مقدمه:

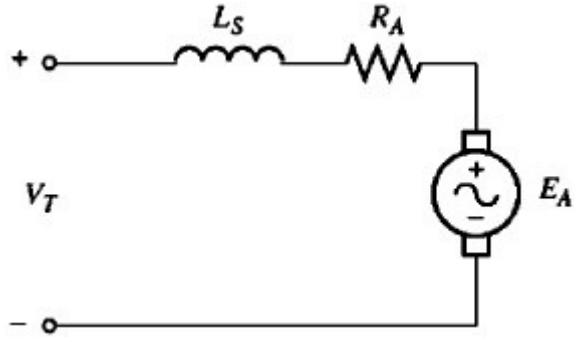
ماشین‌های الکتریکی سه فاز با اختلاف نسبت به سایر انواع متداول‌ترین ماشین‌ها در کاربردهای تجاری و صنعتی بزرگ به شمار می‌روند. با این وجود بیشتر صنایع کوچک و خانه‌ها از برق سه فاز محرومند. در این مکان‌ها تمام موتورها باید با استفاده از برق تکفاز کار کنند. در این بخش به تئوری عملکرد دو نوع اصلی از موتورهای 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 اِعمال 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

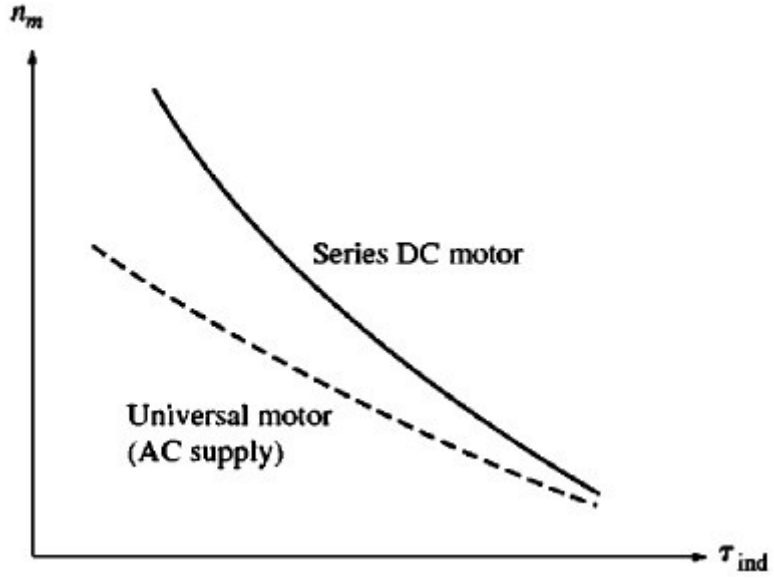
برای اینکه یک موتور DC سری پس از اتصال به منبع تغذیه AC به صورت کارآمدی عمل کند لازم است تا قطب‌های میدان و قاب استاتور کاملاً ورقه‌ای شده باشند. در غیر این صورت، تلفات هسته بسیار شدید خواهد بود. اگر قطب‌ها و استاتور به صورت ورقه‌ای باشند به چنین موتوری موتور یونیورسال گفته می‌شود زیرا می‌تواند هم با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



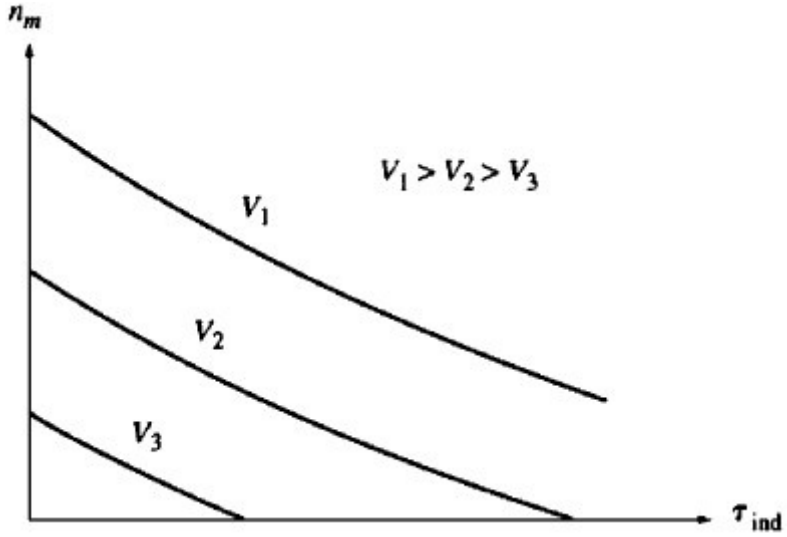
شکل ۲. مقایسه مشخصه‌های گشتاور–سرعت موتور یونیورسال هنگام تغذیه با منابع AC و DC

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.

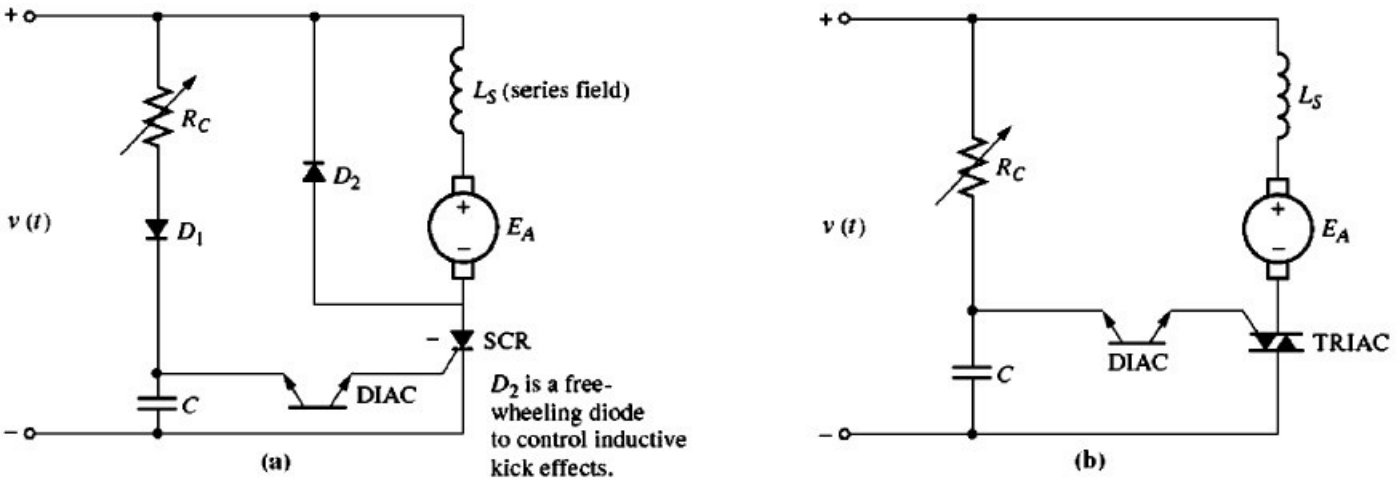
کنترل سرعت موتورهای یونیورسال:

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

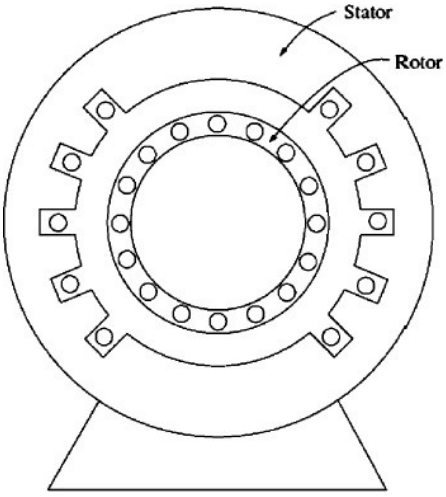
در عمل متوسط ولتاژ اعمال شده به موتور توسط یکی از مدارهای SCR یا TRIAC تغییر داده می‌شود. دو عدد از چنین مدارهای کنترل سرعتی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. مقاومت متغیر نشان داده شده در این شکل‌ها پیچ‌های دستی تنظیم سرعت موتور هستند (به عنوان نمونه، چنین مقاومتی ماشه یک مته با سرعت متغیر است).



