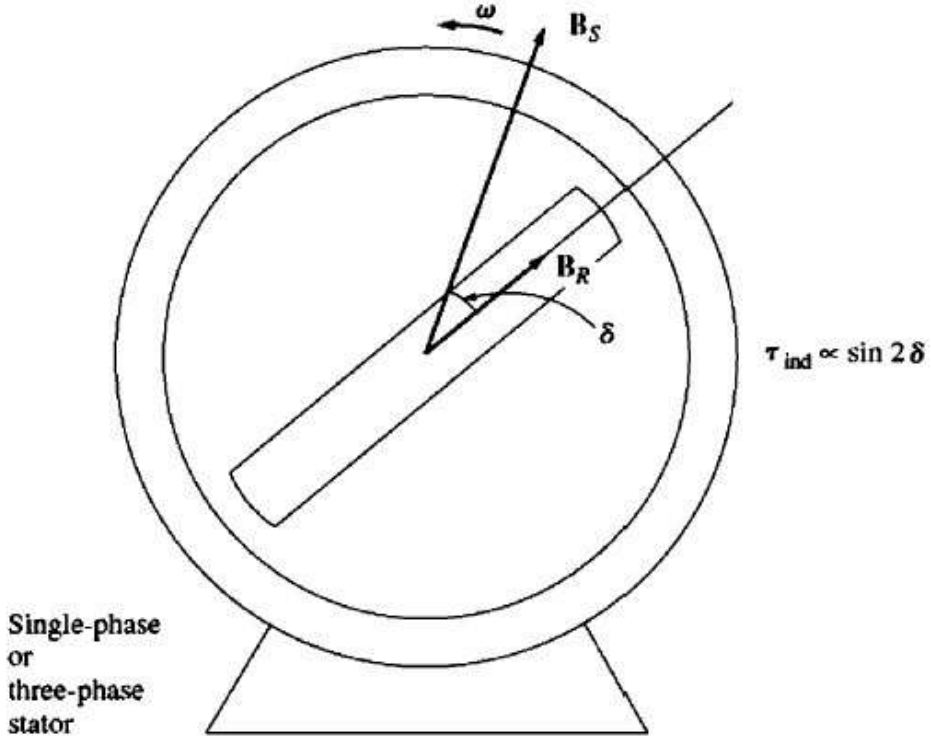
دو نوع دیگر از ماشین‌ها که در کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند موتورهای رلوکتانسی و موتورهای هیسترزیس هستند. این موتورها در ساختار روتور با موتورهایی که پیشتر تشریح گردیدند متفاوتند اما استاتور آنها به همان صورت است. همانند موتورهای القایی استاتور این موتورها نیز می‌تواند به صورت تکفاز یا سه فاز ساخته شود. نوع دیگر از موتورهای مخصوص موتورهای پله‌ای هستند که استاتور آنها چند فاز است اما به تغذیه‌ی سه فاز نیاز ندارد. و بالاخره آخرین نوع از ماشین‌های مورد بررسی در اینجا، موتور DC بدون جاروبک است که همان‌طور که از نام آن نیز مشخص است با منبع DC تغذیه می‌گردد.

موتور رلوکتانسی:

موتور رلوکتانسی موتوری است که برای عملکرد خود به گشتاور رلوکتانسی نیازمند است. گشتاور رلوکتانسی گشتاوری است که در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی در یک جسم آهنی القاء می‌شود و باعث می‌گردد تا آن جسم در راستای میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد. این گشتاور به علت القاء یک میدان مغناطیسی داخلی توسط میدان خارجی در جسم آهنی رخ می‌دهد و

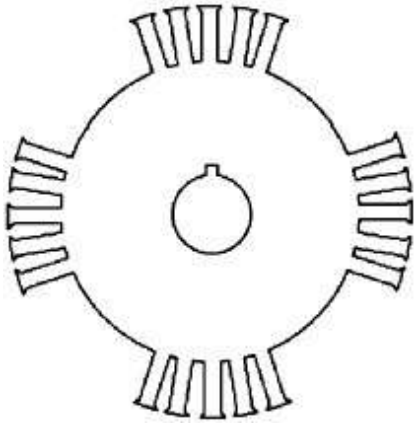
گشتاوری بین دو میدان ایجاد می‌شود که جسم را چرخانده و آن را در راستای میدان خارجی قرار می‌دهد. به منظور ایجاد گشتاور رلوکتانسی در یک جسم آن جسم باید در راستای محورهایی با زوایایی متناظر با زوایای بین قطب‌های مجاور میدان مغناطیسی خارجی امتداد یابد.

شماتیک ساده‌ی یک موتور رلوکتانسی دو قطب در شکل (۳۲) نشان داده شده است. می‌توان اثبات نمود که گشتاور اعمال شده به روتور این موتور متناسب با $\sin(2\delta)$ است که δ زاویه‌ی الکتریکی بین میدان‌های مغناطیسی روتور و استاتور است. بنابراین، گشتاور رلوکتانسی موتور زمانی حداکثر است که زاویه بین میدان‌های مغناطیسی استاتور و روتور 45° می‌باشد. موتور رلوکتانسی ساده‌ی شکل (۳۲) یک موتور سنکرون است. همانند یک موتور سنکرون عادی این موتور نیز فاقد گشتاور راه‌اندازی می‌باشد.



