

موتورهای القائی تک‌فاز

۱.۳ مقدمه

موتورهای الکتریکی از جمله مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در بخش‌های صنعتی، کشاورزی، خانگی، تجاری، و عمومی بوده‌اند و بخش عمده‌ای از انرژی تولیدی را به خود اختصاص می‌دهند. در این بین، موتورهای کوچک و متوسط (۰٫۲۵ تا ۱۵۰ اسب بخار) در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد کل مصرف برق موتورهای الکتریکی را شامل می‌شوند. بازده این موتورها بسته به تعداد فاز، کلاس موتور، ساختار و موارد مصرف کاملاً متغیر و حدود ۴۰ تا ۹۰ درصد است. البته بازده‌های پایین عمده‌تاً مربوط به موتورهای تک‌فاز است که در این فصل به بررسی آن‌ها می‌پردازیم. موتورهای تک‌فاز، موتورهای کوچکی‌اند که در منازل، فروشگاه‌ها و ادارات کاربرد وسیعی دارند. کاربرد عمده موتورهای تک‌فاز در مصارف خانگی است که در وسایلی مانند لباسشویی، کولر، پنکه، سشوار مورد استفاده قرار می‌گیرند. علت کاربرد وسیع این موتورها را در مصارف خانگی می‌توان عدم دسترسی به برق سه‌فاز در منازل دانست. موتورهای تک‌فاز معمولاً در ابعاد کوچک و توان‌های کسر اسب بخار ساخته می‌شوند اگرچه گزارش‌هایی در مورد ساخت موتورهایی با توان‌های ۱۰ اسب بخار نیز ارائه شده است.

موتورهای تک فاز را می توان به چهار دسته عمده به صورت زیر تقسیم بندی کرد.

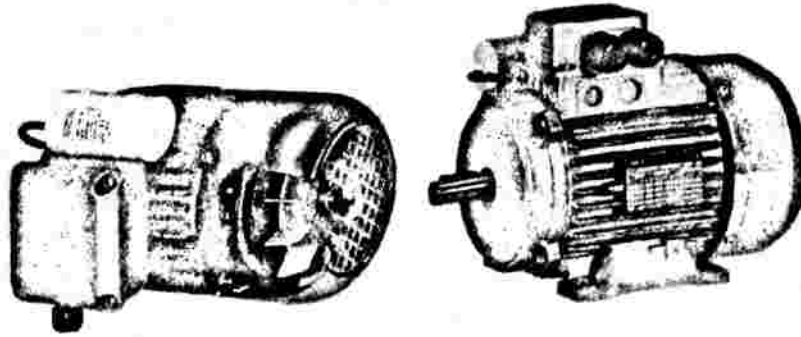
- موتورهای القائی تک فاز
- موتورهای سنکرون تک فاز
- موتورهای سری تک فاز یا موتورهای یونیورسال
- موتورهای دفعی

در موتورهای بیان شده، موتورهای سنکرون تک فاز تحت سرعت ثابت می چرخند. موتورهای سنکرون تک فاز خود شامل موتورهای رلوکتانسی، آهنربای دائم و هیستریزس می باشند. موتورهای تک فاز سری را می توان همراه با منبع تغذیه جریان مستقیم یا منبع تغذیه متناوب تک فاز مورد بهره برداری قرار داد. در این موتورها گشتاور راه اندازی بالاست و سرعت آنها در بی باری بسیار زیاد است. موتورهای ریپالسیونی نیز موتورهایی اند که عملکردشان شبیه موتورهای AC سری است با این تفاوت که جریان آرمیچر از طریق القائی تأمین می شود. موتورهای یاد شده را در فصل های بعد مورد بررسی بیشتر قرار خواهیم داد. اما اکثر موتورهای تک فاز از نوع القائی اند که گشتاور راه اندازی آنها صفر است. لذا به گشتاور راه انداز نیاز دارند و با توجه به نحوه راه اندازی آنها، به چند دسته به صورت زیر تقسیم می شوند.

- موتورهای فاز شکسته^۱
- موتورهای خازن راه انداز
- موتورهای خازن دائم
- موتورهای دوخازنی
- موتورهای قطب چاک دار^۲

همان طور که از نام موتور القائی تک فاز مشخص است، این نوع از موتورها فقط یک سیم پیچ (سیم پیچ اصلی) دارند و با یک منبع تغذیه تک فاز کار می کنند. تقریباً در اکثر موتورهای القائی تک فاز، روتور از نوع قفس سنجابی است. در این موتورها هنگامی که موتور (استاتور) به یک تغذیه تک فاز متصل است، سیم پیچ اصلی دارای جریانی متناوب می شود که این جریان متناوب میدان مغناطیسی ای ضربانی تولید می کند که در نتیجه آن ولتاژی در روتور القا می شود. به دلیل اینکه میدان مغناطیسی اصلی ضربانی است، گشتاور راه اندازی تولیدی برابر با صفر است، لذا موتور راه اندازی نمی شود. با توجه به این نکته می توان بیان نمود که موتورهای القائی تک فاز خود راه انداز نیستند و برای راه اندازی نیازمند تدابیر ویژه ای اند. اضافه کردن یک سیم پیچ کمکی در استاتور یکی از مرسوم ترین این تدابیر است.

1. split phase
2. shaded pole



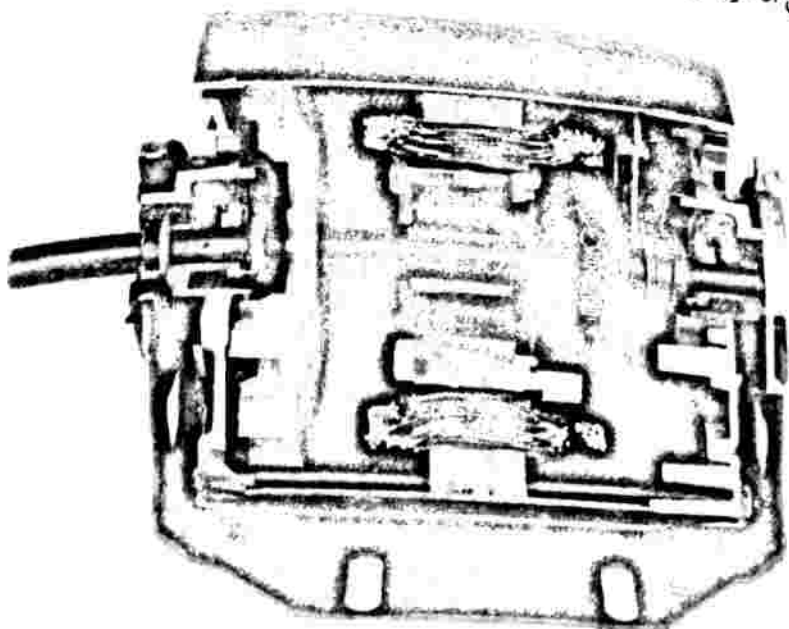
شکل ۱.۳ موتور تک فاز.

سیستم راه انداز موتورهای القائی تک فاز اساساً مبتنی بر تعبیه سیم پیچ اضافی در استاتور است. محور سیم پیچ کمکی یا راه انداز ۹۰ درجه اختلاف فاز مکانی با سیم پیچی اصلی دارد. سیم پیچی راه انداز می تواند همراه خازن های سری و یا کلید گریز از مرکز باشد. هنگامی که موتور بعد از راه اندازی به حدود ۷۵ درصد دور نامی خود می رسد، کلید گریز از مرکز سیم پیچ راه انداز را از مدار خارج می کند. از این لحظه به بعد موتور تک فاز می تواند گشتاور کافی را برای ادامه کارکرد خود تولید کند. در قسمت های بعد به طور مفصل راجع به انواع روش های راه اندازی موتور القائی تک فاز بحث خواهیم کرد. در شکل ۱.۳ نمونه ای از موتور تک فاز نشان داده شده است.

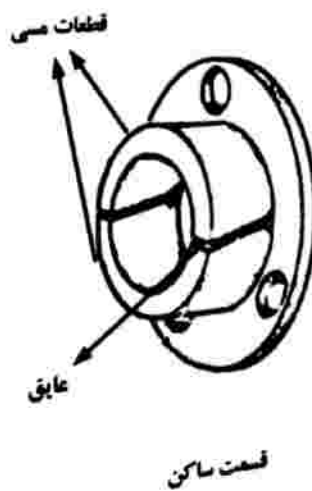
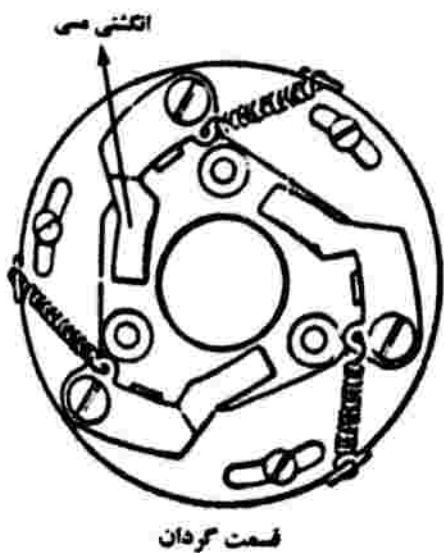
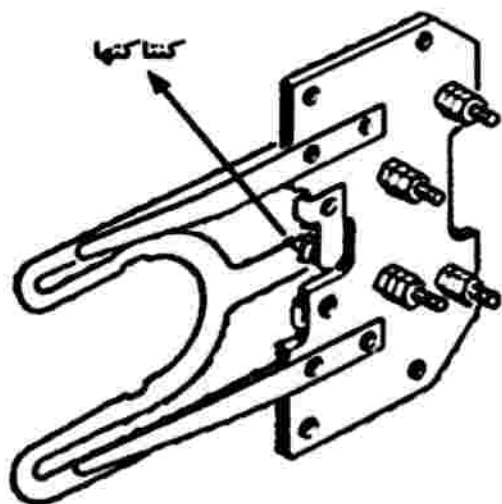
به دلیل اهمیت و کاربرد کلید گریز از مرکز در موتورهای تک فاز به نحوه عملکرد این کلید می پردازیم. کلید گریز از مرکز درون موتور قرار گرفته است. کار این کلید، قطع سیم پیچ راه انداز بعد از سرعت گرفتن روتور است. ساختار و عملکرد مکانیکی نوعی کلید گریز از مرکز که امروزه بسیار مورد استفاده قرار می گیرد، در زیر شرح داده می شود.

قسمت ساکن این کلید از دو قطعه نیم دایره مسی تشکیل شده که نسبت به هم عایق شده و در قسمت جلوی سپر نصب شده است که یک قطعه آن به یک سر سیم پیچ راه انداز متصل است و قطعه دیگر به یک سر سیم پیچ اصلی متصل است. قسمت دوار از سه قطعه گردان مسی تشکیل شده که در ابتدای راه اندازی موتور دور قطعات ساکن سوار شده اند. در لحظه راه اندازی، دو قطعه قسمت ساکن به وسیله انگشتی های مسی اتصال کوتاه شده اند. این عمل باعث می شود که سیم پیچی راه اندازی در مدار موتور قرار داشته باشد. هرچه دور موتور بیشتر می شود، نیروی گریز از مرکز نیز بیشتر می گردد. در حدود ۷۵ درصد سرعت کامل موتور نیروی گریز از مرکز باعث می شود که انگشتی ها از قطعات مسی جدا شوند و به این ترتیب سیم پیچی راه انداز از مدار خارج می گردد. وقتی موتور خاموش می شود کلید گریز از مرکز به موقعیت اولیه می گردد، کنتاکت ها بسته می شود و سیم پیچ راه انداز در مدار قرار می گیرد. شکل های ۲.۳ و ۳.۳ موقعیت کلید در موتور، قسمت ثابت و گردان کلید گریز از مرکز را نشان می دهند.

برای تحلیل نحوه کار موتور القائی تک فاز، از تحلیل میدان های گردان استفاده می کنیم، که این تحلیل در بخش بعد ارائه شده است.



شکل ۲.۳ موقعیت کلید گریز از مرکز در موتور.



شکل ۳.۳ قسمت های مختلف کلید گریز از مرکز.

۲.۳ تئوری میدان‌های گردان در موتورهای القائی تک‌فاز

در این قسمت به بررسی تئوری میدان‌های گردان که منشأ القا در هادی‌های روتور و نیز عامل ایجاد گشتاور در موتورهای القائی است، می‌پردازیم. ابتدا مستقل از نحوه راه‌اندازی موتور، فرض می‌کنیم که توزیع MMF مربوط به سیم‌پیچ‌ها سینوسی است. البته همان‌طور که در فصل اول بیان شد، اگرچه توزیع MMF سیم‌پیچ‌ها در عمل کاملاً سینوسی نیست، اما نحوه توزیع سیم‌پیچی به‌گونه‌ای است که امکان صرف‌نظر کردن از مؤلفه‌های هارمونیکی غیر از مؤلفه اصلی توجیه‌پذیر است. بنابراین داریم:

$$F_a = k i_a \cos \theta \quad (۱.۳)$$

اگر این سیم‌پیچی با جریان سینوسی با دامنه I_m تغذیه شود، خواهیم داشت:

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (۲.۳)$$

$$F_a = k I_m \cos \omega t \cos \theta \quad (۳.۳)$$

در بخش ۳.۳.۱ بیان شد که موج ضربانی، موجی ساکن با دامنه متغیر است. همان‌گونه که از رابطه (۳.۳) استنباط می‌گردد، شکل موج مربوط به این رابطه ساکن ولی دارای دامنه متغیر است. بنابراین می‌توان گفت که میدان ناشی از سیم‌پیچی اصلی موتور تک‌فاز القائی میدانی ضربانی است. اکنون می‌خواهیم امکان تولید گشتاور توسط میدان ضربانی را بررسی کنیم. برای این امر رابطه (۳.۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$F = \frac{1}{2} k I_m [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)] \quad (۴.۳)$$

همان‌طور که از رابطه (۴.۳) دیده می‌شود، شکل موج ضربانی متشکل از دو میدان دوار است. دامنه میدان‌های مذکور ثابت است، اما چون مقدار کسینوس با زمان تغییر می‌کند، پس دو موج داریم که یکی در زمان جلو و دیگری در زمان عقب می‌رود. بنابراین یک مؤلفه میدانی جلوگرد و یک مؤلفه میدانی عقب‌گرد داریم (F_b, F_r) .

اگر فقط مؤلفه جلوگرد وجود داشته باشد، دقیقاً مانند موتورهای القائی سه‌فاز جریانی در روتور القا می‌شود و در اثر آن گشتاور راه‌اندازی تولید می‌شود. اما از آنجا که در شرایط راه‌اندازی میدان عقب‌گرد نیز حضور دارد، این میدان به نوبه خود باعث القای ولتاژی در روتور می‌شود که بر اثر آن گشتاوری نیز تولید می‌گردد. از آنجا که در شرایط راه‌اندازی دامنه میدان‌های جلوگرد و عقب‌گرد با هم برابر است، گشتاور تولیدی ناشی از هر کدام نیز با هم برابر ولی در جهت مخالف هم است. با این وصف گشتاور برآیند تولیدی موتور القائی تک‌فاز در شرایط راه‌اندازی برابر با صفر خواهد بود. به عبارت دیگر این موتورها دارای گشتاور راه‌اندازی نیستند و همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای راه‌اندازی نیاز به تدابیر ویژه دارند.