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.

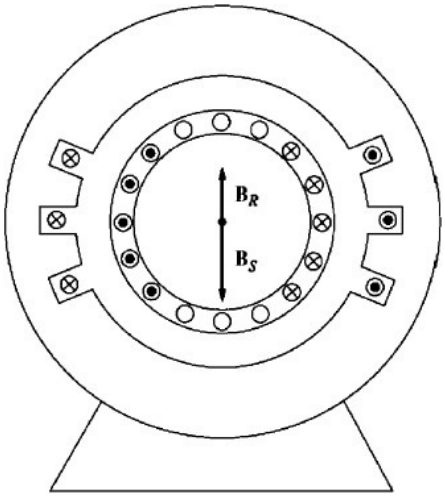


شکل ۵. ساختار یک موتور القایی تکفاز (روتور آن با روتور موتور القایی سه فاز یکسان است اما استاتور تنها یک فاز توزیع شده دارد)

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).



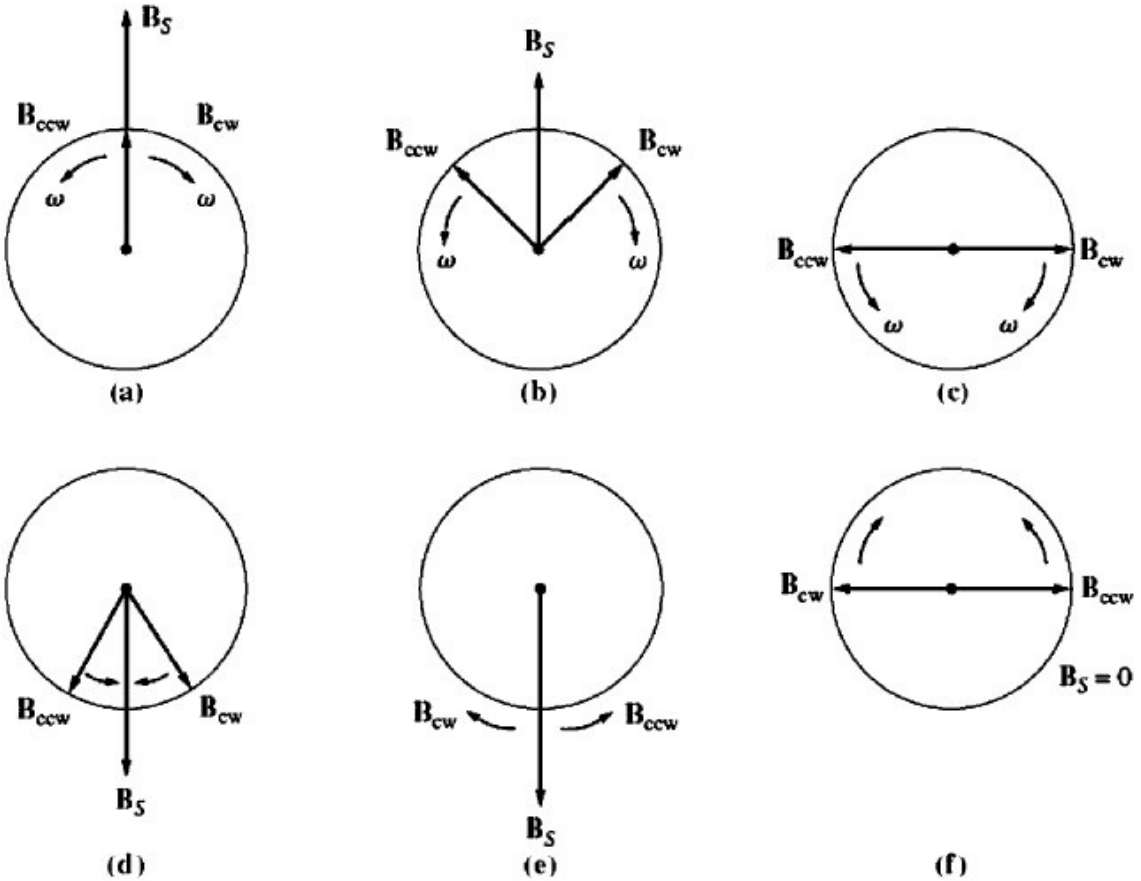
شکل ۶. موتور القایی تکفاز در شرایط سکون (سیم‌پیچ استاتور ولتاژ و جریان مخالف در روتور القاء می‌نماید که باعث همراستا شدن میدان مغناطیسی روتور با میدان مغناطیسی استاتور و صفر شدن گشتاور القایی می‌گردد)

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:

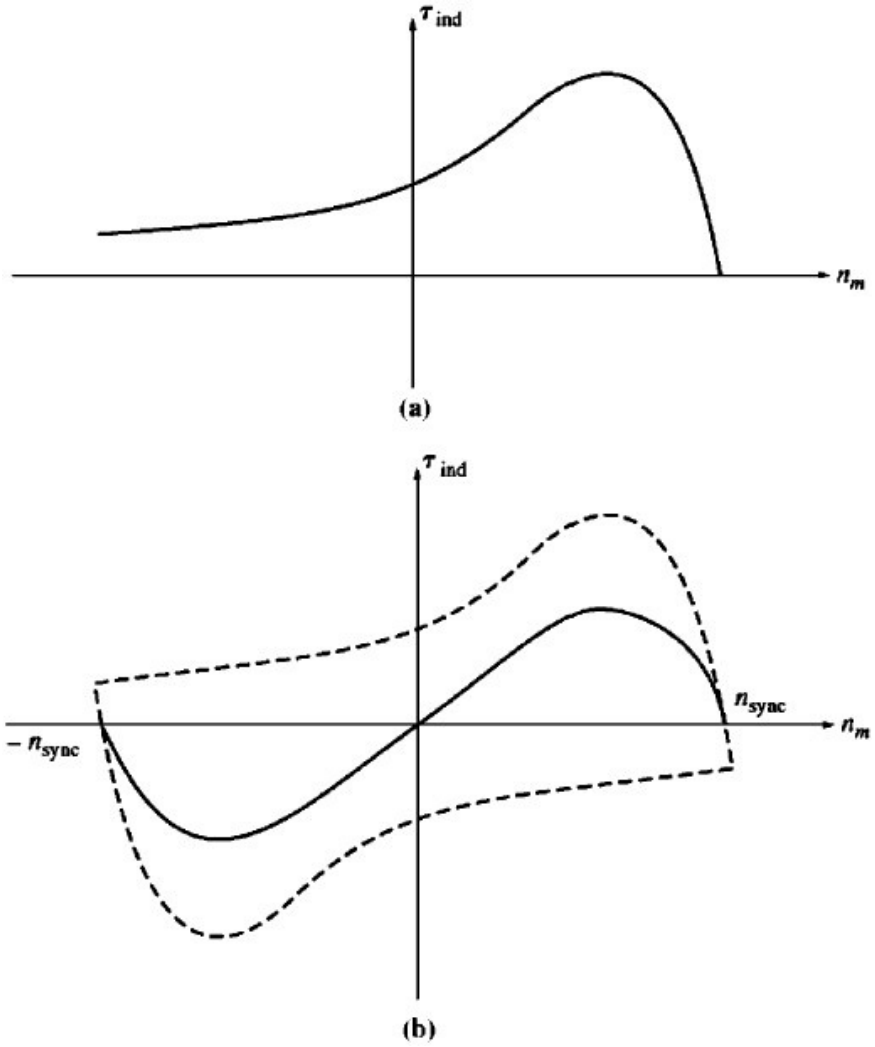
$$B_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos(\omega t)\right)\hat{\imath} - \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin(\omega t)\right)\hat{\jmath} \quad (۴)$$