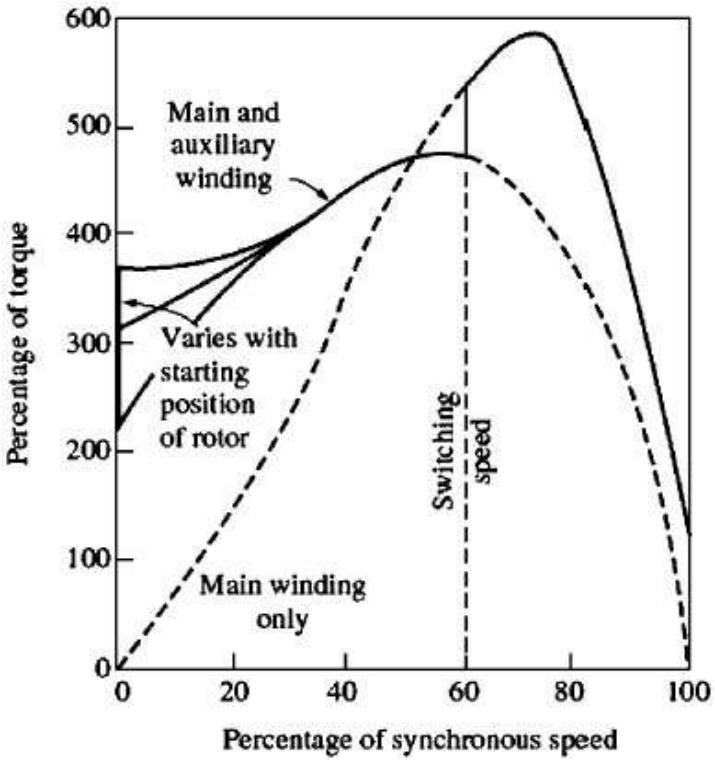
شکل ۳۲. مفهوم پایه‌ی یک موتور رلوکتانسی

یک موتور رلوکتانسی خود راه‌انداز که می‌تواند تا رسیدن به گشتاور رلوکتانسی حداکثر در سرعت سنکرون کار کند با انجام اصلاحاتی در روتور یک موتور القایی مانند شکل (۳۳) قابل ساخت است.



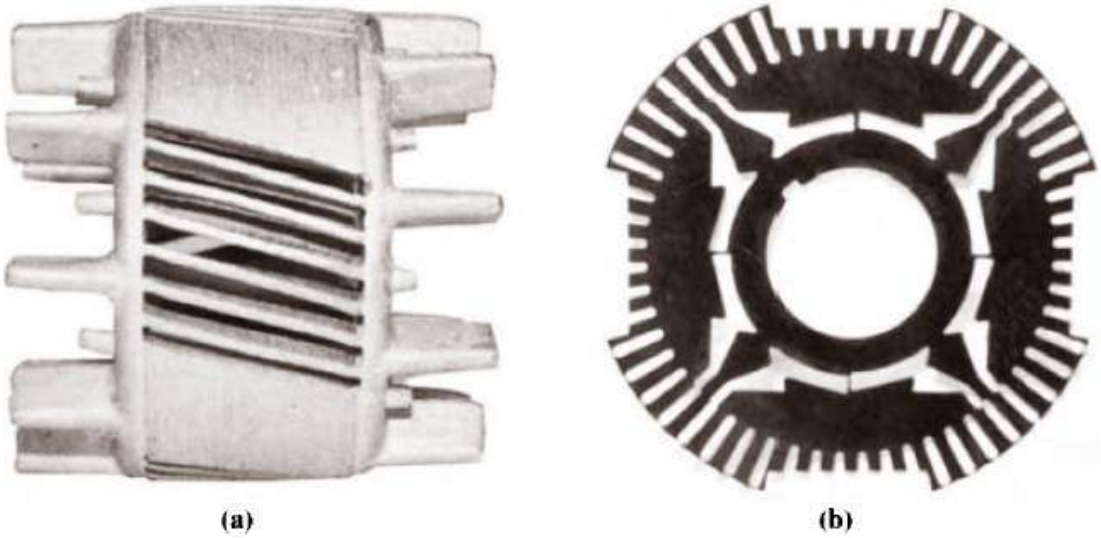
شکل ۳۳. روتور یک موتور رلوکتانسی خود راه‌انداز

در شکل (۳۳) برای عملکرد حالت ماندگار به عنوان یک موتور رلوکتانسی روتور دارای قطب برجسته بوده و نیز برای راه‌اندازی یک قفس یا سیم‌پیچ میراکننده دارد. استاتور این موتور می‌تواند تکفاز یا سه فاز باشد. مشخصه‌ی گشتاور – سرعت این موتور که گاهی اوقات موتور القایی سنکرون نیز نامیده می‌شود در شکل (۳۴) نمایش داده شده است.