۳.۳ لغزش در موتورهای القائی تک‌فاز

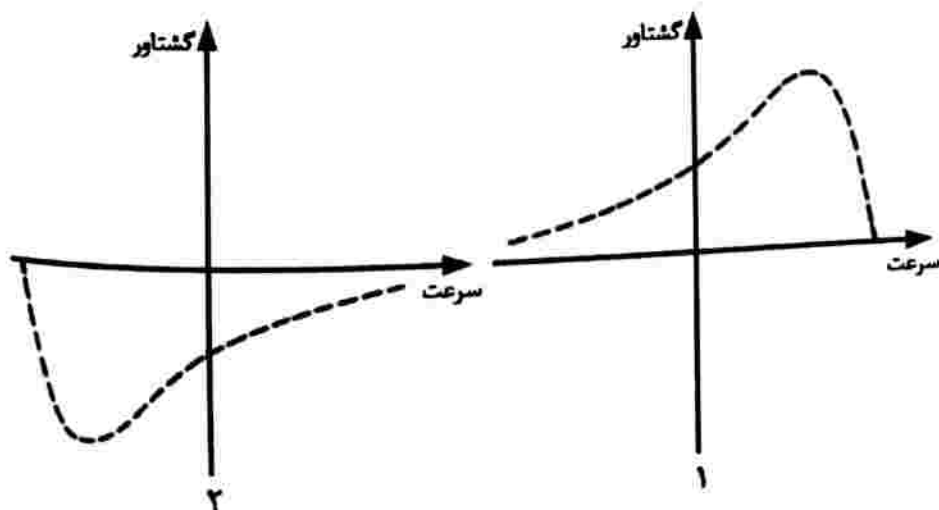
اکنون فرض کنید که روتور موتور القائی تک‌فاز با یک محرک خارجی در یک جهت چرخانده و جهت جلوگرد نامیده شود. با توجه به اینکه در موتور در هر لحظه دو میدان وجود دارد، بنابراین برای مفهوم لغزش نیز دو مقدار ارائه می‌شود، یکی مربوط به میدان جلوگرد و دیگری مربوط به میدان عقب‌گرد. اگر سرعت چرخش روتور n و سرعت چرخش میدان جلوگرد (سرعت سنکرون) n_s باشد، لغزش مربوط به میدان جلوگرد به صورت زیر بیان می‌شود.

$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad (۵.۳)$$

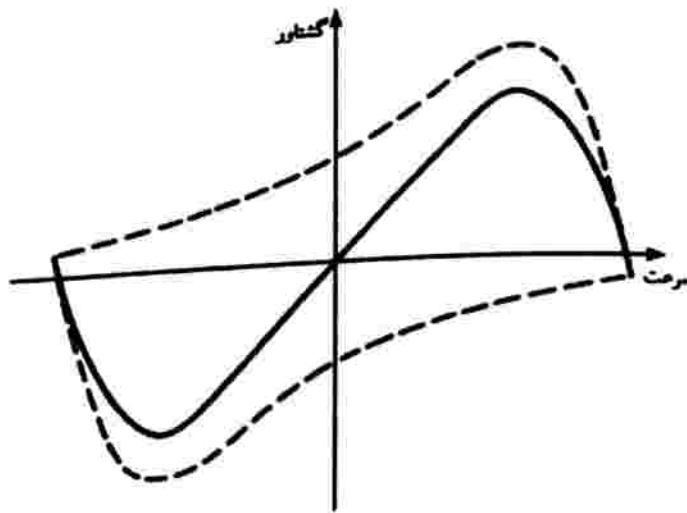
سرعت چرخش میدان عقب‌گرد برابر با سرعت چرخش میدان جلوگرد ولی در جهت مخالف است. بنابراین لغزش مربوط به میدان عقب‌گرد به صورت رابطه (۶.۳) نشان داده می‌شود.

$$s_b = \frac{-n_s - n}{-n_s} = \frac{-2n_s + n_s - n}{-n_s} = 2 - s \quad (۶.۳)$$

از بحث فوق نتیجه می‌شود که منحنی گشتاور-سرعت برای مؤلفه عقب‌گرد دقیقاً نسبت به مبدأ منحنی جلوگرد قرینه است که این امر در شکل ۴.۳ نشان داده شده است. با وجود این گشتاور برآیند مجموع دو مؤلفه جلوگرد و عقب‌گرد است و در حالت راه‌اندازی چون گشتاور جلوگرد و عقب‌گرد مساوی‌اند، لذا مقدار برآیند صفر است. منحنی گشتاور-سرعت برآیند در شکل ۵.۳ نشان داده شده است.



شکل ۴.۳ منحنی گشتاور-سرعت موتور القائی تک‌فاز ناشی از ۱. میدان جلوگرد ۲. میدان عقب‌گرد



شکل ۵.۳ منحنی گشتاور-سرعت موتور القائی تک فاز.

همان گونه که شکل ۳.۳ نشان می دهد، اگرچه گشتاور راه اندازی موتور برابر با صفر است، اگر به طریقی روتور در یکی از جهات چرخانده شود، گشتاور الکترومغناطیسی تولید می شود و موتور می تواند به چرخش خود ادامه دهد. در خصوص نحوه راه اندازی موتورهای القائی تک فاز در بخش های بعدی به طور مفصل صحبت به میان خواهد آمد. در ادامه، مدار معادل موتور القائی تک فاز جدا از نحوه راه اندازی آن بررسی می شود.

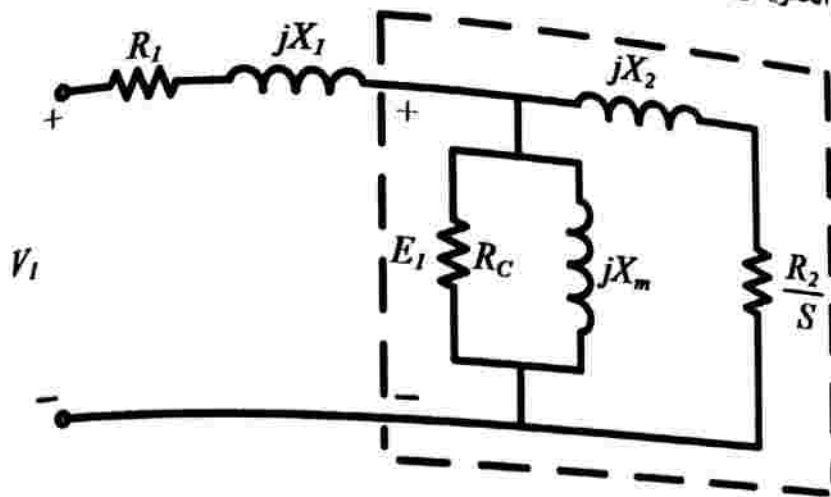
۴.۳ مدار معادل موتور القائی تک فاز

همان طور که در قسمت قبل بیان شد، در لحظه راه اندازی که روتور ساکن است، دامنه میدان های جلوگرد و عقب گرد (F_b, F_f) برابر است، اما هنگامی که روتور در یک جهت شروع به چرخش کند، تعادل دو میدان به هم می ریزد به گونه ای که میدان در راستای چرخش تقویت و میدان دیگر تضعیف می شود.

همان طور که دیدیم، در موتورهای القائی سه فاز متعادل تنها یک میدان گردان ایجاد می شود. در چنین حالتی مدار معادل تک فاز موتور به صورت شکل ۶.۳ ارائه می شود. در مدار معادل مذکور E_1 ولتاژ القائی در روتور ناشی از میدان گردان است. اما در موتورهای تک فاز همزمان دو میدان دوار داریم که هر دو در هادی های روتور ولتاژ القا می کنند. در لحظه سکون ولتاژی که میدان جلوگرد در هادی های روتور القا می کند، به صورت $E_f = 4.44f N \varphi_f$ است و ولتاژی که میدان عقب گرد در روتور القا می کند به صورت $E_b = 4.44f N \varphi_b$ است. ولتاژ معادل القاشده در روتور مجموع این دو ولتاژ است که برابر است با:

$$E = E_f + E_b$$

(۷.۳)



شکل ۶.۳ مدار معادل موتور القائی سه‌فاز.

از آنجا که در لحظه سکون $\varphi_f = \varphi_b$ است، بنابراین:

$$E_f = E_b = \frac{E}{2} \quad (۸.۳)$$

همان‌گونه که ولتاژ E_1 در شکل ۶.۳ با امپدانس دیده شده در سمت روتور متناسب است، ولتاژهای E_b و E_f در موتور تک‌فاز نیز با امپدانس روتور برای میدان‌های جلوگرد و عقب‌گرد متناسب است. بنابراین مدار معادل موتور القائی تک‌فاز می‌تواند به صورت شکل ۷.۳ ارائه شود. در حالت سکون امپدانس روتور برای میدان‌های جلوگرد و عقب‌گرد یکسان و مقدار هر کدام از آن‌ها برابر با نصف امپدانس کل روتور است. بنابراین کفایت مقدار مذکور را در مدار معادل شکل ۷.۳ جایگزین کنیم.

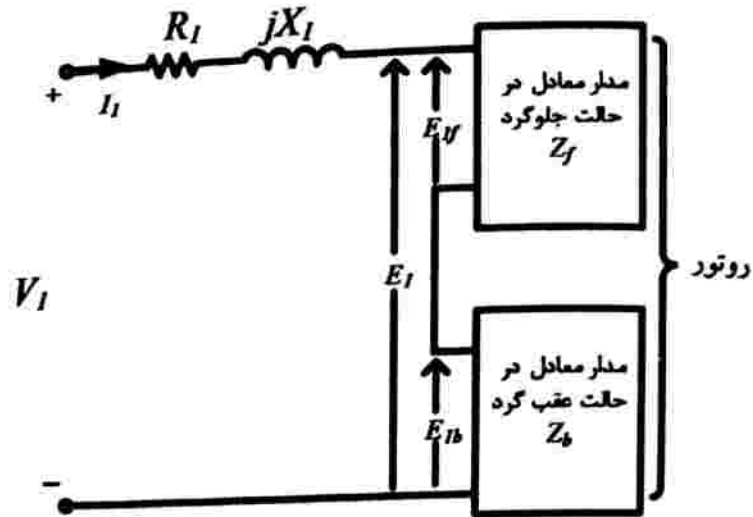
تذکره: در این فصل به جهت جلوگیری از هم‌نامی پارامترهایی که در ادامه معرفی خواهند شد، از X_{mag} برای نمایش راکتانس مغناطیس‌کنندگی هسته استفاده می‌کنیم.

برای تعمیم مدار معادل شکل ۸.۳ به سایر شرایط کاری، کفایت لغزش‌های جلوگرد (s) و عقب‌گرد (۲-s) را در امپدانس‌های مربوط وارد کنیم. به این ترتیب مدار معادل موتور تک‌فاز برای هر سرعت دلخواه مطابق شکل ۹.۳ به دست می‌آید. در این حالت امپدانس‌های جلوگرد و عقب‌گرد به ترتیب زیر خواهند بود:

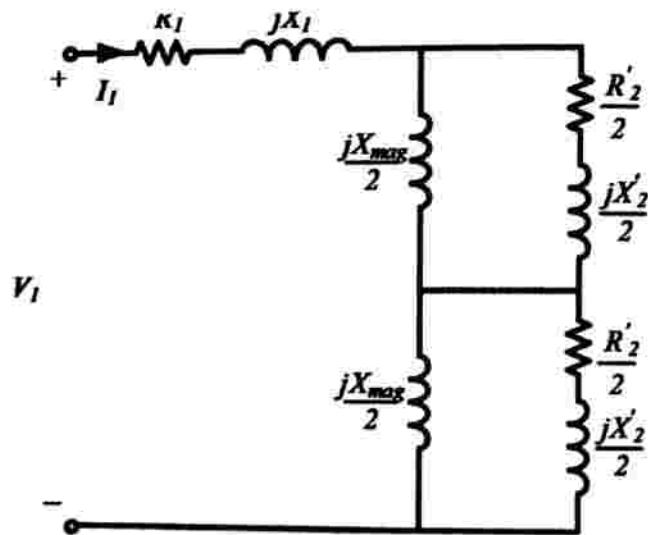
$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{0.5X_{mag} j(0.5X_r'j + 0.5R_r'/s)}{0.5R_r'/s + 0.5j(X_{mag} + X_r')} \quad (۹.۳)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{0.5X_{mag} j[0.5X_r'j + 0.5R_r'/(2-s)]}{0.5R_r'/(2-s) + 0.5j(X_{mag} + X_r')} \quad (۱۰.۳)$$

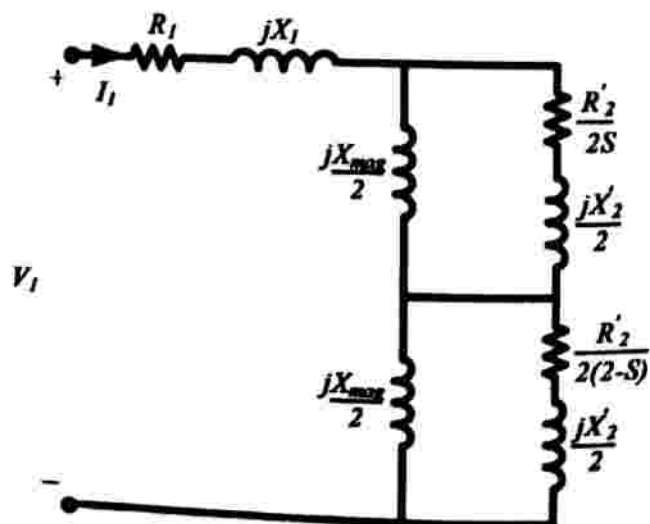
فصل ۳. موتورهای القائی تک‌فاز ۹۷



شکل ۷.۳ مدار معادل موتور القائی تک‌فاز در حالت سکون.



شکل ۸.۳ مدار معادل موتور تک‌فاز در حالت سکون.



شکل ۹.۳ مدار معادل موتور تک‌فاز در لغزش s

پارامترهای مدار معادل موتور القائی تک‌فاز از طریق آزمایش‌های بی‌باری، روتور قفل‌شده و آزمایش DC به‌دست می‌آید. در ارتباط با نحوه انجام آزمایش‌های بیان‌شده قبلاً در بخش ۵.۱ صحبت به میان آمده است. فقط باید در نظر داشت که در آزمایش روتور قفل‌شده، سیم‌پیچ کمکی از مدار قطع می‌شود و فقط سیم‌پیچ اصلی به منبع تغذیه وصل می‌گردد. همچنین در آزمایش بی‌باری در لحظه راه‌اندازی هر دو سیم‌پیچ کمکی و اصلی در مدار هستند، اما در شرایط کار عادی، سیم‌پیچ کمکی از مدار خارج می‌گردد. بنابراین در هر دو آزمایش روتور قفل‌شده و بی‌باری، فقط سیم‌پیچی اصلی در مدار است.

مثال ۱.۳ یک موتور القائی تک‌فاز یک کیلو وات، ۲۱۵ ولت و ۵۰ هرتز مفروض است. با DC مقدار مقاومت استاتور برابر با ۱٫۶ اهم به‌دست آمده است. از نتایج آزمایش روتور قفل‌شده داریم:

$$V = 85 \text{ V} \quad I = 9,8 \text{ A} \quad P = 390 \text{ W}$$

و نتایج آزمایش بی‌باری نیز به‌صورت زیر است.

$$V = 215 \text{ V} \quad I = 9,3 \text{ A} \quad P = 185 \text{ W}$$

مطلوب است:

(الف) محاسبه پارامترهای موتور

(ب) مدار معادل جلوگرد و عقب‌گرد موتور را به‌دست آورید.