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

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.

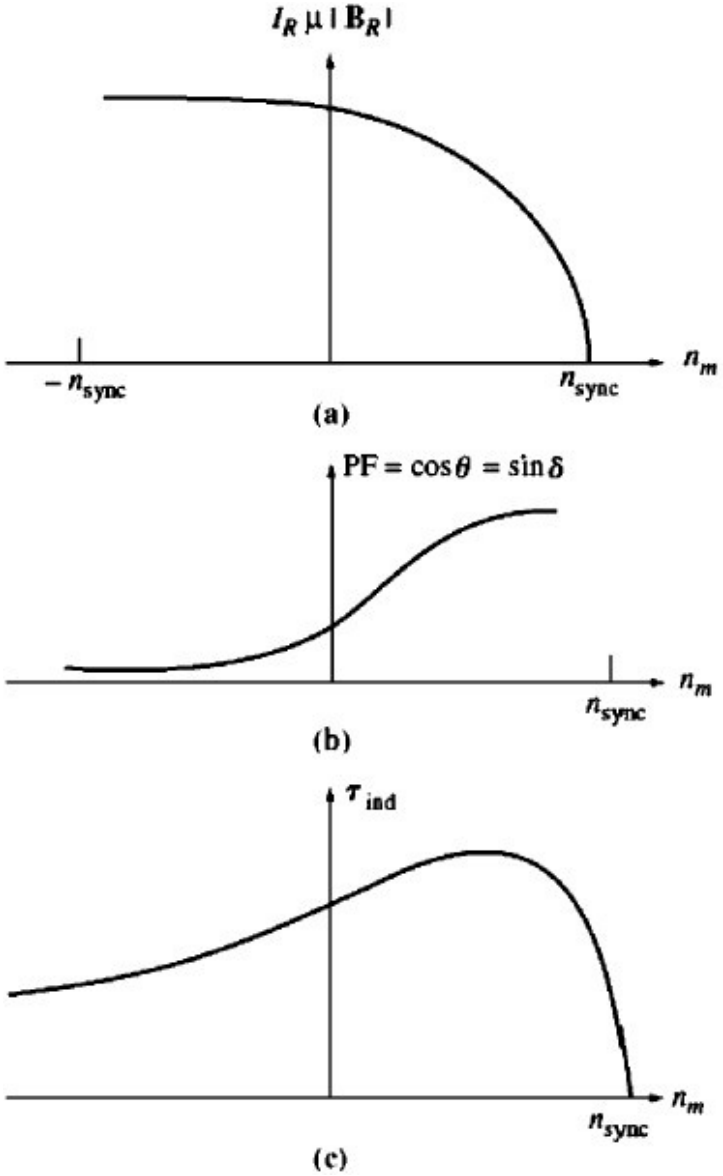


شکل ۸ مشخصه گشتاور–سرعت (a) موتور القایی سه فاز (b) ناشی از دو میدان مغناطیسی دوار با دامنه برابر اما جهت برعکس

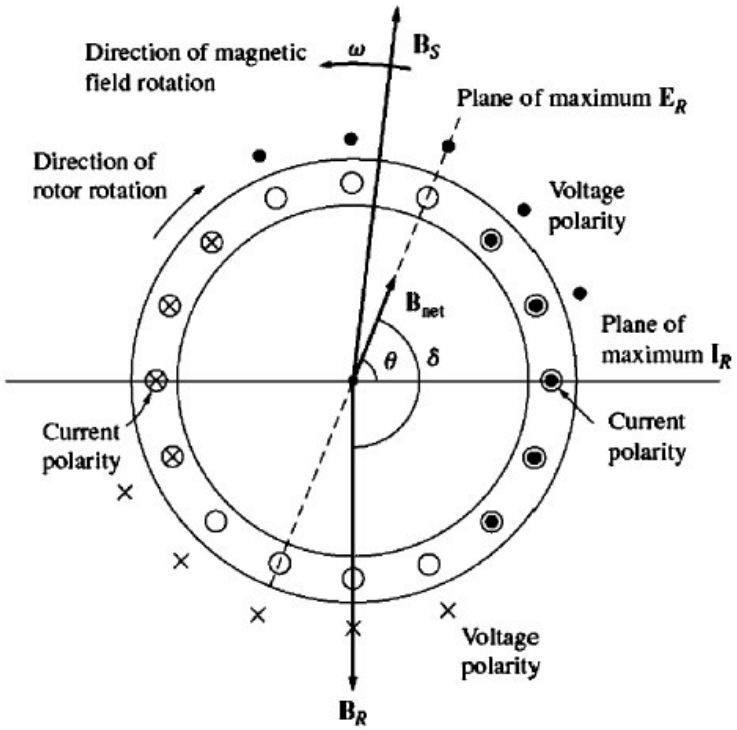
مشخصه گشتاور – سرعت نشان داده شده در قسمت (b) از شکل (۸) توصیف دقیقی از گشتاور موتور القایی تکفاز نیست. زیرا این

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)).