شکل ۳۴. مشخصه گشتاور–سرعت یک موتور رلوکتانسی تکفاز خود راه‌انداز

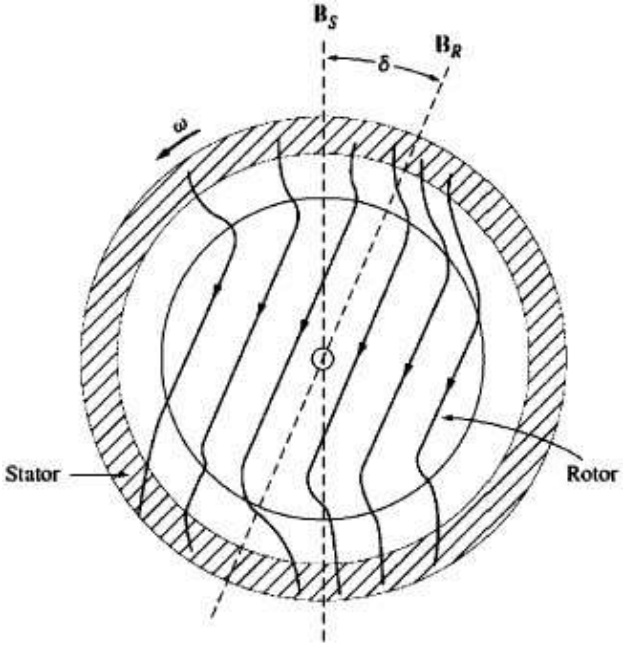
یک تغییر جذاب در ایده‌ی موتور رلوکتانسی به ساخت موتور سینکرو در ایالات متحده انجامید. روتور این موتور در شکل (۳۵) نشان داده شده است. به منظور افزایش کوپل بین قطب‌های مجاور و در نتیجه افزایش حداکثر گشتاور رلوکتانسی موتور از مسیرهای شار در آن استفاده شده است. با استفاده از این مسیرهای شار، حداکثر گشتاور رلوکتانسی به حدود ۱۵۰٪ گشتاور نامی افزایش می‌یابد (در مقایسه با موتور رلوکتانسی معمولی که این میزان ۱۰۰٪ گشتاور نامی است).



شکل ۳۵. (a) ریخته‌گری آلومینیومی روتور یک موتور سینکرو (b) ورقه‌ی روتور (مسیرهای شار قطب‌های مجاور را به هم متصل می‌نمایند)

موتور هیسترزیس:

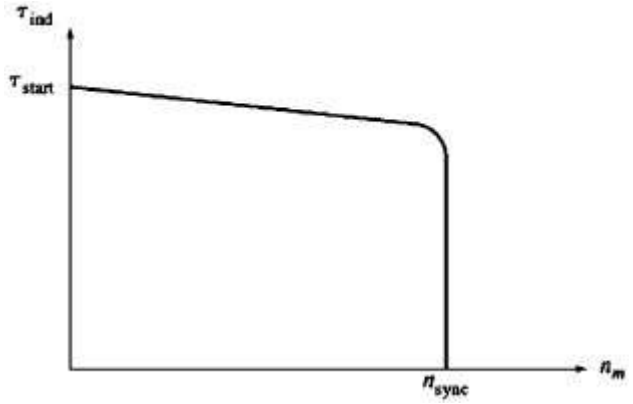
این موتور برای تولید گشتاور مکانیکی از پدیده‌ی هیسترزیس استفاده می‌نماید. روتور موتور هیسترزیس یک روتور صاف استوانه-ای از جنس ماده‌ای مغناطیسی بدون هیچ دندانه یا سیم‌پیچی است. استاتور این موتور می‌تواند تکفاز و یا سه فاز باشد. اما در حالت تکفاز یک خازن دائمی با یک سیم‌پیچ کمکی به منظور تأمین میدان مغناطیسی هموار باید استفاده گردد که این امر تلفات موتور را به نحو چشمگیری کاهش می‌دهد. شکل (۳۶) اساس عملکرد یک موتور هیسترزیس را نشان می‌دهد. هنگامی که یک جریان سه فاز (یا تکفاز با سیم‌پیچ کمکی) به استاتور موتور اعمال شود یک میدان مغناطیسی دوار در ماشین ظاهر می‌گردد. این میدان مغناطیسی دوار فلز روتور را مغناطیس نموده و درون آن قطب‌هایی القاء می‌نماید. هنگامی که روتور زیر سرعت سنکرون کار می‌کند دو منبع گشتاور در آن وجود دارد. بیشتر گشتاور توسط هیسترزیس تولید می‌شود. وقتی که میدان مغناطیسی استاتور در اطراف سطح روتور می‌چرخد به دلیل تلفات هیسترزیس بالا در فلز روتور شار روتور نمی‌تواند مستقیم از آن عبور نماید. هر چه تلفات هیسترزیس ذاتی ماده سازنده روتور بیشتر باشد زاویه‌ی پس‌فاز بودن میدان مغناطیسی روتور نسبت به میدان مغناطیسی استاتور نیز بیشتر خواهد بود. از آنجا که میدان‌های مغناطیسی استاتور و روتور در زوایای متفاوتی نسبت به هم هستند گشتاوری در موتور تولید خواهد گردید. علاوه بر این، میدان مغناطیسی استاتور جریان‌های گردابی در روتور ایجاد می‌نماید و این جریان‌ها میدان مغناطیسی خودشان را تولید نموده و گشتاور روی روتور افزایش بیشتری خواهد یافت. هر اندازه حرکت نسبی بین روتور و میدان مغناطیسی استاتور بیشتر باشد جریان‌های گردابی نیز بیشتر بوده و گشتاور حاصل از آنها هم بیشتر خواهد بود.