حل

(الف) در شرایط سکون لغزش برابر با یک است و داریم:

$$0,5X_r'z + 0,5R_r' \ll 0,5X_{\text{mag}}$$

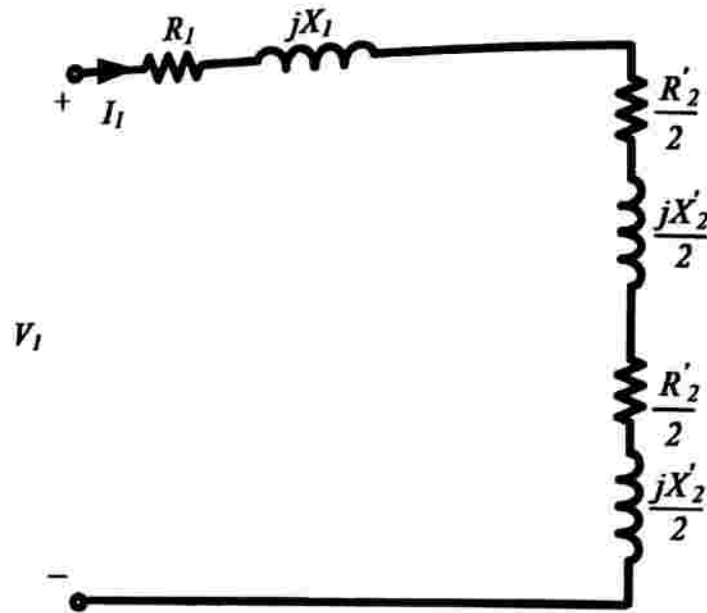
بنابراین شکل ۱۰.۳ را برای آن می‌توان در نظر گرفت.

با توجه به اینکه $R_1 = 1,6 \Omega$ است، می‌توان روابط زیر را در حالت سکون بیان کرد.

$$390 = 9,8^2 (1,6 + R_r') \rightarrow R_r' = 2,5 \Omega$$

$$|Z| = \frac{85}{9,8} = 8,7 \Omega$$

$$8,7^2 = (1,6 + 2,5)^2 + (X_1 + X_r')^2 \rightarrow X_1 + X_r' = 7,7 \Omega$$



شکل ۱۰.۳ مدار معادل موتور القائی تک‌فاز در حالت سکون.

با فرض اینکه $X_1 = X'_2$ باشد، مقدار هر یک برابر با $3,85 \Omega$ می‌شود. حال برای حالت بی‌باری که لغزش کم است، می‌توان بیان کرد که

$$0,5X'_2j + 0,5\frac{R'_2}{s} > 0,5X_{mag}$$

$$0,5X'_2j + 0,5\frac{R'_2}{2-s} \approx 0,5X'_2j + 0,25R'_2 \ll 0,5X_{mag}$$

بنابراین شکل ۱۱.۳ را برای آن می‌توان در نظر گرفت. در این شکل R_{rot} تلفات چرخشی را مدل می‌کند.

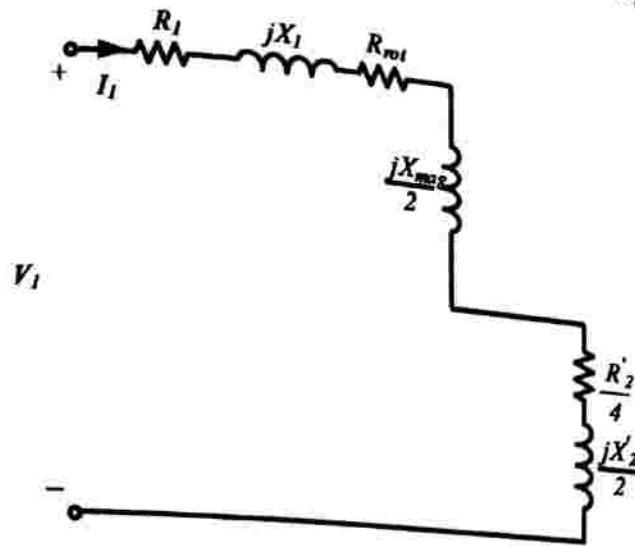
$$P_{nl} = I_1^2(R_1 + R_{rot} + 0,25R'_2) = I_1^2 R_{nl} \rightarrow 185 = 3,9^2 R_{nl} \rightarrow R_{nl} = 12,16 \Omega$$

امپدانس بی‌باری (Z_{nl}) نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

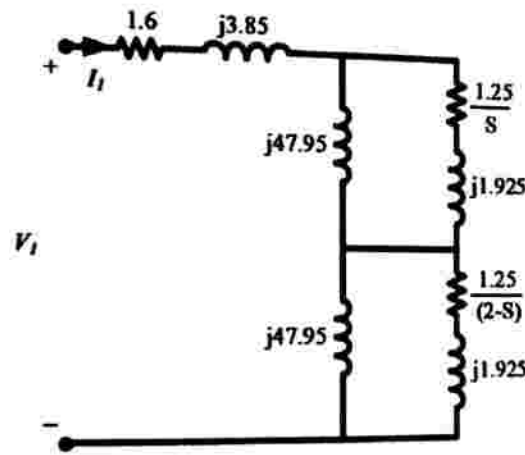
$$|Z_{nl}| = \sqrt{R_{nl}^2 + (0,5X_{mag} + X_1 + 0,5X'_2)^2}$$

$$|Z_{nl}| = \frac{215}{3,9} = 55,1 = \sqrt{12,16^2 + (0,5X_{mag} + 3,85 + 1,925)^2}$$

$$X_{mag} = 95,9 \Omega$$



شکل ۱۱.۳ مدار معادل موتور القائی تک‌فاز در حالت بی‌باری.

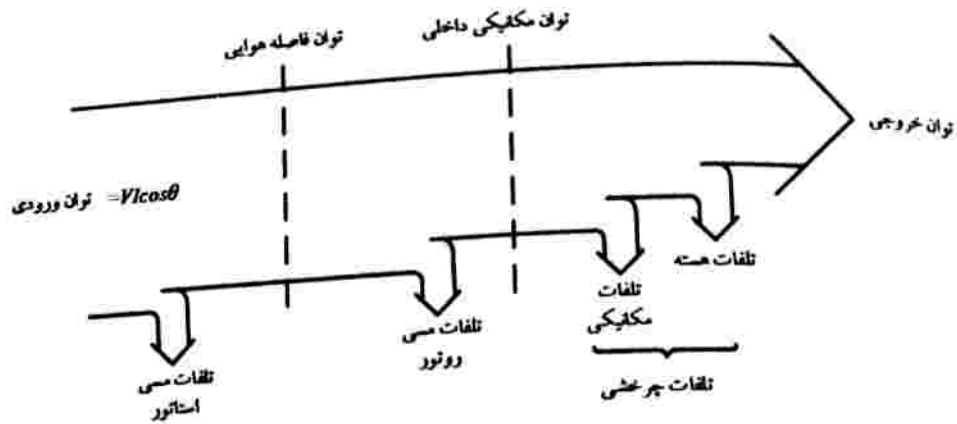


شکل ۱۲.۳ مدار معادل موتور القائی تک‌فاز.

بنابراین مدار معادل را می‌توان به صورت شکل ۱۲.۳ برای آن در نظر گرفت.

۵.۳ توان و گشتاور در موتور القائی تک‌فاز

برای یک موتور القائی می‌توان دیاگرام پخش توان را به صورت زیر در نظر گرفت. همان‌طور که از شکل ۱۳.۳ دیده می‌شود، اولین تلفاتی که از توان ورودی کم می‌شود، مربوط به تلفات مسی استاتور است. توان باقیمانده به روتور منتقل می‌شود که به این توان، توان فاصله‌هوائی می‌گویند. بخشی از توان منتقل شده به روتور به صورت تلفات مسی در هادی‌های روتور از بین خواهد رفت و توان باقیمانده از شکل الکتریکی به شکل مکانیکی تبدیل می‌شود. با کم کردن تلفات چرخشی از این توان، توان خروجی به دست می‌آید. با توجه به اینکه در موتورهای تک‌فاز همزمان دو میدان جلوگرد و عقب‌گرد حضور دارند، باید روابط توان‌های عبوری از شکاف هوایی و مکانیکی موتور القائی تک‌فاز را برای هر دو



شکل ۱۳.۳ دیاگرام پخش توان موتور القائی تک فاز.

میدان به دست آوریم. در موتور القائی سه فاز، توان فاصله هوایی برای هر فاز آن توانی است که در R_r / s مصرف می شود. بنابراین در اینجا نیز می توان بیان کرد که توان فاصله هوایی جلوگرد در موتور القائی تک فاز، توانی است که در $R_r / 2s$ مصرف می شود و توان فاصله هوایی میدان عقب گرد، توانی است که در $R_r / 2(2-s)$ مصرف می شود. بنابراین روابط را به صورت زیر می توان بیان کرد.

برای میدان جلوگرد:

$$P_{gf} = \frac{R_r'}{2s} I_f^2 \quad (11.3)$$

$$P_{mf} = (1-s) P_{gf} \quad (12.3)$$

برای میدان عقب گرد:

$$P_{gb} = \frac{R_r'}{2(2-s)} I_b^2 \quad (13.3)$$

$$P_{mb} = (1-(2-s)) P_{gb} = -(1-s) P_{gb} \quad (14.3)$$

توان مکانیکی کل برابر با مجموع توان تولیدی توسط میدان های جلوگرد و عقب گرد است:

$$P_m = P_{mf} + P_{mb} = (1-s)(P_{gf} - P_{gb}) \quad (15.3)$$

توان خروجی موتور با کم کردن تلفات چرخشی از توان مکانیکی قابل محاسبه است. بنابراین توان خروجی حاصل نیز به قرار زیر است.

$$P_{out} = P_m - P_{rot} \quad (16.3)$$

در این رابطه P_{rot} تلفات چرخشی موتور و شامل اصطکاک، تهویه، و تلفات هسته است. تلفات اهمی مربوط به روتور شامل دو مؤلفه که یکی مربوط به میدان جلوگرد و دیگری مربوط به میدان عقب‌گرد است که برای محاسبه تلفات اهمی روتور، باید این دو مؤلفه را با هم جمع نمود.

$$\begin{aligned} P_{cuf} &= sP_{gf} \\ P_{cub} &= (2-s)P_{gb} \\ P_{cu} &= sP_{gf} + (2-s)P_{gb} \end{aligned} \quad (17.3)$$

و توان کل عبوری از فاصله هوایی برابر است با:

$$P_g = P_{gf} + P_{bf} \quad (18.3)$$

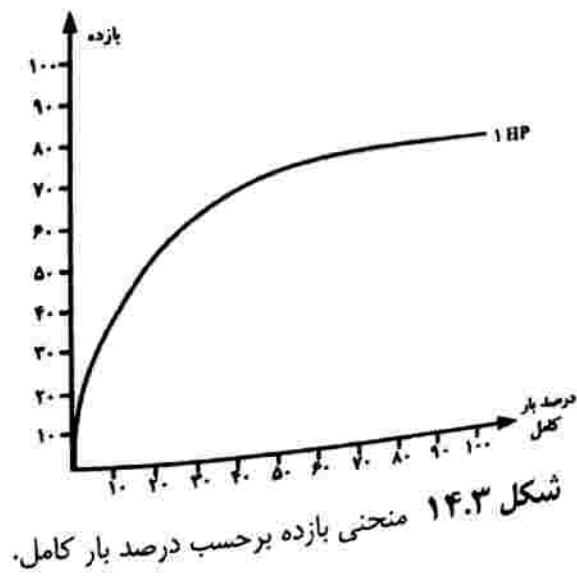
گستاور حاصل نیز به قرار زیر است.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (19.3)$$

در رابطه فوق ω_r سرعت مکانیکی روتور است که برابر با $(1-s)\omega_s$ است. بنابراین:

$$T_m = \frac{(1-s)(P_{gf} - P_{gb})}{(1-s)\omega_s} = \frac{(P_{gf} - P_{gb})}{\omega_s} \quad (20.3)$$

از آنجا که در این موتورهای میدان عقب‌گرد نقش ترمز را ایفا می‌کند، تلفات مربوط به موتورهای تک‌فاز بالا و بازده آنها نوعاً پایین است به طوری که بیشینه بازده آنها به حدود ۶۰٪ می‌رسد. البته بازده موتور بسته به نقطه کار آن تغییر می‌کند. در شکل ۱۴.۳ بازده یک نمونه موتور القائی تک‌فاز برای نقاط مختلف کاری نشان داده شده است.



فصل ۳. موتورهای القائی تک‌فاز ۱۰۳

مثال ۳.۳ در موتور القائی تک‌فاز مثال ۱.۳ با فرض سرعت ۱۴۳۰ دور بر دقیقه، مطلوب است محاسبه جریان ورودی، توان ورودی، ضریب توان، گشتاور حاصل، توان خروجی، بازده، توان عبوری از فاصله هوایی و تلفات اهمی.

حل

از مدار معادل در حالت بی‌باری داریم:

$$P = I^2 (R_1 + 0.5R_2') + P_{rot} = 185 \text{ W}$$

$$P_{rot} = 185 - 3.9^2 (1.6 + 1.25) = 141.6 \text{ W}$$

در سرعت نامی داریم:

$$1430 = \frac{120 \times 50}{p} \rightarrow p = 4$$

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.47$$

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{47.95j [(1.25 / 0.47) + 1.925j]}{(1.25 / 0.47) + (47.95 + 1.925)j} = 19.14 + 12.06j \Omega$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{47.95j [1.25 / (2 - 0.47) + 1.925j]}{1.25 / (2 - 0.47) + (47.95 + 1.925)j} = 0.59 + 1.86j \Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{input} &= (R_1 + R_f + R_b) + (X_1 + X_f + X_b)j \\ &= (1.6 + 19.14 + 0.59) + (3.85 + 12.06 + 1.86)j = 21.33 + 17.77j \\ &= 27.76 \angle 39.8 \Omega \end{aligned}$$

$$I_{input} = \frac{215}{27.76} \angle -39.8 = 7.74 \angle -39.8 \text{ A}$$

$$\text{پس فاز} = \cos(39.8) = 0.77 = \text{ضریب قدرت}$$

$$P_{input} = VI \cos \theta = 215 \times 7.74 \times 0.77 = 1281.26 \text{ W}$$

سرعت سنکرون بر حسب رادیان بر ثانیه برابر با ۱۵۷ خواهد شد:

$$T = T_f - T_b = \frac{I^2}{W_{syn}} (R_f - R_b) = \frac{7,74^2}{157} (19,14 - 0,59) = 7,08 \text{ N.m}$$

$$P_{mech} = T W_{syn} (1 - s) = 7,08 \times 157 (1 - 0,47) = 1059,3 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} = 1059,3 - 141,6 = 917,7 \text{ W}$$

$$\text{بازده} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{917,7}{1281,36} = 71,62\%$$

از روابط (۱۱.۳) و (۱۳.۳) داریم:

$$P_{gf} = I^2 R_f = 7,74^2 \times 19,14 = 1146,63 \text{ W}$$

$$P_{gb} = I^2 R_b = 7,74^2 \times 0,59 = 35,34 \text{ W}$$

$$P_g = 1146,63 + 35,34 = 1181,97 \text{ W}$$

حال برای محاسبه تلفات مسی از رابطه (۱۷.۳) داریم:

$$P_{cu} = 0,47 \times 1146,63 + (2 - 0,47) \times 35,34 = 122,9 \text{ W}$$

مثال ۳.۳ در موتور مثال ۱.۳ نسبت اندازه شار برآیند ناشی از میدان جلوگرد و عقبگرد را محاسبه کنید.