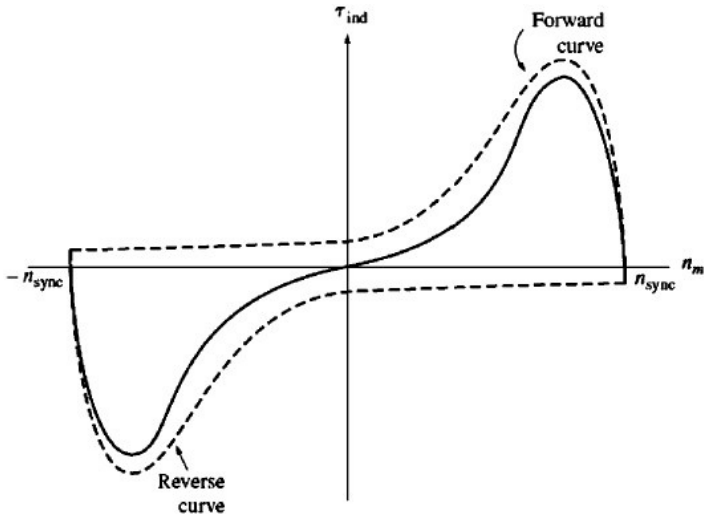


شکل ۹. مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی سه فاز هم به شدت میدان مغناطیسی روتور وابسته است و هم سینوس زاویه بین میدان‌ها (هنگامی که روتور در جهت معکوس چرخانده شود I_R و I_S هر دو بسیار بزرگ خواهند بود اما زاویه بین دو میدان نیز بزرگ است و این زاویه گشتاور موتور را محدود می‌نماید)



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.

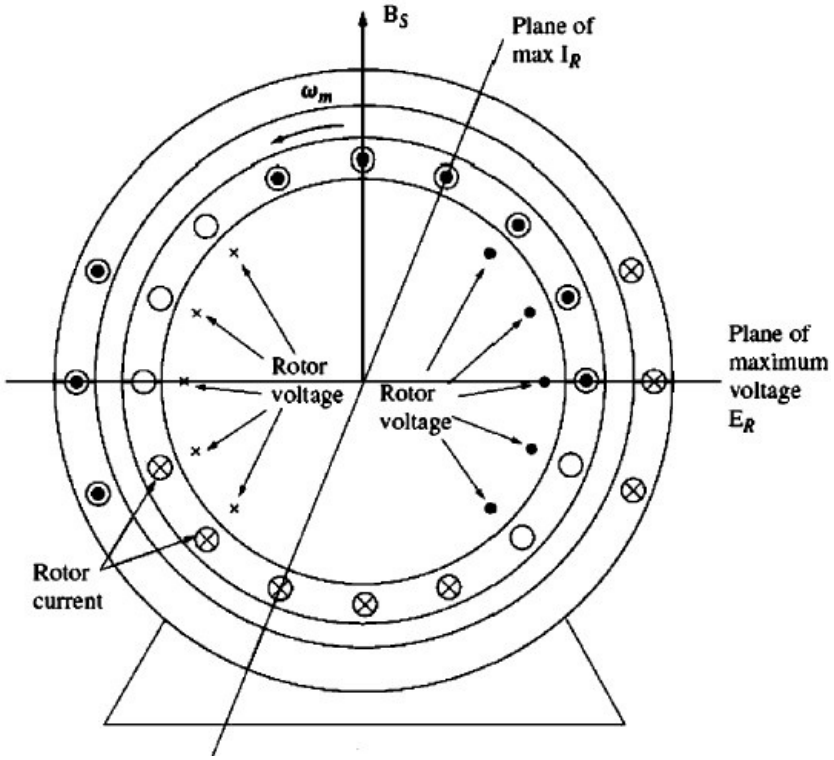


شکل ۱۱. مشخصه گشتاور–سرعت موتور القایی تکفاز با در نظر گرفتن محدودیت جریان روی میدان مغناطیسی عقبگرد ناشی از حضور میدان مغناطیسی جلوگرد

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.

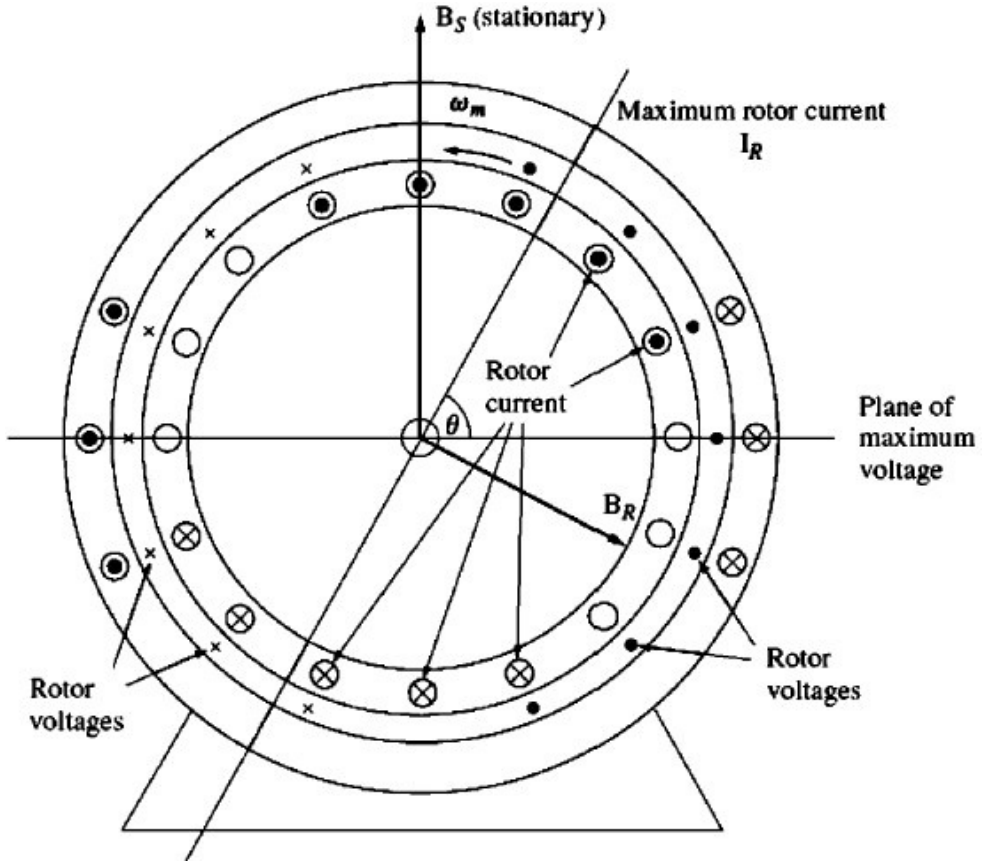
تئوری میدان متقاطع در موتورهای القایی تکفاز:

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.