شکل ۳۶. ساختار یک موتور هیسترزیس (مؤلفه اصلی گشتاور در این موتور متناسب با زاویه بین میدان‌های مغناطیسی روتور و استاتور است)

وقتی موتور به سرعت سنکرون برسد عبور شار استاتور از میان روتور متوقف خواهد شد و روتور مانند یک مغناطیس دائم عمل می‌نماید. در این حالت، گشتاور القایی در موتور متناسب با زاویه بین روتور و میدان مغناطیسی استاتور است. مقدار حداکثر این زاویه توسط شار پسماند در روتور تعیین می‌شود. شکل (۳۷) مشخصه‌ی گشتاور – سرعت موتور هیسترزیس را نشان می‌دهد. از

آنجا که مقدار شار پسماند در یک روتور تابعی از چگالی شار استاتور و جنس روتور است گشتاور هیسترزیس موتور در هر سرعتی از صفر تا سرعت سنکرون تقریباً ثابت است. گشتاور حاصل از جریان گردابی تا حدودی متناسب با لغزش موتور است. این دو نکته در کنار هم شکل مشخصه‌ی گشتاور – سرعت موتور هیسترزیس را می‌سازد.



شکل ۳۷. مشخصه گشتاور–سرعت یک موتور هیسترزیس

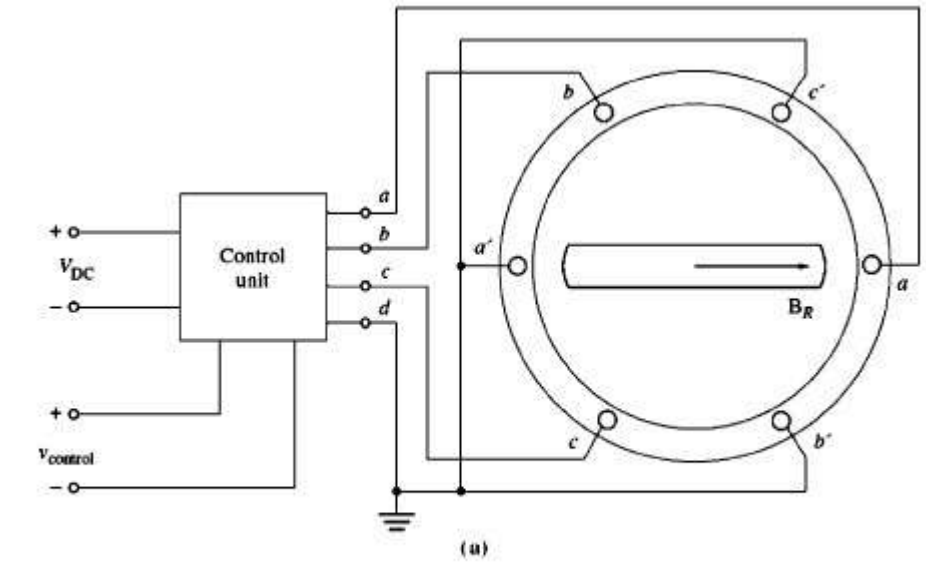
از آنجا که گشتاور یک موتور هیسترزیس در هر سرعت زیرسنکرونی بیش از گشتاور سرعت سنکرون می‌باشد موتور هیسترزیس می‌تواند هر بار قابل تحمل در شرایط عادی کار را شتاب بخشد. یک موتور هیسترزیس کوچک با استاتور قطب چاکدار می‌تواند ساخته شود تا یک موتور سنکرون توان پایین خودراه‌انداز را شکل دهد.

موتور پله‌ای:

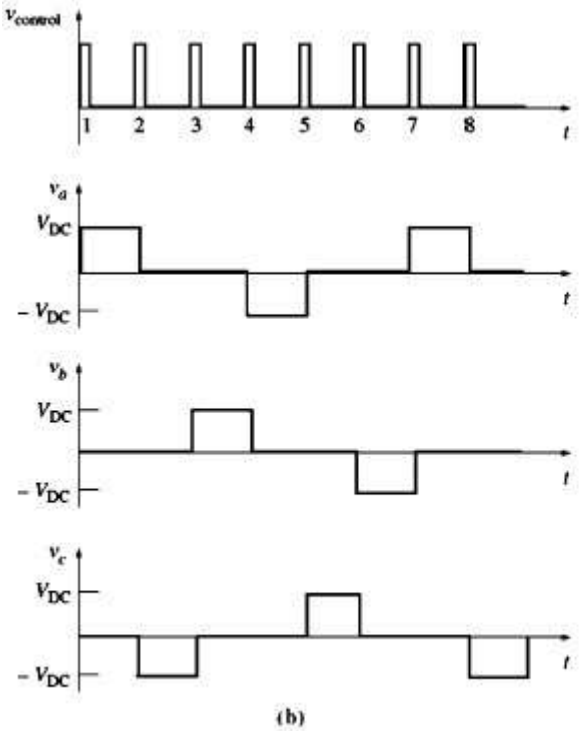
موتور پله‌ای نوع خاصی از موتور سنکرون است که به نحوی طراحی شده است که به ازای هر پالس الکتریکی دریافت شده از واحد کنترل خود مقدار مشخصی بچرخد. مقادیر نوعی این گام چرخش °۷/۵ یا °۱۵ در هر پالس است. از آنجا که موقعیت یک محور یا قطعه‌ای دیگر از ماشین می‌تواند به طور دقیق توسط این این موتورها کنترل شود در بسیاری سیستم‌های کنترلی از موتورهای پله‌ای استفاده می‌شود. یک موتور پله‌ای ساده و واحد کنترل مربوط به آن در شکل (۳۸) نشان داده شده است. برای درک عملکرد موتور پله‌ای شکل (۳۹) رسم شده است. این شکل یک استاتور سه فاز دو قطب با روتوری مغناطیس دائم را نشان می‌دهد. اگر ولتاژ DC به فاز a استاتور اعمال گردد در حالی که فازهای b و c فاقد ولتاژ هستند آنگاه گشتاوری در روتور القاء خواهد شد که باعث می‌شود تا روتور با میدان مغناطیسی استاتور B_s خود را همراستا نماید (قسمت (b) از شکل (۳۹)). اکنون فرض کنید فاز a خاموش شده و ولتاژی منفی به فاز c اعمال شود. میدان جدید استاتور نسبت به میدان قبلی به اندازه °۶۰ می‌چرخد و روتور موتور نیز از این چرخش تبعیت می‌نماید. با دنبال نمودن همین الگو می‌توان جدول نشانگر موقعیت روتور را به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده به استاتور ساخت. اگر ولتاژ تولید شده توسط واحد کنترل با هر پالس ورودی به صورت نشان داده شده در جدول (۱) تغییر نماید آنگاه موتور پله‌ای با هر پالس ورودی به اندازه °۶۰ می‌چرخد. با افزایش تعداد قطب‌های موتور می‌توان جابه‌جایی موتور پله‌ای را بهبود بخشید. رابطه زوایای مکانیکی و الکتریکی عبارت است از:

$$\theta_m = \frac{2}{P}\theta_e \qquad (۱۸)$$

از آنجا که هر پله در جدول (۱) متناظر با °۶۰ الکتریکی است با افزایش تعداد قطب‌ها جابه‌جایی مکانیکی در هر پله کاهش می‌یابد.



(a)



(b)

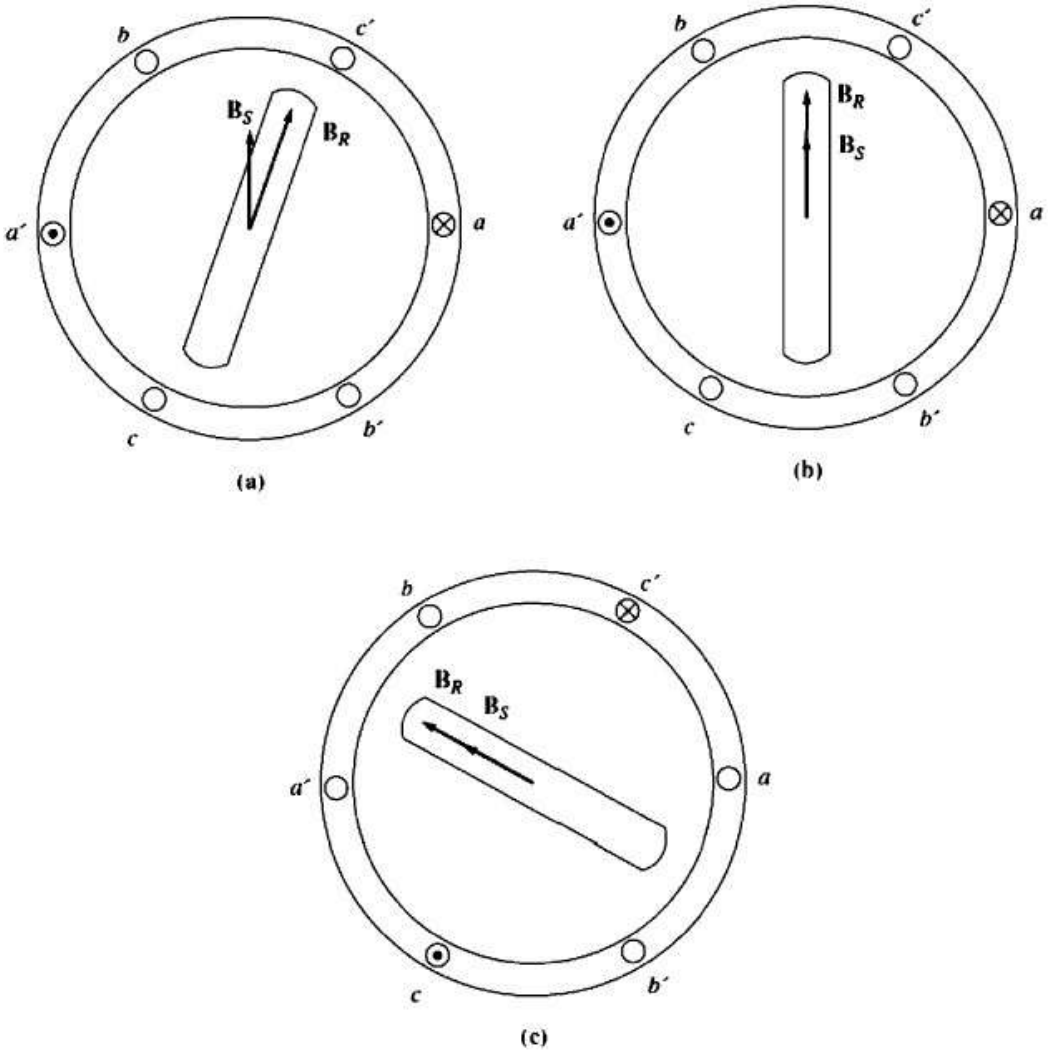
Pulse number	Phase voltages, V		
	v_a	v_b	v_c
1	V_{DC}	0	0
2	0	0	$-V_{DC}$
3	0	V_{DC}	0
4	$-V_{DC}$	0	0
5	0	0	V_{DC}
6	0	$-V_{DC}$	0

(c)