حل

ولتاژهای جلوگرد و عقبگرد متناسب با شارهای برآیند هستند، بنابراین می‌توان بیان کرد:

$$\frac{\Phi_f}{\Phi_b} = \frac{V_f}{V_b} = \frac{Z_f}{Z_b} = \frac{\sqrt{(19,14)^2 + (12,06)^2}}{\sqrt{(0,59)^2 + (1,86)^2}} = 11,6$$

۶.۳ راه‌اندازی موتور القایی تک‌فاز

همان‌طور که در ابتدای این فصل اشاره شد، موتورهای القایی تک‌فاز که شامل فقط یک سیم‌پیچی روی استاتورند، نمی‌توانند گشتاور راه‌اندازی ایجاد کنند. یک روش معمول برای ایجاد گشتاور

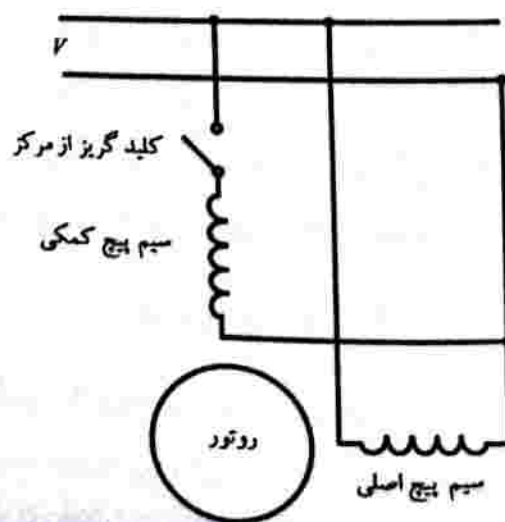
راه اندازی در این موتورها، استفاده از سیم پیچی کمکی در استاتور آنهاست به طوری که محور مغناطیسی سیم پیچی ها نسبت به هم ۹۰ درجه الکتریکی جابه جایی مکانی داشته باشند. امپدانس های سیم پیچی کمکی و اصلی به نحوی است که جریان این دو سیم پیچی با هم اختلاف فاز داشته باشند تا یک موتور دوفاز نامتعادل (تغذیه و سیم پیچی ها هر دو نامتقارن) ایجاد شود. بسته به خصوصیات سیم پیچی کمکی و المان های به کار رفته در آن، انواع متفاوتی از موتورهای القائی تک فاز موجودند که در ادامه به آن ها خواهیم پرداخت.

۱.۶.۳ موتورهای القائی تک فاز - فاز شکسته

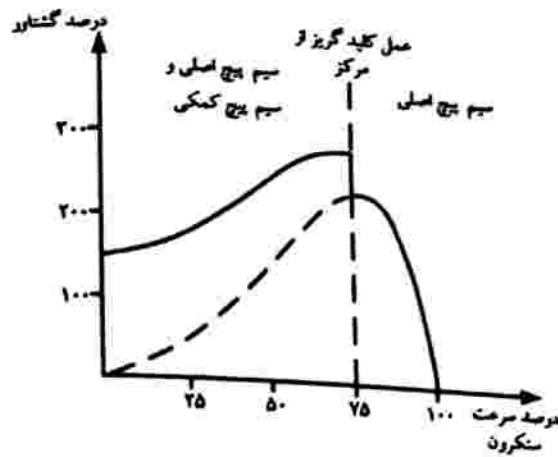
از موتورهای فاز شکسته در جایی استفاده می شود که گشتاور راه اندازی زیادی لازم باشد. قیمت موتورهای فاز شکسته خیلی زیاد نیست و معمولاً برای مصارفی نظیر موتورهای فن، مشعل ها، کولر آبی، پنکه، پمپ تخلیه مربوط به ماشین لباسشویی و موتور یخچال مورد استفاده قرار می گیرند. در موتور فاز شکسته یک سیم پیچی کمکی در مدار قرار می گیرد، به ترتیبی که امپدانس سیم پیچی کمکی (Z_a) با امپدانس سیم پیچی اصلی (Z_m) متفاوت است. طرحواره موتور القائی تک فاز را می توان به صورت زیر نشان داد.

همان طور که در شکل ۱۵.۳ دیده می شود، در مدار مربوط به سیم پیچ کمکی یک کلید گریز از مرکز وجود دارد که در طول زمان راه اندازی وصل است و باعث می شود سیم پیچی کمکی در مدار قرار گیرد. بعد از اینکه موتور به درصد مشخصی از سرعت نامی رسید، کلید گریز از مرکز به حالت قطع می رود و سیم پیچی کمکی را از مدار خارج می کند.

در موتورهای القائی تک فاز، سیم پیچی کمکی به گونه ای طراحی می شود که خاصیت اهمی آن نسبت به سیم پیچی اصلی بیشتر است. اگرچه وجود سیم پیچی کمکی باعث می شود گشتاور



شکل ۱۵.۳ موتور تک فاز القائی فاز شکسته.



شکل ۱۶.۳ نمودار گشتاور لغزش موتور القائی تک‌فاز فاز شکسته.

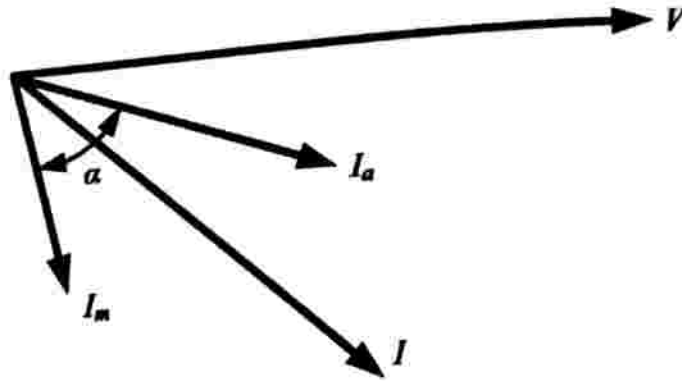
در شرایط راه‌اندازی افزایش یابد، اما حضور آن در شرایط کار دائم باعث کاهش گشتاور می‌شود. بنابراین سیم‌پیچی کمکی باید در حالت کار دائم از مدار خارج شود زیرا وجود این سیم‌پیچی در مدار، تلفات سیستم را افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب کاهش گشتاور می‌شود.

اگر فرض کنیم کلید گریز از مرکز وجود ندارد و سیم‌پیچی کمکی دائماً در مدار باقی بماند، در این صورت منحنی گشتاور سرعت موتور به صورت منحنی شماره یک در شکل ۱۶.۳ خواهد بود. حال اگر منحنی گشتاور سرعت موتور را در حالتی که سیم‌پیچی کمکی اصلاً در مدار وجود ندارد رسم کنیم، منحنی شماره دو در شکل ۱۶.۳ به دست خواهد آمد. برای تنظیم کلید گریز از مرکز و تعیین سرعتی که در آن کلید باید عمل کند، بهترین نقطه محل تلاقی دو منحنی مذکور است. در عمل این نقطه در شرایط مختلف کاری موتور ثابت نیست و جابه‌جا می‌شود (تلفات، دمای محیط و ...). و به همین دلیل است که این کلیدها را برای حدود ۷۰٪ سرعت نامی تنظیم می‌کنند به دلیل مشکلاتی که در کلیدهای گریز از مرکز وجود دارد، امروزه از کلیدهای الکترونیکی استفاده می‌شود. اگر ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی‌های کمکی و اصلی بردار مرجع در نظر گرفته شود، همان‌طور که در شکل ۱۷۶ دیده می‌شود، زاویه I_m از زاویه I_a بیشتر است.

اگر زاویه بین جریان‌های I_a و I_m باشد، می‌توان ثابت کرد که گشتاور راه‌اندازی متناسب با حاصل ضرب جریان‌های I_a و I_m در $\sin \alpha$ است:

$$T_s = k I_m I_a \sin \alpha \quad (21.3)$$

همان‌طور که از رابطه فوق ملاحظه می‌شود، برای افزایش گشتاور راه‌اندازی باید $\sin \alpha$ تا حد امکان بزرگ شود. امپدانس سیم‌پیچی اصلی مانند عموم سیم‌پیچی‌ها در ماشین‌های الکتریکی خاصیت سلفی دارد. حال برای افزایش مقدار زاویه α باید خاصیت اهمی سیم‌پیچی کمکی را تقویت کرد. از طرف دیگر با افزایش R_α اگرچه $\sin \alpha$ بزرگ می‌شود، ولی اندازه جریان I_a



شکل ۱۷.۳ دیاگرام برداری ولتاژ و جریان‌های موتور تک فاز القائی فاز شکسته.

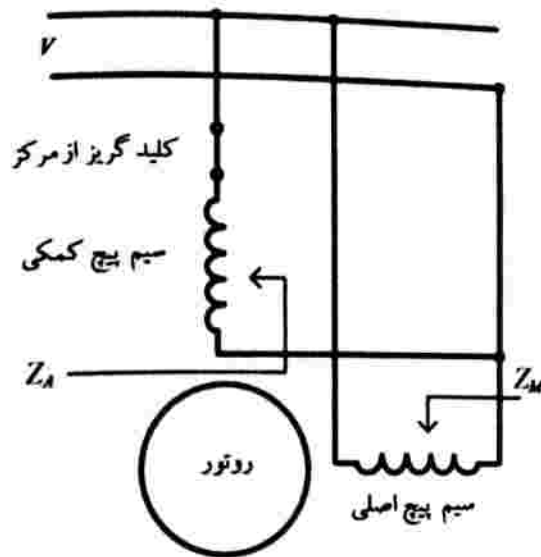
کم می‌شود. به طوری که اگر مقاومت R_a از صفر شروع به افزایش کند، گشتاور راه‌اندازی نیز زیاد می‌شود. اما بعد از آنکه به مقدار مشخصی از مقاومت رسید، افزایش R_a باعث کاهش گشتاور راه‌اندازی می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که برای R_a یک مقدار بهینه وجود دارد که برای رسیدن به حداکثر گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز است. در بخش بعد، نحوه به دست آوردن این مقدار بهینه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۱۶.۳ بهینه‌سازی مقدار Z_A از نظر طراحی

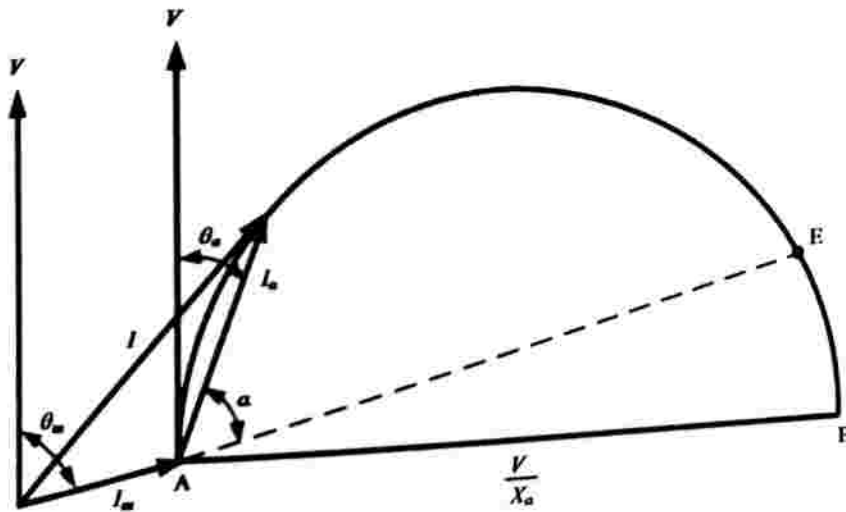
طرحواره موتور القائی تک فاز با فاز شکسته در لحظه راه‌اندازی را می‌توان به صورت شکل ۱۸.۳ در نظر گرفت. در این شرایط کلید گریز از مرکز وصل است و سیم پیچ کمکی در مدار است. فرض کنید که امپدانس دیده شده از دو سر سیم پیچ اصلی در حالت سکون به صورت $Z_M = R_M + jX_M$ است و امپدانس دیده شده از دو سر سیم پیچی کمکی برابر با $Z_A = R_A + jX_A$ باشد. در این روابط Z_A و Z_M امپدانس‌های دیده شده از منظر پایانه‌های سیم پیچی اصلی و کمکی می‌باشند بنابراین در امپدانس‌های مذکور تأثیر روتور هم دیده شده است. اکنون با فرض ثابت بودن مقادیر X_M ، X_A و می‌خواهیم R_A را به گونه‌ای تعیین کنیم که گشتاور راه‌اندازی بیشترین مقدار خود را داشته باشد. همان طور که بیان شد، مقدار گشتاور راه‌اندازی برابر است با:

$$T_s = k I_m I_a \sin \alpha \quad (۲۲.۳)$$

با تغییر R_A مکان هندسی I_a نسبت به بردار ولتاژ اعمالی و همچنین I_m تغییر می‌کند. اگر مقدار R_A کوچک شود، اندازه I_a بزرگ می‌شود و زاویه I_a نسبت به ولتاژ به سمت زاویه ۹۰ درجه می‌رود. اما اگر مقدار R_A افزایش یابد، اندازه I_a کاهش می‌یابد و زاویه آن به سمت صفر یعنی هم‌فازی با V می‌رود.



شکل ۱۸.۳ موتور القائی تک‌فاز با فاز شکسته در شرایط راه‌اندازی با وصل بودن کلید گریز از مرکز.



شکل ۱۹.۳ مکان هندسی بردار I_a .

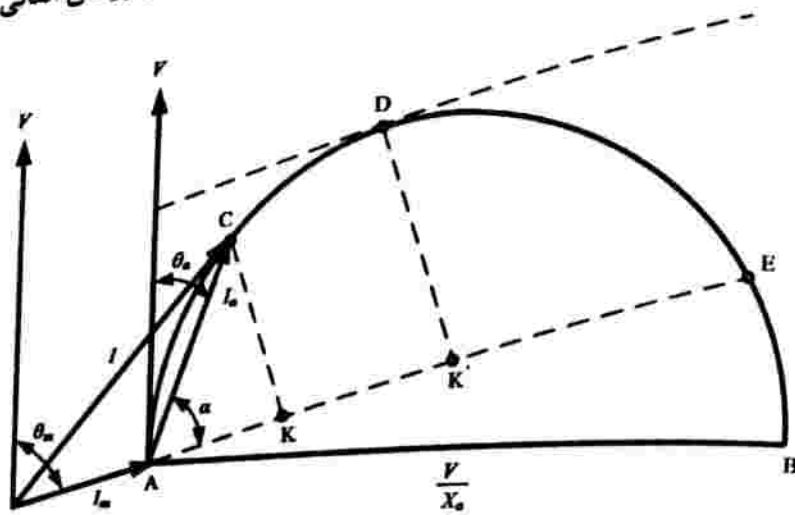
همان‌طور که در شکل ۱۹.۳ دیده می‌شود، می‌توان نشان داد که مکان هندسی انتهای بردار I_a یک نیم‌دایره به قطر V/X_a می‌شود. اکنون نقطه‌ای روی این نیم‌دایره باید یافت که $I_a \sin \alpha$ بیشترین مقدار را در آن نقطه داشته باشد. برای یافتن این نقطه کافی است پاره‌خطی به موازات AE را روی این نیم‌دایره حرکت دهیم تا این نیم‌دایره را مانند شکل ۲۰.۳ در نقطه‌ای مانند D قطع کند.