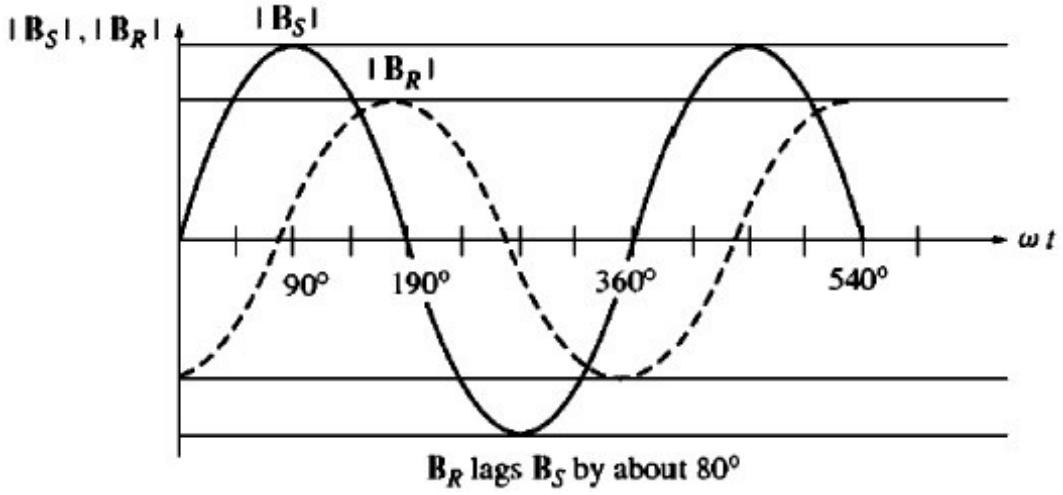
شکل ۱۲. توضیح چگونگی تولید گشتاور در ماشین القایی تکفاز توسط تئوری میدان متقاطع (اگر میدان استاتور ضربانی باشد ولتاژ القایی در میله‌های روتور توسط علائم نشان داده شده در شکل خواهد بود اما جریان روتور به اندازه تقریبی ۹۰° عقب‌تر از ولتاژ روتور است و اگر روتور در حال چرخش باشد پیک جریان روتور در زاویه‌ای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

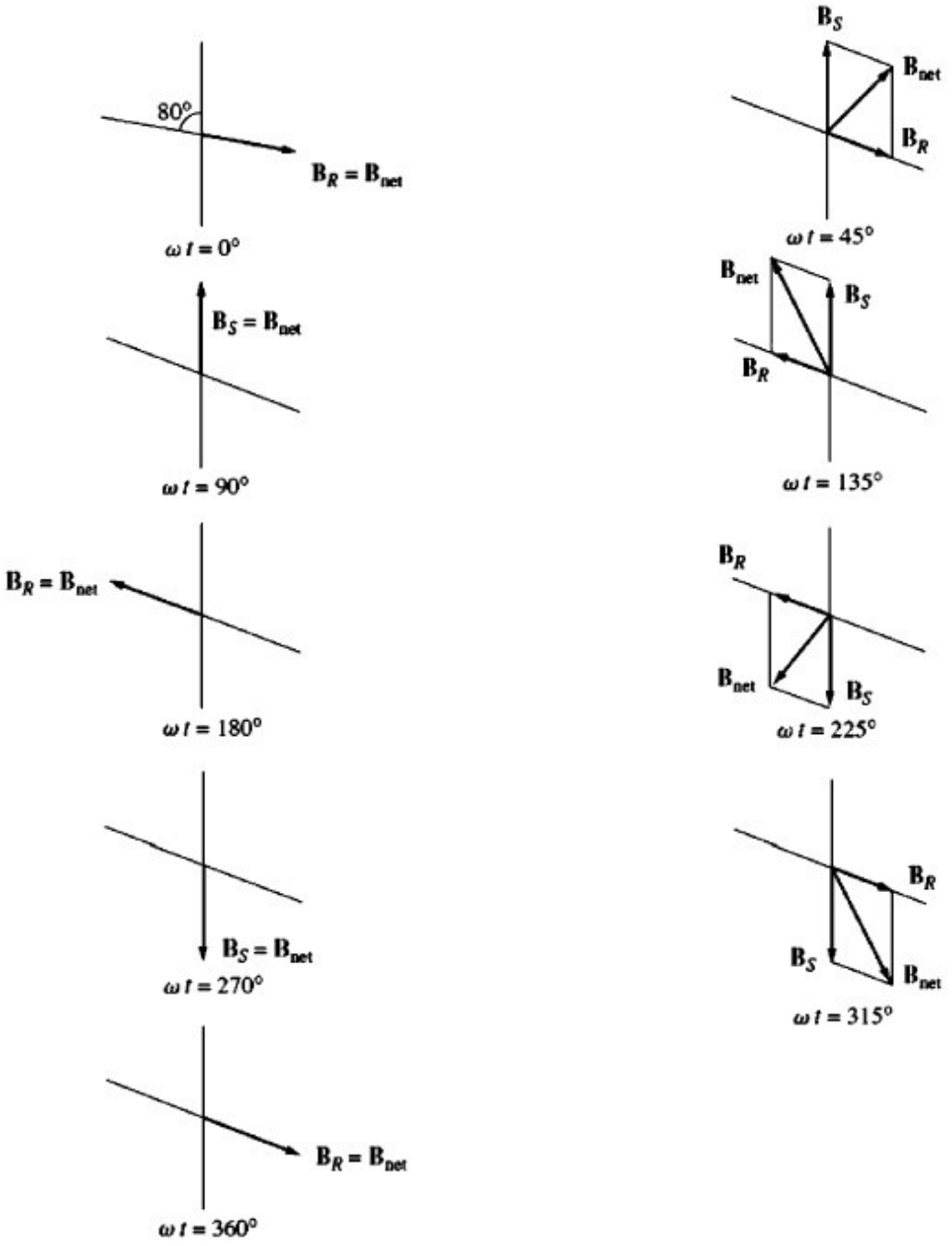


شکل ۱۳. جریان روتور (به دلیل تأخیر نسبت به ولتاژ) میدان مغناطیسی روتور را در زاویه‌ای متفاوت از میدان مغناطیسی استاتور تولید می‌نماید

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:

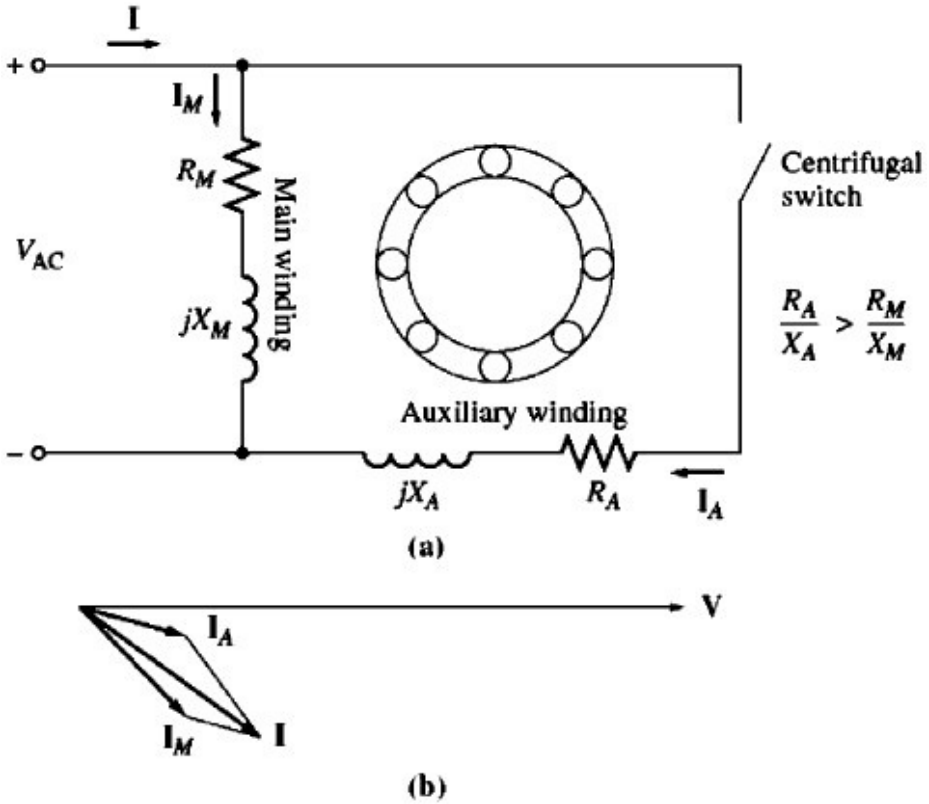
- سیم‌پیچی فاز شکسته
- سیم‌پیچی خازنی

- 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:

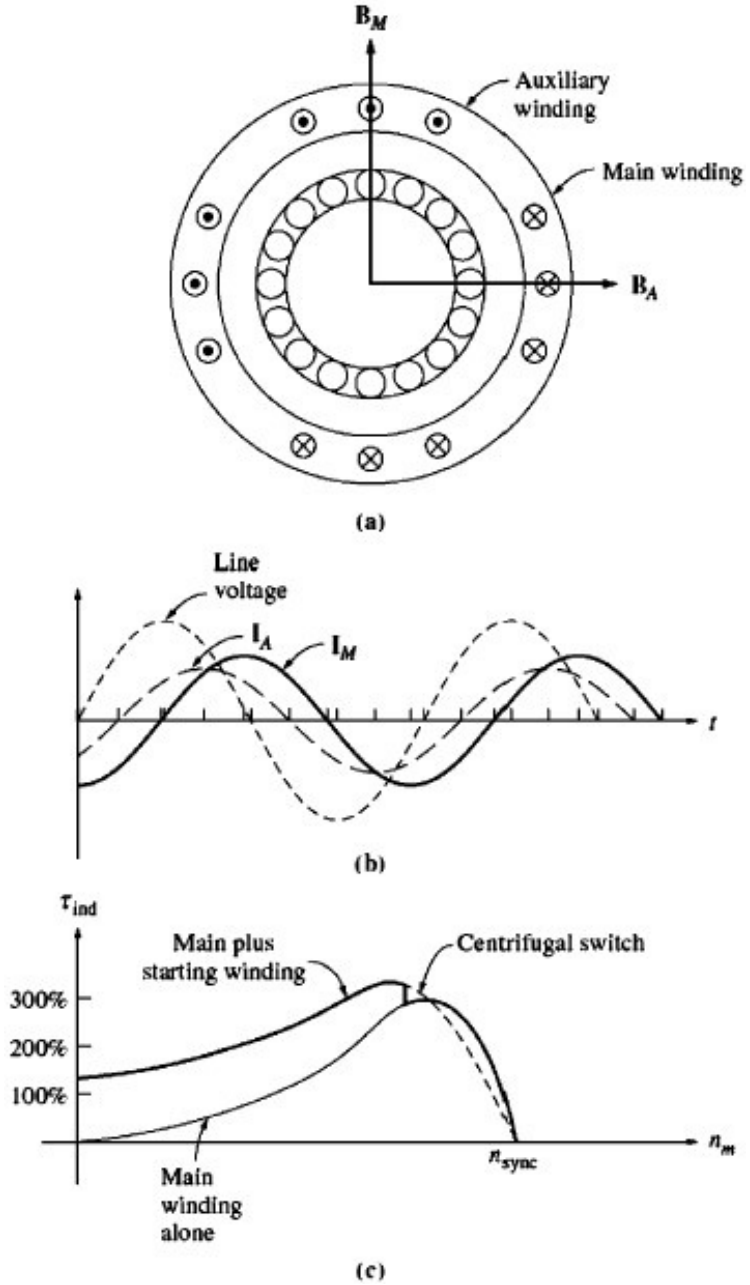
یک موتور فاز شکسته موتور القایی تکفازی است که دو سیم‌پیچ استاتور دارد: یکی سیم‌پیچ اصلی استاتور (M) و دیگری سیم‌پیچ راه‌انداز کمکی (A). شکل (۱۶) موقعیت این دو سیم‌پیچ را روی استاتور نشان می‌دهد که نسبت به هم ۹۰° اختلاف فاز الکتریکی دارند. سیم‌پیچ کمکی به نحوی طراحی شده است که در سرعتی مشخص توسط یک کلید 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

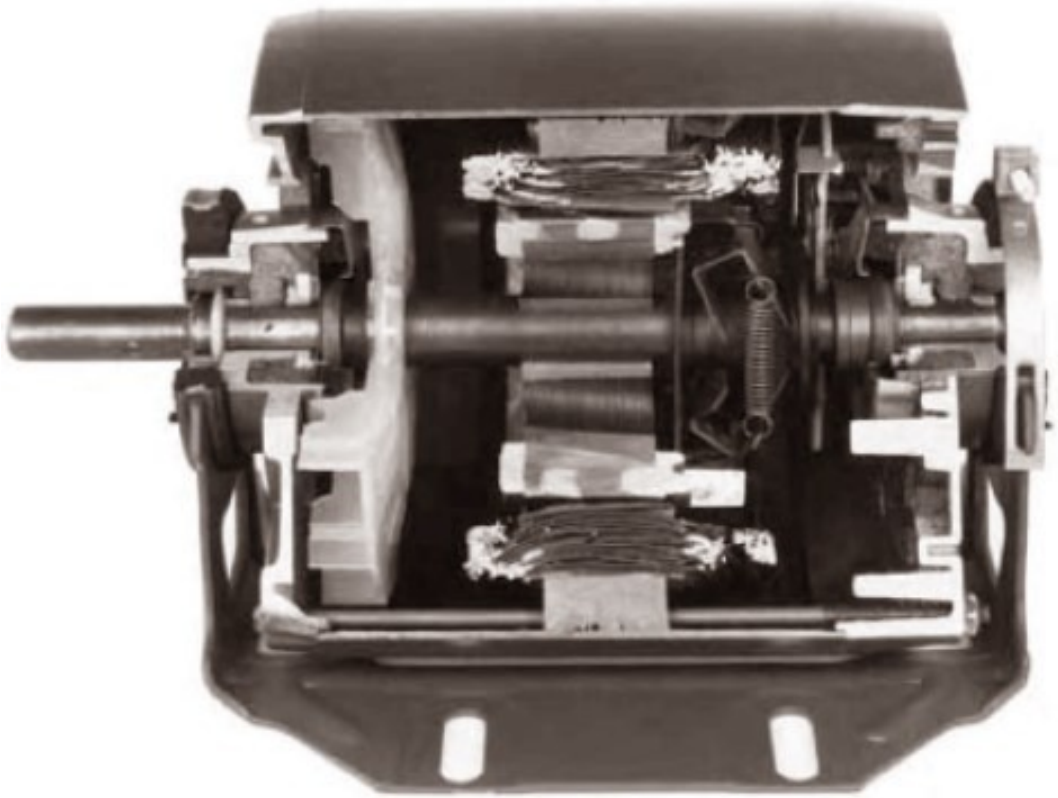
موتور را نشان می‌دهد.



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.