شکل ۳۸. (a) یک موتور پله‌ای ساده و واحد کنترل آن (ورودی‌های واحد کنترل شامل یک منبع تغذیه DC و یک سیگنال کنترل با قطار پالس است) (b) نمایی از ولتاژ خروجی واحد کنترل (پالس کنترلی ورودی است) (c) جدول نشان دهنده ولتاژ خروجی واحد کنترل به صورت تابعی از شماره پالس

به عنوان نمونه، اگر موتور پله‌ای هشت قطب داشته باشد آنگاه زاویه مکانیکی محور موتور در هر گام ۱۵° تغییر خواهد نمود. با استفاده از رابطه (۱۸) می‌توان سرعت یک موتور پله‌ای را به تعداد پالس‌های تولید شده در واحد زمان توسط واحد کنترل مرتبط نمود. این رابطه زاویه مکانیکی موتور پله‌ای را به صورت تابعی از زاویه الکتریکی بیان می‌نماید. اگر از دو طرف این رابطه بر حسب زمان مشتق گرفته شود رابطه بین سرعت‌های زاویه‌ای مکانیکی و الکتریکی به دست می‌آید:

$$\omega_m = \frac{2}{P}\omega_e \rightarrow n_m = \frac{2}{P}n_e \qquad (۱۹)$$



شکل ۳۹. عملکرد یک موتور پله‌ای (a) ولتاژ V به فاز a استاتور اعمال می‌شود و موجب برقراری جریان در این فاز می‌گردد که این جریان به نوبه خود میدان مغناطیسی B_s را به وجود می‌آورد (تعامل B_r و B_s گشتاور پادساعتگردی روی روتور به وجود می‌آورد) (b) هنگامی که روتور با میدان مغناطیسی استاتور همراستا می‌شود گشتاور خالص صفر می‌گردد (c) ولتاژ V- به فاز c استاتور اعمال می‌شود و موجب برقراری جریان در این فاز می‌گردد که این جریان به نوبه خود میدان مغناطیسی B_s را به وجود می‌آورد (تعامل B_r و B_s گشتاور پادساعتگردی روی روتور به وجود می‌آورد و باعث می‌شود تا روتور خود را با موقعیت جدید میدان مغناطیسی استاتور تطبیق دهد)

جدول (۱). موقعیت روتور به صورت تابعی از ولتاژ در یک موتور پله‌ای دو قطب

شماره پالس ورودی	ولتاژ فاز a	ولتاژ فاز b	ولتاژ فاز c	موقعیت روتور
۱	V	0	0	0°
۲	0	0	-V	60°
۳	0	V	0	120°
۴	-V	0	0	180°
۵	0	0	V	240°
۶	0	-V	0	300°

از آنجا که شش پالس ورودی در هر دور چرخش الکتریکی وجود دارد رابطه بین سرعت موتور برحسب rpm و تعداد پالس‌ها در دقیقه عبارت است از:

$$n_m = \frac{1}{3P} n_{pulse} \quad (۲۰)$$

دو نوع موتور پله‌ای وجود دارد که تنها در ساختار روتور متفاوتند: نوع مغناطیس دائم و نوع رلوکتانسی. نوع مغناطیس دائم همان‌طور که از نام آن مشخص است دارای روتور مغناطیس دائم می‌باشد. اما نوع رلوکتانسی دارای روتور فرومغناطیس است که آهن‌ربا نیست (روتور موتور رلوکتانسی که پیشتر معرفی گردید از این نوع است). به طور کلّی، موتور پله‌ای مغناطیس دائم قادر است گشتاور بیشتری نسبت به نوع رلوکتانسی تولید نماید زیرا گشتاور آن هم از میدان مغناطیسی دائمی روتور تشکیل می‌گردد و هم از اثرات رلوکتانسی. موتورهای پله‌ای نوع رلوکتانسی اغلب با استاتور چهار فاز به جای سه فاز ساخته می‌شوند. سیم‌پیچی چهار فاز استاتور پله‌های بین پالس‌ها را از ۶۰° الکتریکی به ۴۵° الکتریکی کاهش می‌دهد. همان‌طور که پیشتر تشریح گردید گشتاور موتور رلوکتانسی تابعی از $\sin(2\delta)$ است. بنابراین، گشتاور رلوکتانسی بین پله‌ها برای زاویه ۴۵° حداکثر است. در نتیجه، یک موتور پله‌ای رلوکتانسی با چهار فاز گشتاور بیشتری نسبت به موتور مشابه سه فاز تولید خواهد نمود. معادله (۲۰) را می‌توان به نحوی اصلاح نمود که به تمام موتورهای پله‌ای صرف‌نظر از تعداد فازهای استاتور آنها قابل اعمال باشد. به طور کلّی، اگر استاتور N فاز باشد در هر دور الکتریکی موتور به 2N پالس نیاز است. بنابراین، رابطه بین سرعت موتور برحسب rpm و تعداد پالس‌ها در دقیقه عبارت است از:

$$n_m = \frac{1}{NP} n_{pulse} \quad (۲۱)$$

موتورهای پله‌ای در کنترل و سیستم‌های موقعیت‌یابی بسیار مفید هستند زیرا رایانه‌ای که عملیات کنترل را انجام می‌دهد می‌تواند سرعت دقیق و موقعیت دقیق موتور پله‌ای را بدون نیاز به اطلاعات فیدبک از محور موتور بداند. به عنوان نمونه، اگر سیستم کنترلی ۱۲۰۰ پالس در دقیقه به موتور پله‌ای دو قطب شکل (۳۸) ارسال نماید سرعت دقیق موتور ۲۰۰rpm خواهد بود. علاوه بر این، اگر موقعیت اولیه محور معلوم باشد آنگاه رایانه می‌تواند زاویه دقیق محور روتور را در هر زمانی در آینده به سادگی با شمارش کل تعداد پالس‌های ارسال شده به واحد کنترل موتور پله‌ای تعیین نماید.