نقطه D همان نقطه مطلوب ماست که برای این نقطه روابط زیر صادق است. (۲۳.۳)

$$AD = DE$$

(۲۴.۳)

$$AK' = K'E$$



شکل ۳۰.۳ مکان هندسی بردار I_a با رسم پاره‌خط موازی AE .

از روابط هندسی داریم:

$$\theta_a = \frac{\theta_m}{2} = \alpha \quad (25.3)$$

θ_a زاویه امیدانس Z_A و θ_m زاویه امیدانس Z_m و α زاویه بین I_m و I_a است. اکنون اگر از طرفین رابطه (۲۵.۳) تانژانت بگیریم، داریم:

$$\tan(\theta_a) = \tan\left(\frac{\theta_m}{2}\right) \quad (26.3)$$

$$\tan\left(\frac{\theta_m}{2}\right) = \frac{\sin(\theta_m / 2)}{\cos(\theta_m / 2)} = \frac{\sin \theta_m}{1 + \cos \theta_m} \quad (27.3)$$

با توجه به اینکه

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (28.3)$$

$$\tan \theta_a = \frac{X_A}{R_A} \quad (29.3)$$

$$Z_M = R_M + jX_M \quad (30.3)$$

$$\cos \theta_m = \frac{R_M}{|Z_M|} \quad (31.3)$$

$$\sin \theta_m = \frac{X_M}{|Z_M|} \quad (32.3)$$

با جایگذاری روابط بالا داریم:

$$R_A = \frac{X_A}{X_M} (R_M + |Z_M|) \quad (۳۳.۳)$$

اگر رابطه فوق بین امپدانس‌های Z_A و Z_M برقرار باشد، گشتاور راه‌اندازی بیشینه به دست می‌آید. به‌طور معمول در فرایند طراحی، تعداد دور سیم‌پیچی کمکی (N_a) را مشخص و سپس با توجه به تعداد دور، R_A را محاسبه می‌کنند.

برای انتخاب N_a از تقریبی مربوط به درصد سیم‌پیچی اصلی استفاده می‌شود و سپس گشتاور راه‌اندازی را حساب می‌کنند و اگر بهینه نبود، دوباره مقدار آن را عوض می‌کنند و ... با مشخص شدن N_a و داشتن N_m می‌توان نسبت راکتانس‌های سیم‌پیچی اصلی به کمکی را توسط رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\frac{X_a}{X_m} = \left(\frac{N_a}{N_m} \right)^2 \quad (۳۴.۳)$$

(رلوکتانس مسیر شار $x_a = N_a^2 / R$)

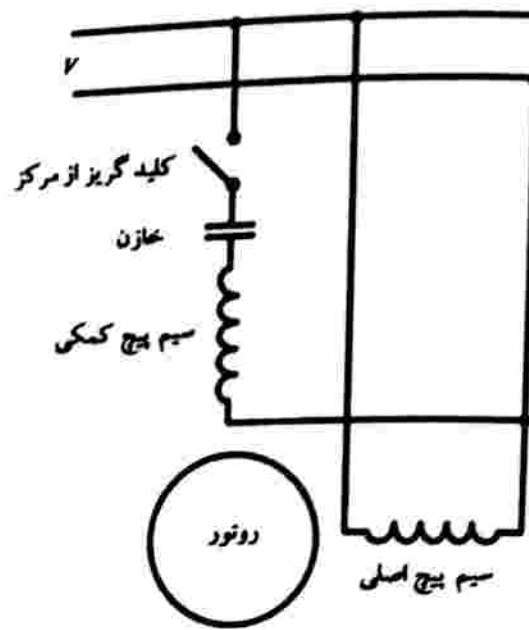
در نتیجه (با صرف‌نظر از اثر روتور) از روابط فوق خواهیم داشت:

$$R_A = \left(\frac{N_a}{N_m} \right)^2 (R_M + |Z_M|) \quad (۳۵.۳)$$

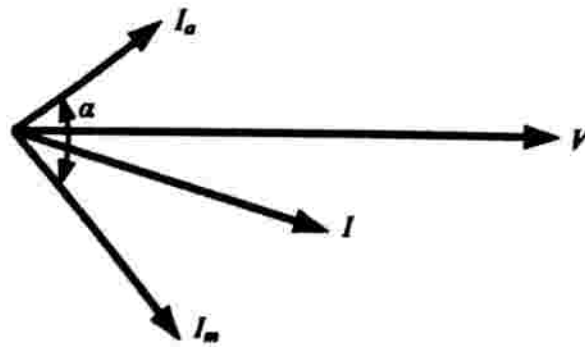
۲.۶.۳ موتور القایی تک‌فاز با خازن راه‌انداز (موقت)

در موتور فاز شکسته برای رسیدن به گشتاور ماکزیمم به دنبال افزایش مقدار $I_a \sin \alpha$ بودیم. اما از آن‌جا که مقادیر I_a و $\sin \alpha$ در خلاف هم تغییر می‌کنند، افزایش $I_a \sin \alpha$ با محدودیت روبه‌رو است. اما اگر در مسیر سیم‌پیچی کمکی خازن قرار دهیم، می‌توان همزمان هم جریان و هم α را افزایش داد. موتوری که به این ترتیب با افزودن خازن در مسیر سیم‌پیچی کمکی به دست می‌آید، دارای گشتاور راه‌اندازی قابل‌ملاحظه‌ای است. شکل ۲۱.۳ طرحواره این موتور را نشان می‌دهد.

شکل ۲۲.۳ دیاگرام برداری ولتاژ-جریان مربوط به این موتور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، به دلیل وجود خازن در مدار سیم‌پیچ کمکی، جریان آن به سمت پیش‌فازی حرکت می‌کند. بنابراین با این عمل می‌توان زاویه α را تا بیشترین مقدار (۹۰ درجه) افزایش داد.



شکل ۲۱.۳ مدار معادل موتور خازن راه انداز.



شکل ۲۲.۳ دیاگرام برداری ولتاژها و جریان های موتور خازن راه انداز.

همان طور که بیان شد، سیم پیچ کمکی و خازن تنها در زمان راه اندازی در مدار قرار دارند و پس توسط کلید گریز از مرکز از مدار خارج می شوند. بنابراین نیازی به استفاده از خازن مرغوب نیست و معمولاً از خازن های الکترولیتی استفاده می شود. اگر در حالت فاز شکسته، گشتاور راه اندازی ۱۵۰٪ گشتاور نامی باشد، در موتورهای با خازن راه انداز می توان به گشتاور راه اندازی معادل ۳۵۰٪ - ۳۰۰٪ گشتاور نامی رسید.

مثال ۴.۳ یک موتور القائی تک فاز با خازن راه انداز دارای توان ۲۰۰ وات، ولتاژ ۲۳۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز مفروض است. امپدانس سیم پیچی اصلی و کمکی به صورت زیر است.

$$Z_M = 5 + j3.7 \Omega$$

$$Z_A = 11 + j2.6 \Omega$$

اگر بخواهیم جریان سیم‌پیچی کمکی بر جریان سیم‌پیچی اصلی عمود شود، مقدار خازن مورد نیاز سری با سیم‌پیچی کمکی را حساب کنید.

حل

$$Z_{11} = 5 + 3.7j = 6.22 \angle 36.5^\circ$$

مشخص است که جریان سیم‌پیچی اصلی نسبت به ولتاژ اعمالی با زاویه 36.5° پس فاز است. بنابراین کافی است. جریان سیم‌پیچی کمکی نسبت به ولتاژ اعمالی با زاویه $90 - 36.5 = 53.5^\circ$ پیش فاز باشد. تا این دو جریان برهم عمود شوند. اگر X_c راکتانس خازن سری با سیم‌پیچی کمکی در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت:

$$Z_{11} = 11 + (3.6 - X_c)j$$

$$\tan \phi_c = \frac{3.6 - X_c}{11} \Rightarrow X_c = 3.6 - 11 \tan \phi_c = 3.6 - 11 \tan(53.5^\circ) = 18.46 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 18.46} = 172.5 \mu\text{F}$$

افزودن خازن (X_c) برای رسیدن به بیشترین مقدار گشتاور راه‌اندازی است. اکنون این سؤال مطرح است که به ازای چه مقداری از ظرفیت خازن یا X_c گشتاور راه‌اندازی ماکزیمم می‌شود.

۱.۲.۶.۳ تعیین ظرفیت خازن با فرض اینکه گشتاور ماکزیمم شود

همانند موتورهای فاز شکسته برای یافتن مقدار بهینه ظرفیت خازن، ابتدا مکان هندسی بردار جریان I_a را رسم می‌کنیم. این مکان یک دایره به قطر V/R_A است.

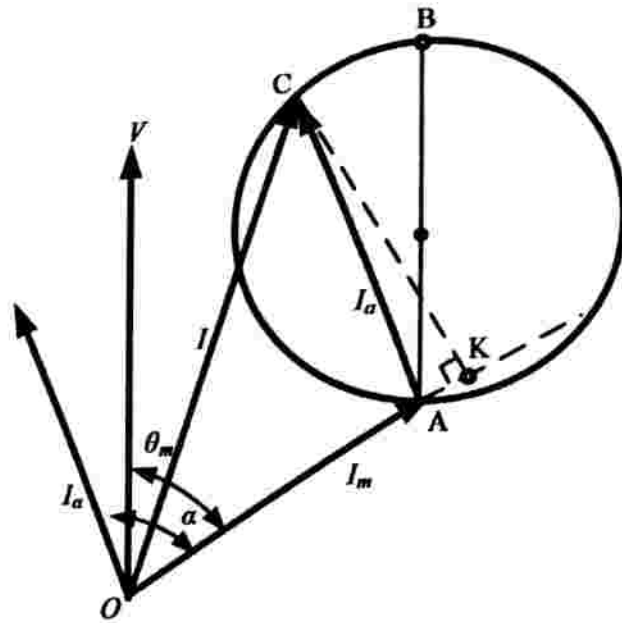
در شکل ۲۳.۳ از انتهای I_m ، I_a را رسم کرده‌ایم که مکان هندسی I_a یک دایره است به قطر AB و با تغییر مقدار خازن I_a تغییر می‌کند.

وقتی بردار ولتاژ و جریان هم‌راستا باشد (راکتانس خازن = راکتانس سیم‌پیچی کمکی) بیشترین جریان را داریم، ولی اگر X_c خیلی بزرگ باشد، مقدار جریان I_a صفر می‌شود و جریان I_a به اندازه $\pi/2$ پیش فاز می‌شود. می‌دانیم:

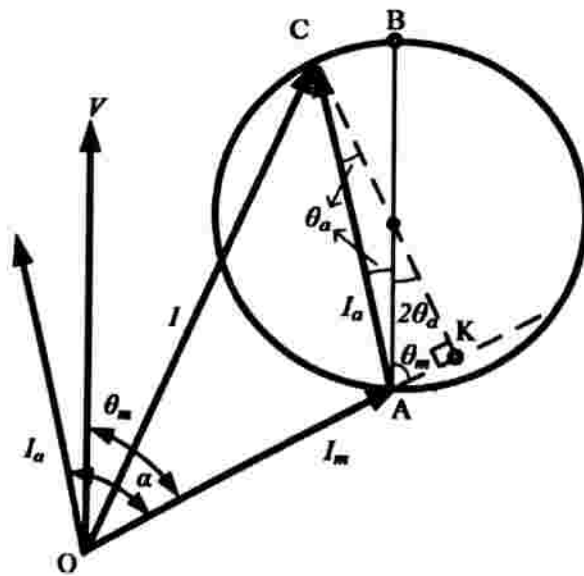
(۳۶.۳)

$$T_s = k I_m I_a \sin \alpha$$

در حالت کلی بخشی از یک وتر دایره است. برای ماکزیمم شدن گشتاور راه‌اندازی لازم است CK ماکزیمم شود، یعنی از مرکز دایره عبور کند. با این فرض که CK از مرکز دایره عبور کند (شکل ۲۴.۳).



شکل ۲۳.۳ نمودار فازوری محاسبه ظرفیت خازن برای گشتاور راه اندازی ماکزیمم در حالتی که CK از مرکز عبور نکند.



شکل ۲۴.۳ نمودار فازوری محاسبه ظرفیت خازن برای گشتاور راه اندازی ماکزیمم در حالتی که CK از مرکز عبور کند.

ارتباط زوایا به صورت زیر است.

$$\angle(AB, AC) = \theta_a \quad (۳۷.۳)$$

در نتیجه:

$$\Delta OCA : OA = OC = \text{شعاع دایره} \quad (۳۸.۳)$$

$$\angle ACK = \angle(AB, AC) = \theta_a \quad (۳۹.۳)$$

$\angle KCA$ زاویه محاطی و مساوی نصف کمان روبه‌روست. $\angle KOA = \pi / 2 - \theta_m$ نیز زاویه مرکزی و برابر با کمان روبه‌رو است.

پس داریم:

$$\frac{\pi}{2} - \theta_m = 2\theta_a \quad (40.3)$$

بنابراین رابطه بین θ_a و θ_m به دست می‌آید. اگر مقدار خازن طوری انتخاب شود، که گشتاور راه‌اندازی ماکزیمم شود، رابطه فوق برابر خواهد بود. اکنون براساس روابط به دست آمده می‌توان نوشت:

$$\theta_a = \frac{\pi / 2 - \theta_m}{2} \quad (41.3)$$

به این ترتیب:

$$\tan \theta_a = \sqrt{\frac{1 - \cos 2\theta_a}{1 + \cos 2\theta_a}} = \sqrt{\frac{1 - \sin \theta_m}{1 + \sin \theta_m}} \quad (42.3)$$

با فرض $X_c > X_A$ یعنی در حالت پیش‌فازی هستیم.

$$\tan \theta_a = \frac{X_c - X_A}{R_A} \quad (43.3)$$

از طرفی:

$$\sin \theta_m = \frac{X_M}{|Z_M|} \quad (44.3)$$

پس داریم:

$$\frac{X_c - X_A}{R_A} = \sqrt{\frac{(1 - X_M / |Z_M|)}{(1 + X_M / |Z_M|)}} = \sqrt{\frac{(1 - X_M / |Z_M|) \cdot (|Z_M| + X_M)}{(1 + X_M / |Z_M|) \cdot (|Z_M| + X_M)}} \quad (45.3)$$

با ساده‌سازی به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{X_c - X_A}{R_A} = \frac{R_M}{|Z_M| + X_M} \quad (46.3)$$

$$X_c = X_A + \frac{R_A R_M}{|Z_M| + X_M} \quad (47.3)$$

با استفاده از رابطه (47.3) می‌توان مقدار ظرفیت خازنی C را نیز محاسبه کرد.