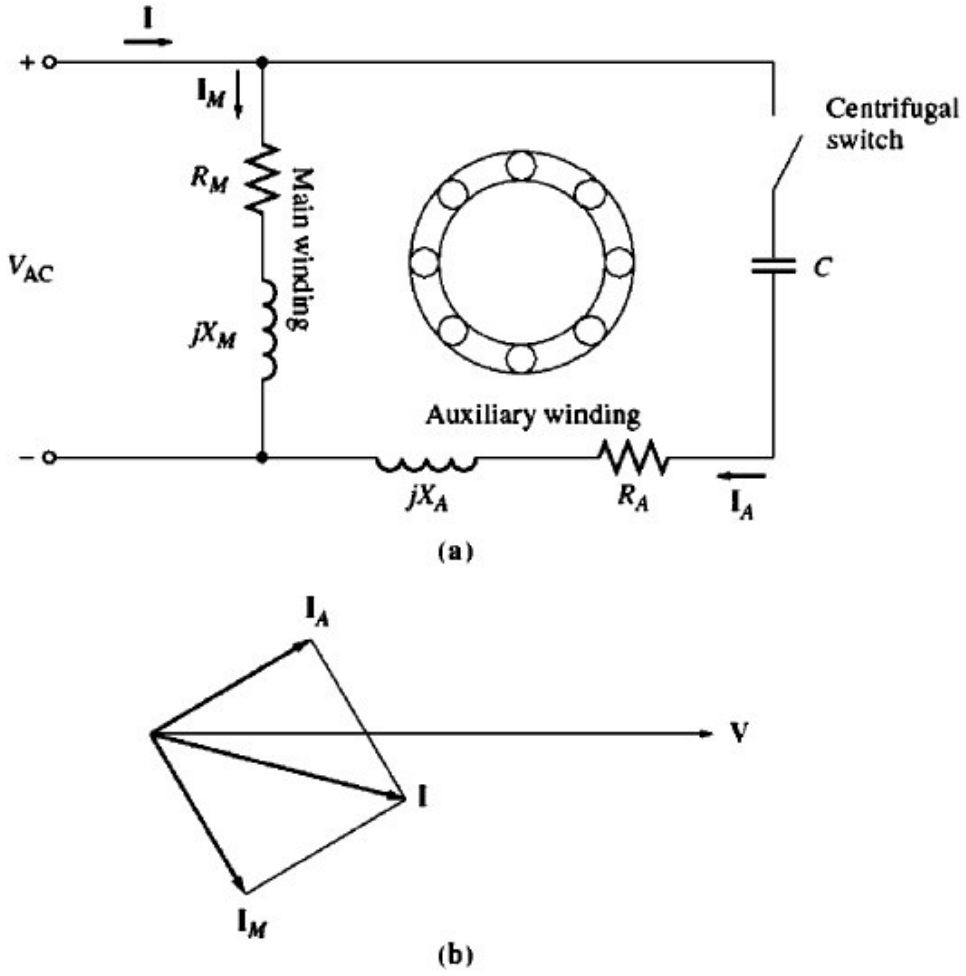
شکل ۱۸. برش مقطعی از یک موتور فاز شکسته

موتورهای با راه‌انداز خازنی:

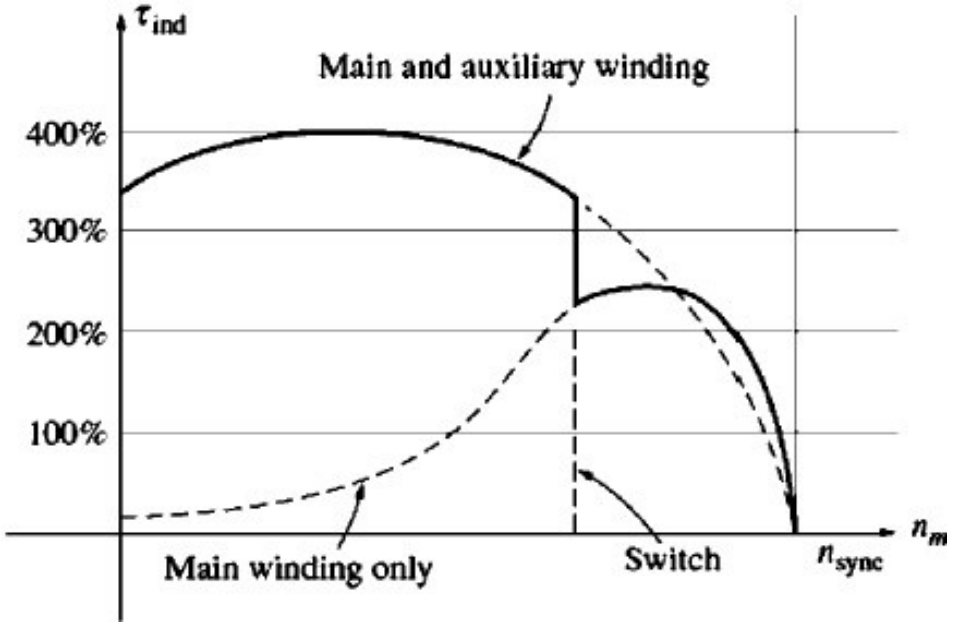
در برخی کاربردها ممکن است گشتاور راه‌اندازی تأمین شده توسط یک موتور فاز شکسته برای شروع چرخش بار روی محور موتور کافی نباشد. در این حالات می‌توان از موتورهای با راه‌انداز خازنی استفاده نمود (شکل (۱۹)). در این نوع موتورها یک خازن به صورت سری در مدار سیم‌پیچ کمکی قرار می‌گیرد. با انتخاب مناسب اندازه این 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

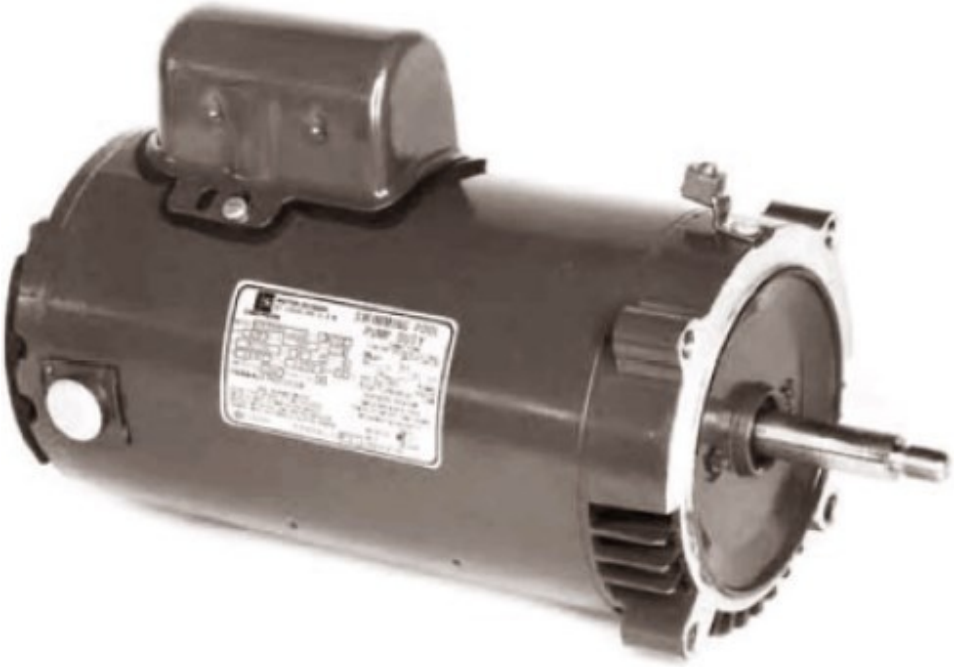
زیر بار شروع به کار نمایند. شکل (۲۱) نمونه‌ای از این موتورها را نشان می‌دهد.