مثال: یک موتور پله‌ای سه فاز مغناطیس دائم که برای کاربردی خاص مورد نیاز است باید قادر به کنترل موقعیت محوری در گام‌های ۷/۵° باشد. همچنین، این موتور باید قادر به تأمین سرعت تا ۳۰۰rpm نیز باشد. الف) این موتور باید چند قطب داشته باشد؟ ب) نرخ صدور پالس کنترلی آن در سرعت ۳۰۰rpm چقدر است؟

حل: در یک موتور پله‌ای سه فاز هر پالس موقعیت روتور را ۶۰° الکتریکی جلو می‌برد که باید متناظر با ۷/۵° مکانیکی باشد. بنابراین:

الف) $$\theta_m = \frac{2}{P}\theta_e \rightarrow P = \frac{2\theta_e}{\theta_m} = \frac{120}{7.5} = 16$$

ب) $$n_m = \frac{1}{NP} n_{pulse} \rightarrow n_{pulse} = NPn_m = 3 \times 16 \times 300 = 14400\, {}^{pulse}/_{min} = 240\, {}^{pulse}/_{sec}$$

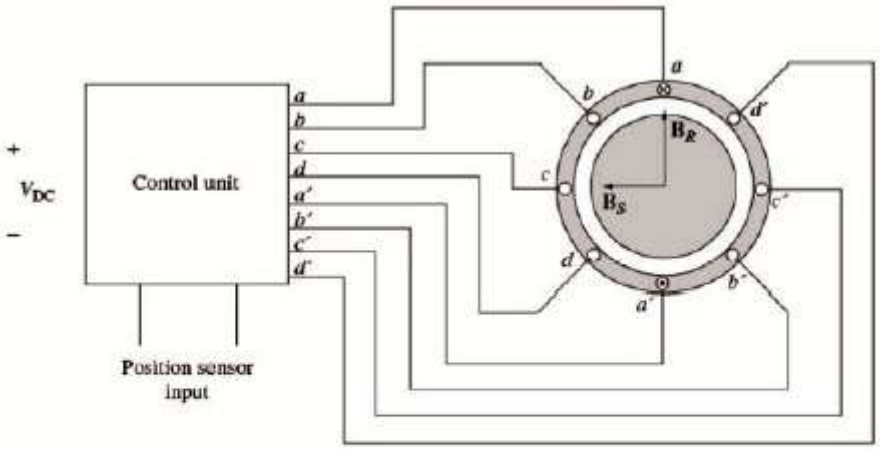
موتور DC بدون جاروبک:

موتورهای DC معمولی در کاربردهایی که منابع تغذیه DC در دسترس باشند مانند هواپیماها و خودروها استفاده می‌شوند. اما

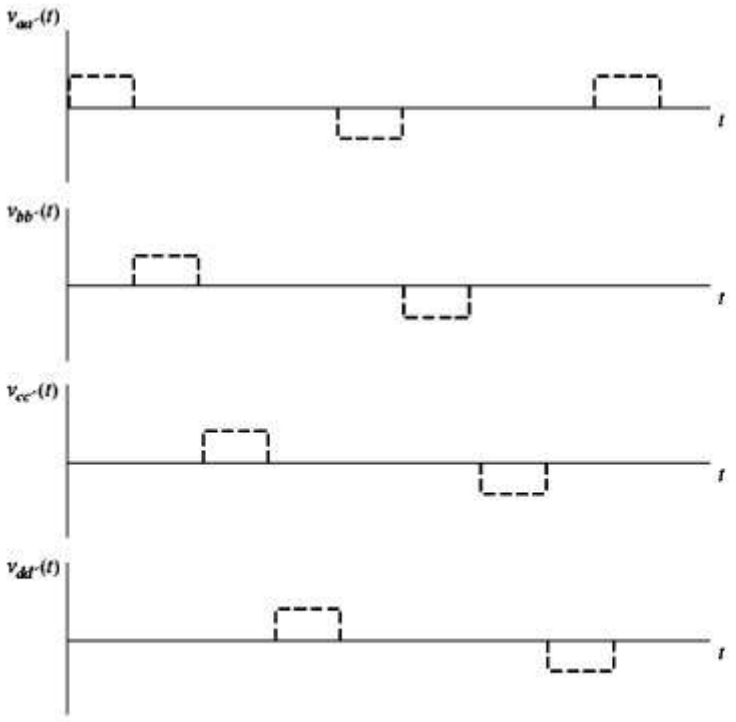
موتورهای DC کوچک از این نوع نقاط ضعف مهمی دارند. بزرگترین این نقاط ضعف تولید جرقه و فرسایش جاروبک‌ها است. موتورهای DC کوچک و سریع کوچکتر از آن هستند که بتوانند از سیم‌پیچ‌های جبرانساز و قطب‌های درونی استفاده کنند و بنابراین عکس‌العمل آرمیچر و اثر Ldi/dt تمایل به تولید جرقه روی جاروبک‌های کموتاتور آنها دارد. علاوه بر این، سرعت چرخش بالای این موتورها استهلاک جاروبک‌ها را افزایش داده و آنها را در هر چند هزار ساعت کار نیازمند نگهداری دوره‌ای می‌نماید. اگر نیاز به استفاده از این موتورها در محیطی با فشار پایین (مانند هواپیما در ارتفاع بالا) باشد فرسودگی جاروبک به حدی بالا می‌رود که ممکن است پس از کمتر از یک ساعت کار نیاز به تعویض داشته باشد. در برخی کاربردها نگهداری دوره‌ای مورد نیاز برای جاروبک‌های این گروه از موتورهای DC می‌تواند غیرقابل قبول باشد. به عنوان نمونه، در موتور DC درون یک قلب مصنوعی نگهداری دوره‌ای نیازمند عمل جراحی بیمار خواهد بود. در برخی کاربردها نیز تولید جرقه در جاروبک‌ها می‌تواند موجب بروز خطر انفجار و یا تولید نویز غیرقابل قبول گردد. برای تمام این حالات نیازمند موتورهای DC هستیم که کوچک، سریع، قابل اطمینان با صدای کم و دارای عمر طولانی باشند. چنین موتورهایی در ۳۰ سال گذشته از ترکیب یک موتور کوچک مانند موتور پله‌ای مغناطیس دائم با یک حسگر موقعیت روتور و یک مدار کلیدزنی الکترونیکی توسعه یافته‌اند. به این موتورها، موتورهای DC بدون جاروبک گفته می‌شود زیرا با یک منبع DC تغذیه می‌شوند اما کموتاتور و جاروبک ندارند. شکل (۴۰) طرحی از این نوع موتورها ارائه می‌دهد. در اینجا ساختار روتور مشابه روتور در موتور پله‌ای مغناطیس دائم است با این تفاوت که روتور استوانه‌ای می‌باشد. استاتور می‌تواند سه فاز یا بیشتر داشته باشد (در شکل (۴۰) تعداد فازهای استاتور چهار عدد است). اجزاء اساسی یک موتور DC بدون جاروبک عبارتند از:

- یک روتور مغناطیس دائم؛
- یک استاتور با سه، چهار و یا تعداد بیشتری فاز؛
- یک حسگر موقعیت روتور؛
- یک مدار الکترونیکی برای کنترل فازهای سیم‌پیچ روتور.

یک موتور DC بدون جاروبک توسط برقدار نمودن یک سیم‌پیچ استاتور در هر لحظه با یک ولتاژ DC ثابت عمل می‌نماید. هنگامی که یک سیم‌پیچ روشن می‌شود میدان مغناطیسی B_s تولید نموده و گشتاوری روی روتور ایجاد می‌نماید که از رابطه (۲) تبعیت می‌کند. این گشتاور تمایل دارد روتور را در راستای میدان مغناطیسی استاتور قرار دهد. در لحظه نشان داده شده در قسمت (a) از شکل (۴۰) جهت میدان مغناطیسی B_s استاتور به سمت چپ است در حالی که جهت میدان مغناطیسی B_r روتور مغناطیس دائم به سمت بالاست. بنابراین، گشتاوری پادساعتگرد روی روتور تولید شده و روتور به سمت چپ می‌چرخد. اگر سیم‌پیچ a تمام مدت برقدار بماند روتور می‌چرخد تا دو میدان مغناطیسی در راستای هم قرار بگیرند و سپس مانند موتور پله‌ای متوقف خواهد شد. نکته کلیدی در عملکرد موتور DC بدون جاروبک وجود حسگر موقعیت روتور در آن است که با استفاده از آن مدار کنترل خواهد دانست چه زمانی روتور تقریباً با میدان مغناطیسی استاتور همراستا گردیده است. در این زمان سیم‌پیچ a خاموش شده و سیم‌پیچ b روشن می‌شود که متعاقب آن روتور مجدداً گشتاوری پادساعتگرد را تجربه خواهد نمود و به چرخش خود ادامه خواهد داد.



(a)



(b)

شکل ۴۰. (a) یک موتور DC بدون جاروبک ساده و واحد کنترل آن (ورودی‌های واحد کنترل شامل یک منبع تغذیه DC و یک سیگنال متناسب با موقعیت کنونی است) (b) ولتاژهای اعمال شده به سیم‌پیچ‌های استاتور

این فرآیند به صورت نامتناهی با روشن نمودن فازها به ترتیب a، b، c، d، a-، b-، c-، d- و غیره ادامه می‌یابد تا موتور به طور پیوسته بچرخد. با استفاده از الکترونیک مدار کنترلی می‌توان سرعت و جهت چرخش موتور را کنترل نمود. تأثیر خالص این طراحی موتوری است که با منبع DC کار می‌کند و کنترلی کامل روی سرعت و جهت چرخش آن وجود دارد. موتورهای DC بدون جاروبک بیشتر در اندازه‌های کوچک تا ۲۰W کاربرد دارند. اما در همین ابعاد کوچک نیز مزایای فراوانی به همراه دارند که مهمترین آنها عبارتند از:

- راندمان نسبتاً بالا؛

- قابلیت اطمینان بالا و عمر طولانی؛
- بدون نیاز به نگهداری یا نیازمند نگهداری کم؛
- نویز بسیار پایین در مقایسه با موتور DC با جاروبک؛
- سرعت بسیار بالا (بیش از ۵۰۰۰۰rpm).

تنها نقطه ضعف موتورهای DC بدون جاروبک قیمت بالای آنها در مقایسه با موتورهای DC دارای جاروبک است.