۲.۲.۶.۳ تعیین ظرفیت خازن با فرض اینکه نسبت گشتاور راه‌اندازی به جریان راه‌اندازی (CK/OC) ماکزیمم شود

در فرایند تعیین ظرفیت خازن می‌توان یک تابع هدف دیگر تعریف کرد و آن این است که گشتاور راه‌اندازی به ازای جریان راه‌اندازی ماکزیمم شود، چون با افزایش گشتاور راه‌اندازی ممکن است از یک جایی به بعد جریان راه‌اندازی طوری تغییر کند که تلفات خیلی زیاد شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، مکان هندسی انتهای بردار جریان موتور دایره‌ای به قطر V/R_A است. برای اینکه نسبت گشتاور به جریان راه‌اندازی ماکزیمم شود، باید نسبت CK به OC ماکزیمم شود. می‌توان ثابت کرد که مقدار مذکور در صورتی ماکزیمم است که همانند شکل ۲۵.۳ OC مماس بر دایره باشد. CK عمود بر OA است و $|I| = OC < OCF = \pi/2$ کل جریانی که موتور می‌کشد.

$$\Delta OCF : OC^2 = OF^2 - CF^2 \quad (۴۸.۳)$$

$$\Delta OAF : OF^2 = OA^2 + AF^2 - 2OA \cdot AF \cos(\angle OAF) \quad (۴۹.۳)$$

شعاع دایره $CF = AF = \pi$ و $\angle OAF = \pi - \theta_m$

$$OC^2 = |I|^2 = |I_m|^2 + 2|I_m| \frac{|V|}{2R_A} \frac{R_M}{|Z_M|} \quad (۵۰.۳)$$

$$\text{شعاع دایره} = \frac{|V|}{2R_A} = AB = \frac{|V|}{R_A} \quad (۵۱.۳)$$

با فاکتور گرفتن از $|I_m|^2$ و ساده‌سازی داریم:

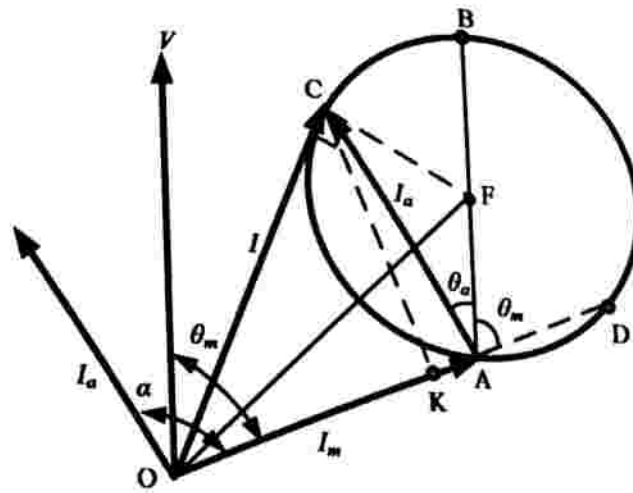
$$|I|^2 = |I_m|^2 \left(1 + \frac{R_M}{R_A} \right) \quad (۵۲.۳)$$

$$\frac{|I|^2}{|I_m|^2} = \frac{R_A + R_M}{R_A} \quad (۵۳.۳)$$

می‌دانیم:

$$I_m = \frac{V}{Z_M} \quad (۵۴.۳)$$

$$I = I_m + I_a = V \left(\frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_A} \right) = V \left(\frac{Z_M + Z_A}{Z_M Z_A} \right) \quad (۵۵.۳)$$



شکل ۲۵.۳ نمودار فازوری برای گشتاور راه‌اندازی ماکزیمم به ازای جریان راه‌اندازی ماکزیمم برای موتور القایی تک‌فاز خازن راه‌انداز.

در نتیجه:

$$\frac{I}{I_m} = \frac{Z_M + Z_A}{Z_A} \quad (۵۶.۳)$$

حالا کافی است اندازه I / I_m در رابطه (۵۶.۳) را به توان ۲ برسانیم و با رابطه (۵۳.۳) مقایسه کنیم، که خواهیم داشت:

$$X_c = X_A + \frac{-X_M R_A + |Z_M| \sqrt{R_A (R_A + R_M)}}{R_M} \quad (۵۷.۳)$$

اگر مقدار خازن با مقدار فوق برابر باشد، نسبت گشتاور راه‌اندازی به جریان راه‌اندازی ماکزیمم خواهد شد. اگر با رابطه X_c به دست آمده در بخش قبل مقایسه کنیم، می‌بینیم که در اینجا X_c کوچک‌تر شده است و لذا قاعدتاً جریان راه‌اندازی نسبت به حالت قبل کمتر خواهد شد. دوباره تاکید می‌شود که در این روابط Z_A و Z_M امپدانس‌های دیده‌شده از منظر پایانه‌های سیم‌پیچی اصلی و کمکی اند بنابراین در امپدانس‌های مذکور تأثیر روتور هم دیده‌شده است و برای نمایش امپدانس سیم‌پیچ اصلی و کمکی بدون تأثیر روتور از اندیس‌های کوچک (Z_a و Z_m) استفاده خواهیم کرد.

مثال ۵.۳ یک موتور القایی تک‌فاز از نوع فاز شکسته با مشخصات $۰.۵KW$ ، ۴ قطب، ۶۰ هرتز، ۱۲۰ ولت و با پارامترهای زیر مدنظر است:

$$X_A = ۶\Omega \quad X_M = ۴\Omega \quad R_A = ۳\Omega \quad R_M = ۱.۴\Omega$$

(الف) چه مقدار مقاومت باید به سیم پیچ کمکی اضافه کنیم تا ماشین فاز شکسته دارای گشتاور راه انداز ماکزیمم شود.

(ب) اگر خازنی را با سیم پیچی کمکی سری کنیم، ظرفیت خازنی را به گونه ای محاسبه کنید که گشتاور راه اندازی ماکزیمم شود.

(ج) بخش «ب» را برای ماکزیمم نمودن نسبت گشتاور راه اندازی به جریان راه اندازی تکرار کنید.

حل

(الف) با توجه به رابطه (۳۵.۳) داریم:

$$R_A = \frac{X_A}{X_M} (R_M + |Z_M|) = \frac{6}{4} (1,5 + \sqrt{1,5^2 + 4^2}) = 8,66 \Omega$$

کل مقاومت به دست آمده برای سیم پیچ کمکی ۸,۶۶ اهم به دست آمد که با توجه به اینکه مقدار مقاومت سیم پیچ کمکی ۳ اهم است بنابراین باید ۵,۶۶ اهم مقاومت اضافی قرار دهیم.

(ب) با توجه به رابطه (۴۷.۳) نیز داریم:

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \left(6 + \frac{3 \times 1,5}{4 + \sqrt{1,5^2 + 4^2}} \right)} = 40,5 \mu F$$

(ج) با توجه به رابطه (۵۷.۳) داریم:

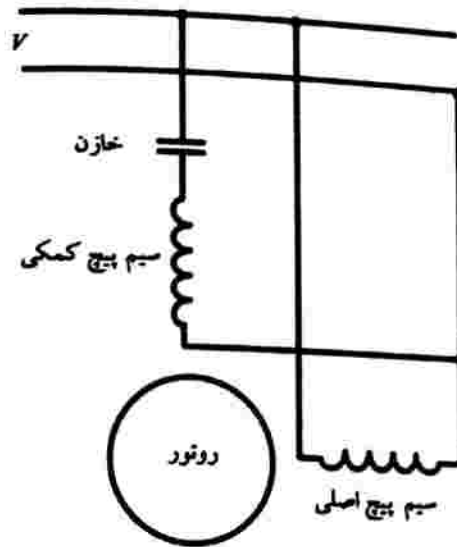
$$X_C = 6 + \frac{-4 \times 3 + \sqrt{1,5^2 + 4^2} \sqrt{3(3 + 1,5)}}{1,5} = 6 + \frac{-12 + 15,69}{1,5} = 8,64$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 8,64} = 313,54 \mu F$$

۳.۶.۳ موتور خازن دائم

با حذف کلید گریز از مرکز در موتورهای خازن راه انداز، همانند شکل ۲۶.۳ موتور خازن دائم به وجود می آید.

البته تفاوت این دو موتور تنها در حذف کلید گریز از مرکز نیست بلکه طراحی سیم پیچی کمکی و همچنین خازن در موتور خازن دائم برای کارکرد در مدت طولانی و نه فقط در شرایط راه اندازی است. بنابراین کیفیت سیم پیچی و همچنین خازن در این موتورها مرغوب تر است.



شکل ۲۶.۳ شمای کلی موتور خازن دائم.

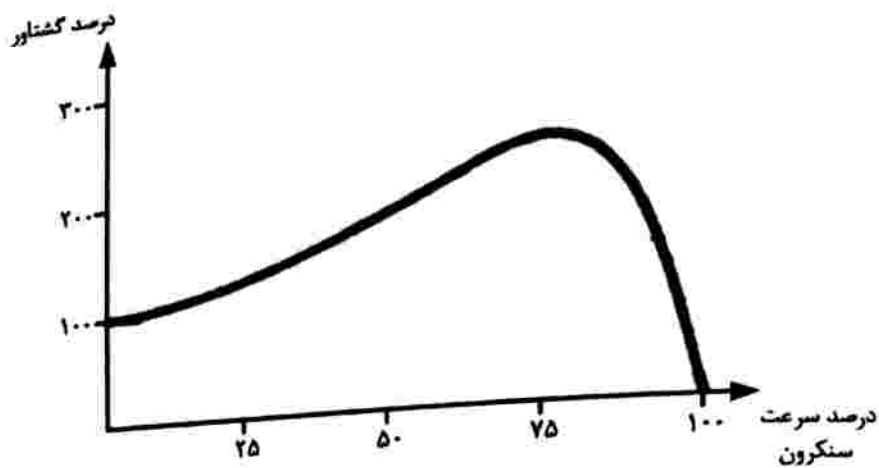
به‌گونه‌ای که از خازن‌های روغنی در آن‌ها استفاده می‌شود. همین امر باعث می‌شود با وجود حذف کلید گریز از مرکز، قیمت موتور خازن دائم در مجموع بیشتر از موتور خازن راه‌انداز باشد همچنین در طراحی و محاسبه ظرفیت خازنی در سیم‌پیچی کمکی مقدار ظرفیت برای داشتن خروجی مناسب در شرایط کار دائم و نه شرایط راه‌اندازی تعیین می‌شود.

در موتورهای خازن دائم به دلیل آنکه طراحی خازن برای تضعیف میدان عقب‌گرد در شرایط کار دائم صورت می‌گیرد، نرم‌تر سایر از موتورهای تک‌فاز کار می‌کند و نویز صوتی کمتری دارد. از این‌رو برای کاربردهایی که محدودیت صوتی در استاندارد موجود باشد، از این موتورها استفاده می‌گردد.

۱.۳.۶.۳ منحنی گشتاور-سرعت

در موتور خازن راه‌انداز منحنی گشتاور-سرعت یک منحنی دوتکه است اما در موتورهای خازن دائم منحنی گشتاور-سرعت یک منحنی پیوسته است. موتور خازن دائم طوری طراحی می‌شود که مشابه موتور دوفاز نامتعادل باشد. اگر فرض کنیم امپدانس سیم‌پیچی اصلی و فرعی یکسان باشد، جریان‌هایی با اندازه برابر و اختلاف فاز صفر داریم. ولی وجود خازن باعث می‌شود که اختلاف فاز جریان‌ها در حالت ایده‌آل به $\pi/2$ نزدیک شود. در این حالت موتور خازن دائم شبیه موتور دوفاز متعادل عمل می‌کند و بنابراین بازده بهتری خواهد داشت.

در شکل ۲۷.۳ منحنی گشتاور سرعت یک موتور خازن دائم نوعی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، گشتاور راه‌اندازی موتور خازن دائم (برحسب پرینیت) کمتر از گشتاور راه‌اندازی موتور خازن راه‌انداز است.



شکل ۲۷.۳ منحنی گشتاور-سرعت موتور خازن دائم.

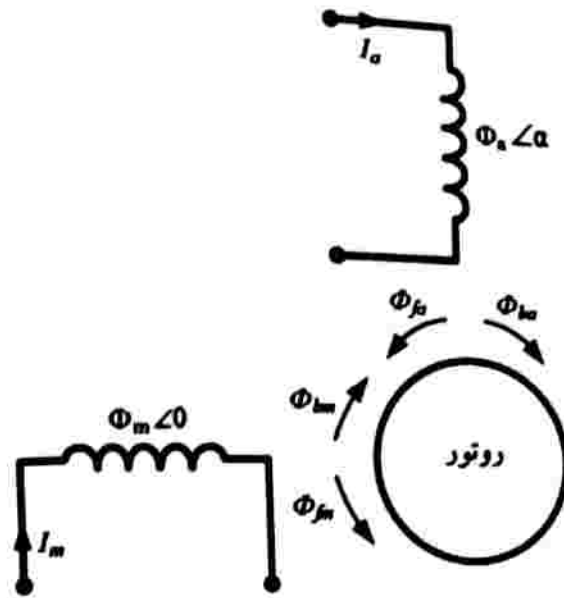
۲.۳.۶.۳ مدار موتور خازن دائم

برای تحلیل موتور خازن دائم که سیم‌پیچ کمکی آن همیشه در مدار است، می‌توان از مدار معادل شکل ۳۱.۳ استفاده کرد. در موتور خازن دائم با دو سیم‌پیچی روی استاتور مواجه‌ایم، که هر سیم‌پیچی یک شار ضربانی ایجاد می‌کند، بنابراین در این موتورها همواره دو میدان ضربانی داریم. از طرفی هر میدان ضربانی را می‌توان به دو میدان گردان جلوگرد و عقب‌گرد تجزیه کرد که این امر در شکل ۲۸.۳ نشان داده شده است. پس در اینجا با چهار میدان روبه‌رو هستیم. مدار معادل از دید سیم‌پیچی اصلی به صورت شکل ۲۹.۳ و از دید سیم‌پیچی کمکی به صورت شکل ۳۰.۳ است.

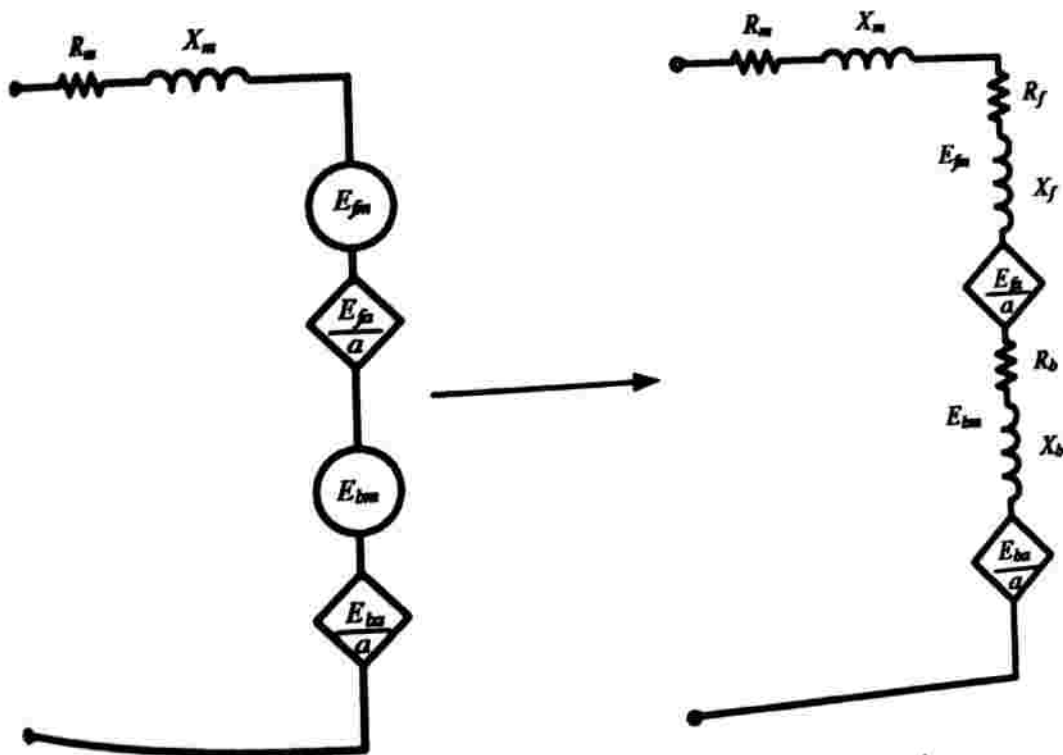
بنابراین می‌توان شکل ۳۱.۳ را برای مدار معادل موتور تک‌فاز خازن دائم از دید سیم‌پیچی کمکی و اصلی رسم کرد.