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



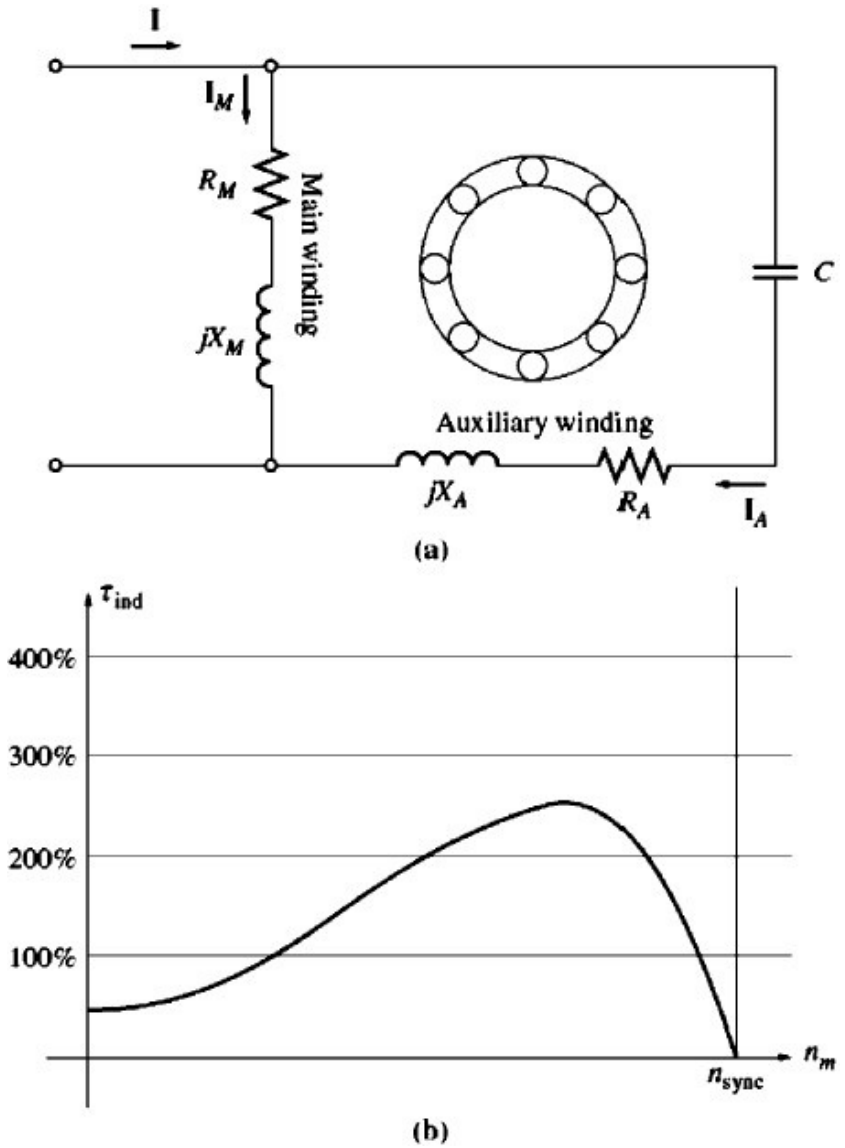
شکل ۲۱. یک موتور القایی با راه‌انداز خازنی

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.



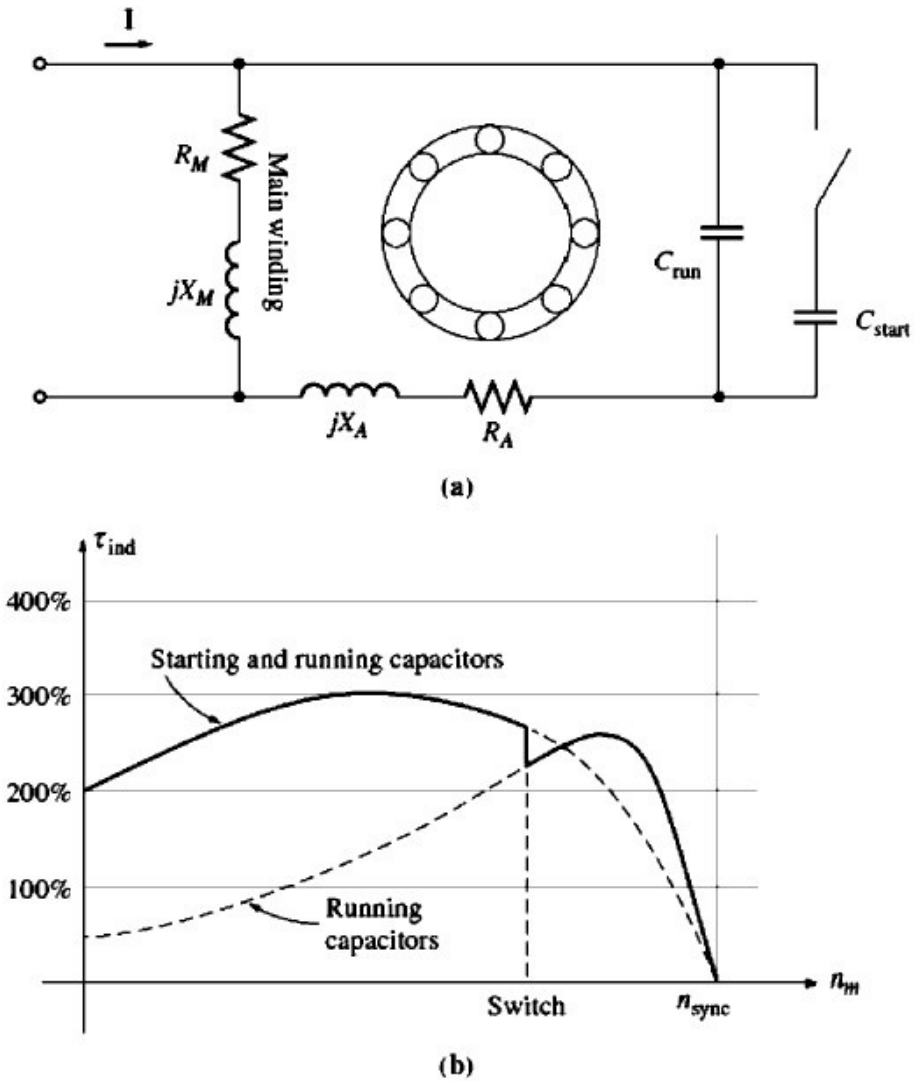
شکل ۲۲. (a) موتور القایی با خازن دائم (b) مشخصه گشتاور–سرعت این موتور

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؛