در شکل ۳۱.۳ که مدار معادل موتور خازن راه‌انداز از دید سیم‌پیچی اصلی و کمکی است، E_{fm} مدل‌کننده ولتاژ القاشده در روتور ناشی از میدان جلوگرد سیم‌پیچی اصلی و E_{hm} مدل‌کننده ولتاژ القاشده در روتور ناشی از میدان عقب‌گرد سیم‌پیچی اصلی است. منابع ولتاژ وابسته $-jE_{fa}/a$ و jE_{ba}/a به ترتیب مدل‌کننده ولتاژ القاشده در روتور ناشی از میدان جلوگرد سیم‌پیچی کمکی منتقل شده به طرف سیم‌پیچی اصلی و مدل ولتاژ القاشده در روتور ناشی از میدان عقب‌گرد سیم‌پیچی کمکی منتقل شده به طرف سیم‌پیچی اصلی‌اند. مقدار این منابع ولتاژ، به جریان عبوری از سیم‌پیچی فرعی بستگی دارد.

در مدار معادل از دید سیم‌پیچی کمکی، در بخش مربوط به استاتور، X_c ، X_a و R_a را داریم. برای مدل کردن ولتاژ القاشده در روتور هم از امپدانس‌های $a^T Z_f$ و $a^T Z_b$ استفاده می‌کنیم که این امپدانس‌ها، منتقل شده از طرف روتور به طرف سیم‌پیچی کمکی‌اند.

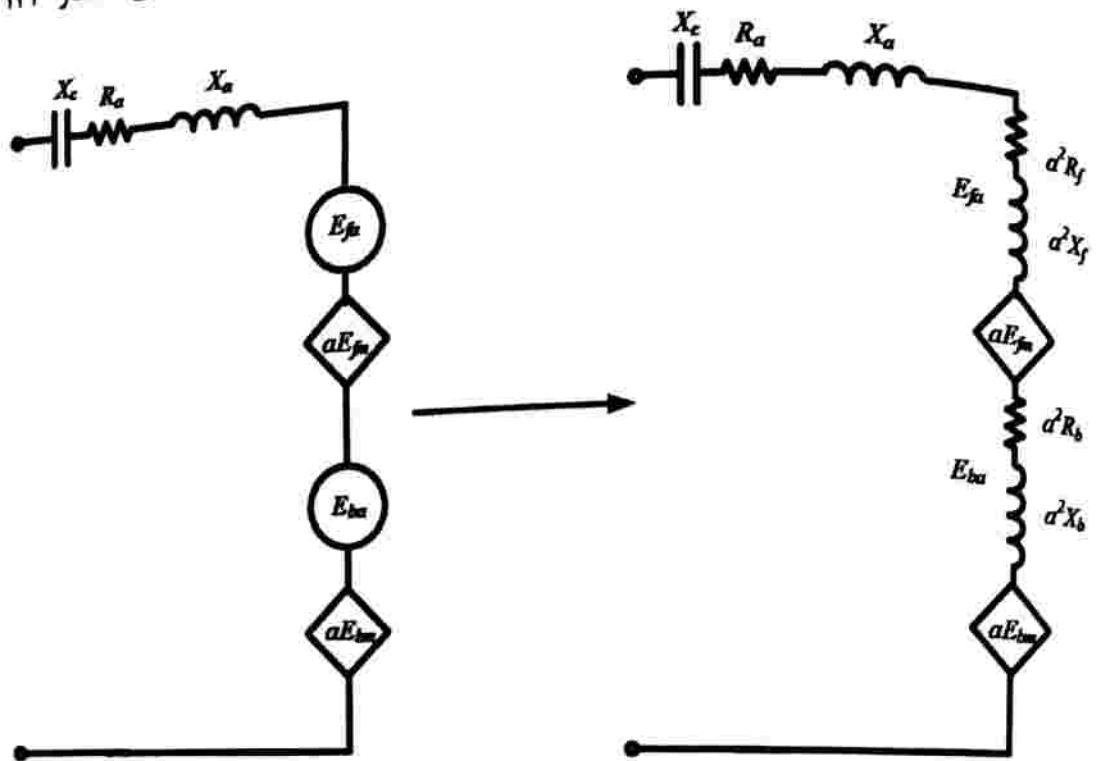


شکل ۲۸.۳ موتور خازن دائم و مؤلفه‌های سیم‌پیچی‌های آن.

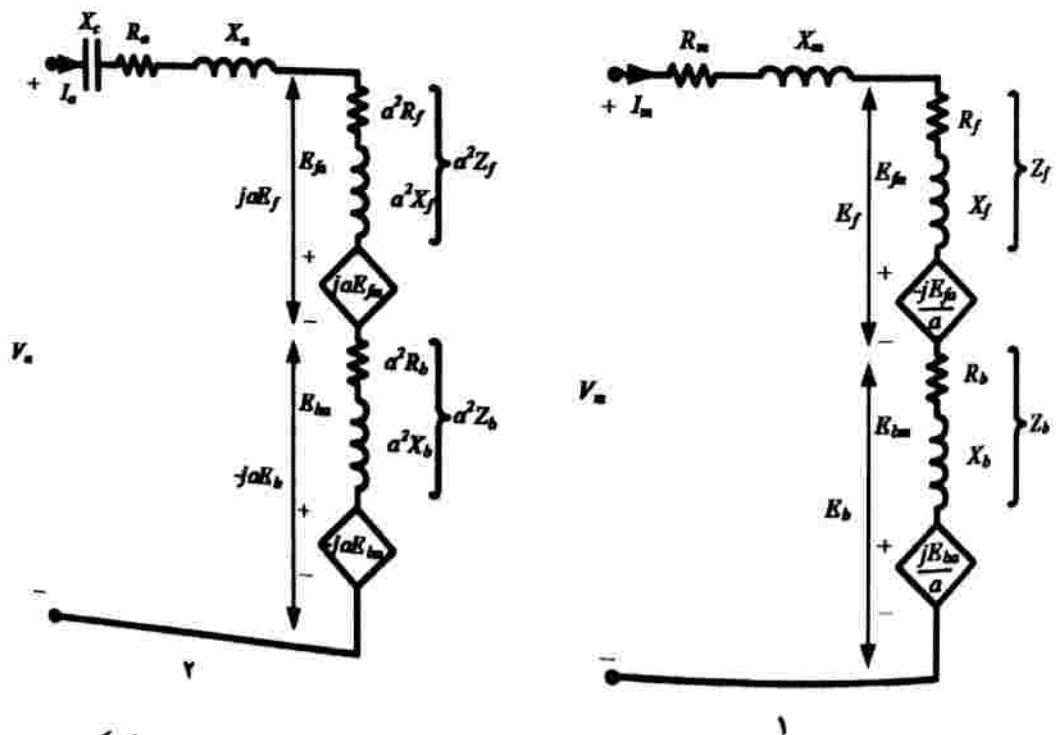


شکل ۲۹.۳ مدار معادل از دید سیم‌پیچی اصلی در موتور خازن دائم.

اگر میدانی در حال چرخش داشته باشیم، ولتاژ القاشده به تعداد دورها و همین‌طور به اختلاف فاز یا موقعیت مکانی سیم‌پیچی‌ها بستگی دارد. به عبارت دیگر اگر سیم‌پیچی با 90° اختلاف فاز و نیز میدانی در حال چرخش داشته باشیم، ولتاژ القاشده در این‌ها نیز اختلاف فازی خواهد داشت.



شکل ۳.۳ مدار معادل از دید سیم‌پیچی کمکی در موتور خازن دائم.



شکل ۳.۳.۱ مدار معادل موتور خازن دائم ۱. از دید سیم‌پیچی اصلی ۲. از دید سیم‌پیچی کمکی.

توجه داریم که محور سیم‌پیچی اصلی و محور سیم‌پیچی فرعی 90° با هم اختلاف فاز دارند. ولتاژی که از دید سیم‌پیچی کمکی دیده می‌شود، همان ولتاژی است که از دید سیم‌پیچی اصلی

به همراه ضریب نسبت دورها دیده می‌شود. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} E_{fm} &= Z_f I_m \\ E_{bm} &= Z_b I_m \end{aligned} \quad (58.3)$$

$$\begin{aligned} E_{fa} &= a' Z_f I_a \\ E_{ba} &= a' Z_b I_a \end{aligned} \quad (59.3)$$

پس منابع ولتاژ به جریان‌هایی که از سیم‌پیچی‌ها عبور می‌کند، بستگی دارند. اگر I_m و I_a را داشته باشیم، همه پارامترها برحسب آن‌ها محاسبه می‌شود. مقدار ولتاژ و مقادیر مربوط به روتور و استاتور نیز معمولاً مشخص‌اند. مقدار $a = N_a / N_m$ نیز معین است. پس با نوشتن روابط به دو معادله دو مجهول می‌رسیم، که قابل حل است:

$$V_m = V = V_a \quad (60.3)$$

$$V_m = I_m (R_m + jX_m + Z_f + Z_b) - \frac{E_{fa}}{a} j + \frac{E_{ba}}{a} j \quad (61.3)$$

$$V_a = I_a (R_a + jX_a + jX_c + a' Z_f + a' Z_b) + jaE_{fm} - jaE_{bm} \quad (62.3)$$

با جایگذاری مقادیر ولتاژها برحسب جریان‌ها به دو معادله با دو مجهول I_a و I_m می‌رسیم. بعد از به دست آوردن I_a و I_m سایر پارامترها قابل محاسبه‌اند:

$$Z_f = \frac{X_m}{\gamma} j \parallel \left(\frac{jX_r}{\gamma} + \frac{R_r}{\gamma s} \right) \quad (63.3)$$

اگر s را برابر با ۱ بگذاریم (شرایط راه‌اندازی)، می‌توانیم جریان راه‌اندازی و... را حساب کنیم. توان‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_m = (1-s) \cdot \text{توانی که از فاصله هوایی عبور می‌کند} \quad (64.3)$$

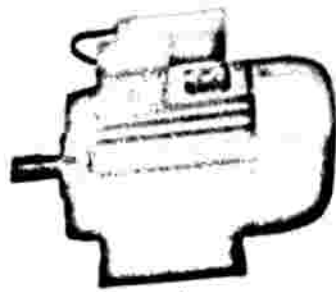
$$P_m = (1-s)(P_{gf} - P_{gb}) \quad (65.3)$$

$$P_{gf} = \text{Real}\{E_f I_m^* + jaE_f I_a^*\} \quad (66.3)$$

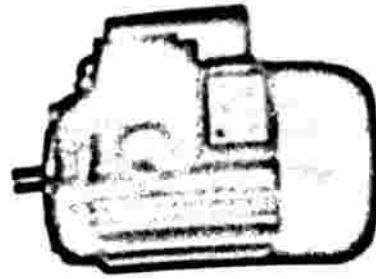
$$P_{gb} = \text{Real}\{E_b I_m^* - jaE_b I_a^*\} \quad (67.3)$$

$$E_f = Z_f I_m - \frac{E_{fa}}{a} j \quad (68.3)$$

$$E_b = Z_b I_m + \frac{E_{ba}}{a} j$$



(۲)



(۱)

شکل ۳۲.۳ موتور القائی با خازن ۱. دائم، ۲. راه انداز.

حال به بررسی گشتاور می پردازیم. گشتاور تولید شده توسط موتور، شامل مؤلفه های جلوگرد و عقب گرد می باشد.

$$T = T_f - T_b = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_s} \quad (۶۹.۳)$$

با جایگذاری می توان عبارت زیر را به دست آورد.

$$P_{gf} - P_{gb} = \text{Real}[(E_f - E_b)I_m^* + ja(E_f + E_b)I_a^*] \quad (۷۰.۳)$$

با توجه به اینکه $I_a = |I_a| \angle \theta_a$ و $I_m = |I_m| \angle \theta_m$ می توان رابطه بالا را ساده سازی کرد.

$$P_{gf} - P_{gb} = (|I_m|^2 + |aI_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_m||I_a|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m) \quad (۷۱.۳)$$

در شرایط راه اندازی لغزش برابر با یک می شود، بنابراین با قرار دادن لغزش برابر با یک در رابطه بالا می توان گشتاور راه انداز را محاسبه کرد.

$$T_{\text{start}} = \frac{2a|I_m||I_a|(R_f + R_b)}{\omega_s} \sin(\theta_a - \theta_m) = KI_a I_m \sin \alpha \quad (۷۲.۳)$$

در شکل ۳۲.۳ نمونه ای از موتور با خازن راه انداز و نیز موتور با خازن دائم نشان داده شده است.

مثال ۶.۳ یک موتور القائی تک فاز خازن دائم ۲۲۰ ولتی، ۵۰ هرتزی داریم. پارامترهای این موتور به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} X_m &= 3 \Omega & R_m &= 1.5 \Omega & R'_r &= 1 \Omega \\ X_a &= 3 \Omega & R_a &= 2.5 \Omega & X'_r &= 2.5 \Omega \\ X_{\text{mag}} &= 42 \Omega \end{aligned}$$

در این موتور همچنین نسبت تبدیل سیم‌پیچی کمکی به اصلی برابر با یک فرض می‌شود و نیز خازن دائم این موتور برابر با ۲۵ میکروفاراد در نظر گرفته می‌شود. با فرض سرعت ۱۴۲۵ دور بر دقیقه:

- (الف) مدار معادل را به دست آورید.
 (ب) تحت ولتاژ نامی جریان راه‌اندازی و نیز گشتاور راه‌اندازی را حساب کنید.
 (ج) اگر بخواهیم گشتاور ماکزیمم را به ازای جریان راه‌اندازی داشته باشیم، مقدار خازنی را که باید موازی با خازن دائم قرار دهیم، محاسبه کنید.

حل

(الف) با توجه به اینکه سرعت موتور برابر با ۱۴۲۵ دور بر دقیقه داده شده است، می‌توان تعداد قطب را محاسبه کرد:

$$1425 = \frac{120 \times 50}{P} \rightarrow p = 4$$

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500$$

$$s = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05$$

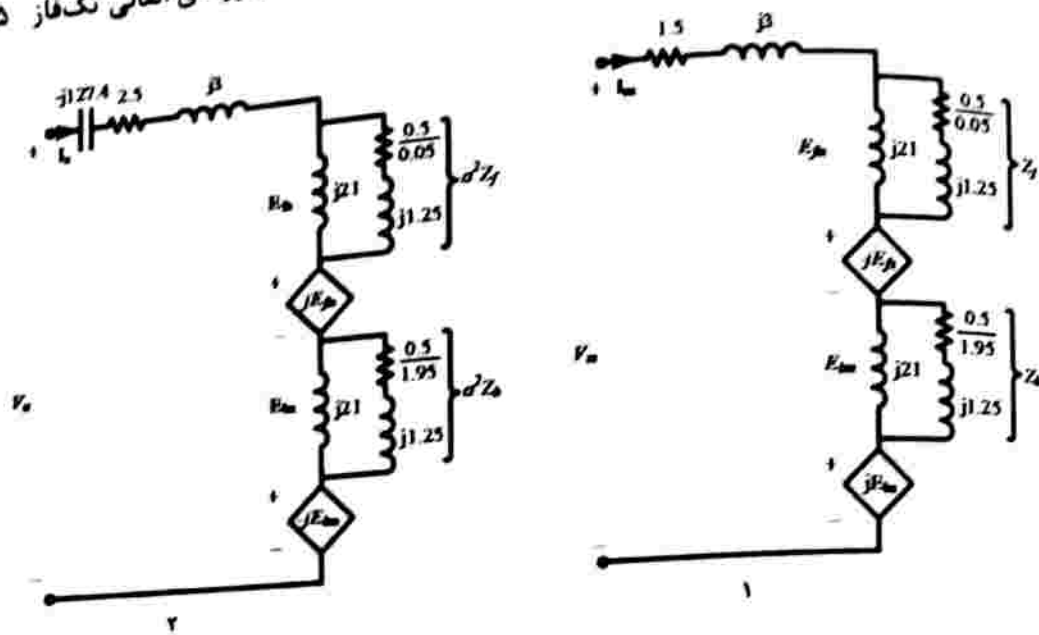
و نیز با توجه به اینکه مقدار خازن داده شده است، می‌توان X_C را محاسبه کرد.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 25 \times 10^{-6}} = 127.4$$

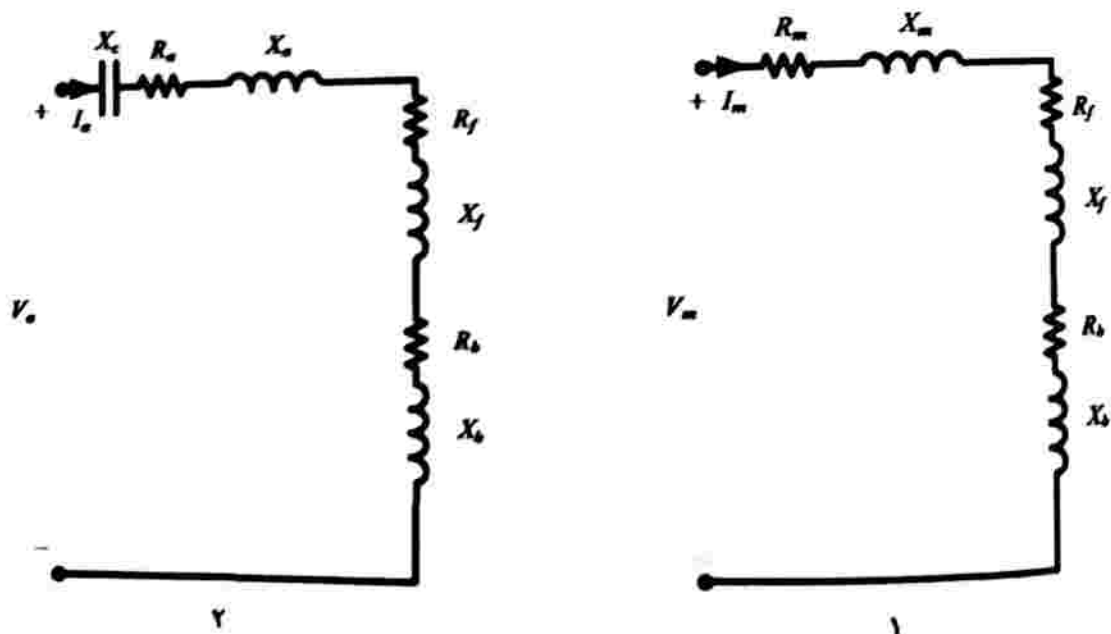
حال می‌توان مدار معادل مربوط به این موتور را به صورت شکل ۳۳.۳ رسم کرد.
 (ب) در شرایط راه‌اندازی لغزش برابر با یک است. بنابراین در راه‌اندازی داریم:

$$Z_f = Z_b = 21j \parallel (0.05 + 1.25j) = 1.27 \angle 69.5^\circ$$

و نیز در این حالت $E_{fm} = E_{bm}$ و نیز $E_{fa} = E_{ba}$ است. در شرایط راه‌اندازی مدار معادل به صورت شکل ۳۴.۳ به دست می‌آید.



شکل ۳۳.۳ مدار معادل موتور خازن دائم با قرار دادن مقادیر ۱. از دید سیم‌پیچی اصلی ۲. از دید سیم‌پیچی کمکی.



شکل ۳۴.۳ مدار معادل در شرایط راه‌اندازی ۱. از دید سیم‌پیچی اصلی ۲. از دید سیم‌پیچی کمکی.

حال داریم:

$$V_m = (R_m + jX_m + R_f + jX_f + R_b + jX_b) I_m$$

$$\rightarrow 220 \angle 0^\circ = (1.5 + 3j + 2(1.27 \angle 69.5^\circ)) I_m$$

$$\rightarrow I_m = 37.4 \angle -66.14^\circ$$

با توجه به اینکه a نسبت تبدیل سیم‌پیچی کمکی به اصلی است، داریم:

$$V_a = (R_a + jX_a - jX_c + a^2(R_f + jX_f + R_b + jX_b))I_a$$

$$\rightarrow 220 \angle 0^\circ = (2,5 + 3j - 127,4j + 2(1,27 \angle 69,5^\circ))I_a$$

$$\rightarrow I_a = 1,8 \angle 88,4^\circ$$

برای محاسبه جریان راه‌اندازی باید دو جریان مربوط به سیم‌پیچی اصلی و کمکی را در شرایط راه‌اندازی با هم جمع کنیم:

$$I_{\text{start}} = 37,4 \angle -66,14^\circ + 1,8 \angle 88,4^\circ = 35,78 \angle -64,9^\circ \text{ A}$$

گشتاور راه‌اندازی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$T_{\text{start}} = \frac{2(37,4)(1,8) \times 2 \times 0,44}{1500 \times 2\pi / 60} \sin(88,4 + 66,14) = 0,324 \text{ N.m}$$

(ج) با توجه به شکل مداری که در بالا برای راه‌اندازی موتور خازن دائم ارائه شد، حال می‌توان امپدانس سیم‌پیچی اصلی و کمکی را بدون در نظر گرفتن خازن به صورت زیر بیان کرد:

$$Z_M = Z_m + Z_f + Z_b = (1,5 + 3j) + 2(1,27 \angle 69,5^\circ)$$

$$= 2,39 + 5,28j = 5,9 \angle 66^\circ$$

$$Z_A = Z_a + Z_f + Z_b = (2,5 + 3j) + 2(1,27 \angle 69,5^\circ)$$

$$= 3,39 + 5,28j = 6,26 \angle 57,8^\circ$$

حال با توجه به رابطه (۵۷.۳) می‌توان کل خازن موردنیاز را محاسبه کرد.

$$X_c = 5,28 + \frac{-5,28 \times 3,39 + 5,9 \sqrt{3,39(3,39 + 2,39)}}{2,39} = 8,68 \Omega$$

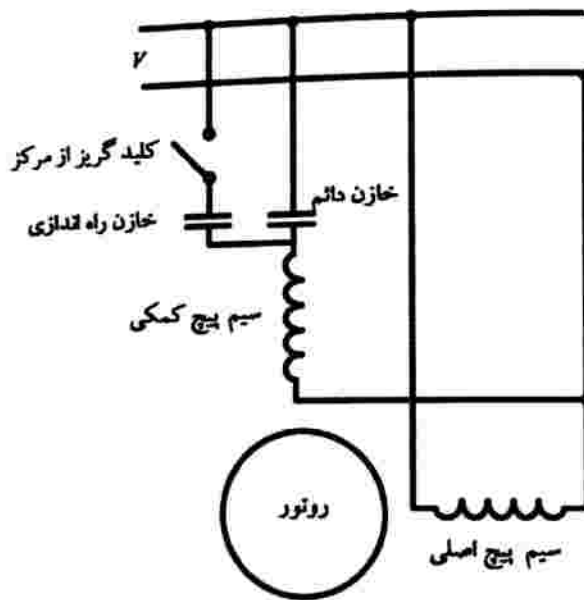
$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 8,68} = 367 \mu\text{F}$$

بنابراین باید حاصل موازی کردن خازن اصلی و خازن جدید برابر با ۳۶۷ میکروفاراد شود. بر همین اساس می‌توان مقدار خازن موازی با خازن اصلی را محاسبه کرد.

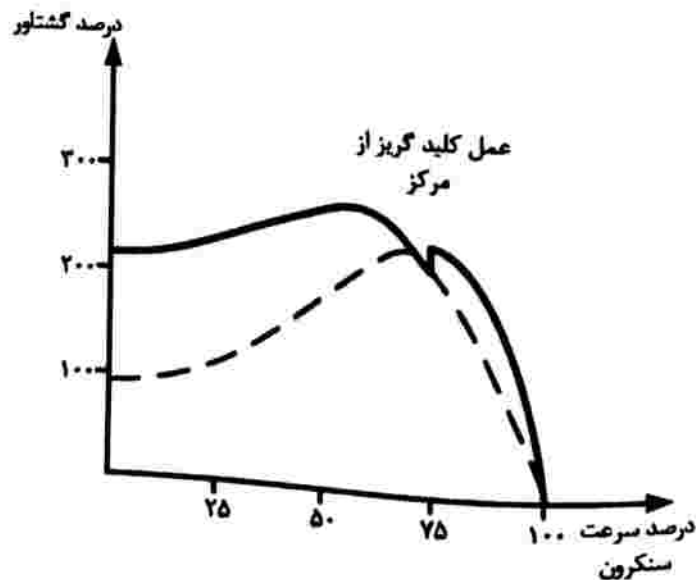
$$C_{\text{shunt}} = 367 - 25 = 342 \mu\text{F}$$

۴.۶.۳ موتورهای دوخازنی

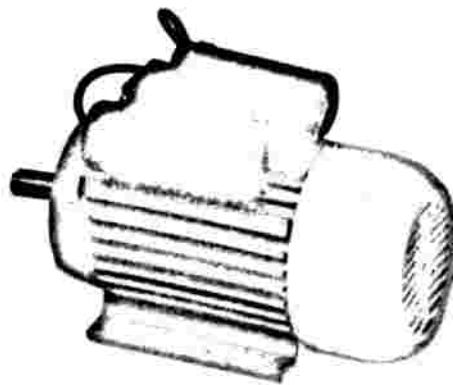
اگر بخواهیم موتوری داشته باشیم که بازده مناسبی داشته باشد، نرم کار کند و همچنین دارای گشتاور راه‌اندازی و گشتاور نامی مطلوب باشد، از موتورهای دوخازنی استفاده می‌کنیم که به دلیل وجود خازن راه‌انداز گشتاور راه‌اندازی بالایی دارند و نیز به علت وجود خازن دائم نرم کار می‌کنند و بازده مطلوب دارند. این موتور متشکل از دو سیم‌پیچی است که شمای کلی آن به صورت شکل ۳۵.۳ است. شکل‌های ۳۶.۳ و ۳۷.۳ نیز شمایی از موتور دوخازنی را نشان می‌دهد. خازن دوم در شرایط راه‌اندازی در مدار است و ظرفیت خازن مدار را افزایش می‌دهد و باعث افزایش گشتاور راه‌اندازی می‌شود. اندازه خازن دائمی طوری انتخاب می‌شود که موتور در شرایط



شکل ۳۵.۳ شمای کلی موتور دوخازنی.



شکل ۳۶.۳ نمودار گشتاور-سرعت موتور دوخازنی.



شکل ۳۷.۳ شمای موتور دوخازنی.

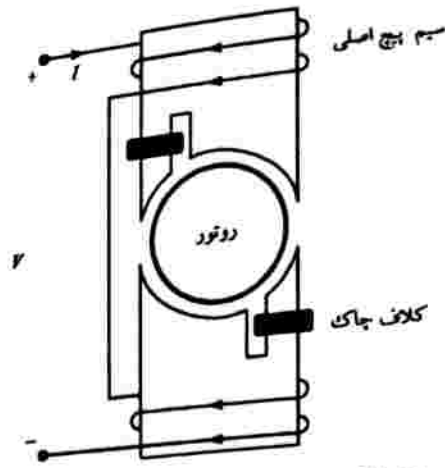
کار عادی با گشتاور و ضریب توان بالا (۰.۸-۰.۹۵) و بازده مطلوب (حدود ۷۰٪) کار کند. در این‌گونه موتورها، خازن دائم از نوع روغنی و حدوداً $1/15$ تا $1/10$ خازن راه‌انداز، که از جنس الکترولیتی است، انتخاب می‌شود. با توجه به المان‌های اضافی که در مدار وجود دارد، این موتور از تمام موتورهایی که تا حالا بررسی شد، گران‌تر است.

۵.۶.۳ موتور قطب چاک‌دار

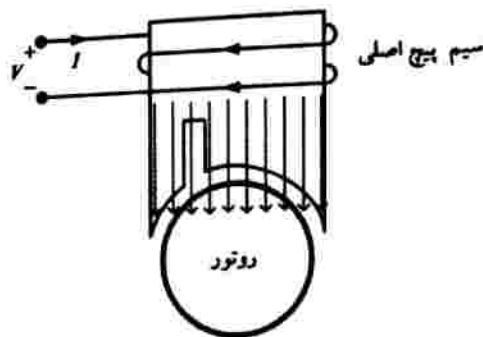
موتورهای قطب چاک‌دار در رنج‌های توانی پایین ساخته می‌شوند. ساختمان روتور این موتورها شبیه سایر موتورهای تک‌فاز القائی است، اما استاتور آن‌ها برخلاف سایر موتورهای تک‌فاز از نوع قطب برجسته است که سیم‌پیچی استاتور به صورت متمرکز روی این قطب‌ها پیچیده شده است. ساختار این موتور را در شکل ۳۸.۳ می‌توان دید.

علت نامگذاری قطب چاک‌دار برای این موتورها از آن جهت است که بر روی قطب‌های استاتور شکاف یا چاکی تعبیه شده است که قطب را به دو قسمت نامساوی تقسیم می‌کند همان‌طور که در شکل بالا دیده می‌شود، بر روی قسمت کوچک‌تر یک حلقه مسی اتصال کوتاه‌شده قرار گرفته است. حلقه مسی مذکور در واقع نقش سیم‌پیچ کمکی یا راه‌انداز را در این موتور ایفا می‌کند. اگر حلقه مسی در قسمت چاک وجود نداشته باشد، در این صورت با اعمال ولتاژ و عبور جریان از این سیم‌پیچی جهت شار به صورت شکل ۳۹.۳ خواهد بود.

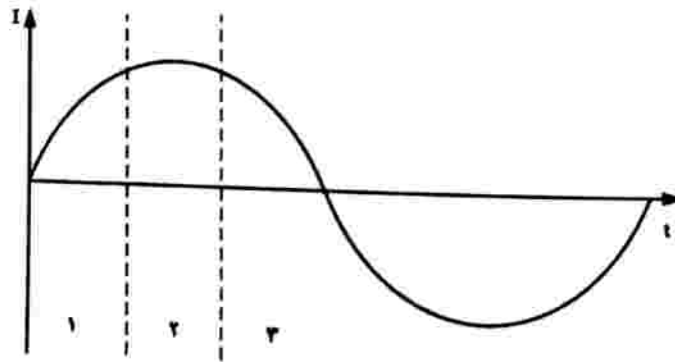
به منظور بیان نحوه راه‌اندازی در این موتورها شکل جریان عبوری از سیم‌پیچی استاتور را در نظر بگیرید. جریان استاتور یک جریان سینوسی است که یک پرپود از آن در شکل زیر نشان داده شده است همان‌طور که در شکل ۴۰.۳ دیده می‌شود، ناحیه مثبت جریان را می‌توان به سه قسمت تقسیم کرد. در قسمت اول شیب مربوط به جریان مثبت است. در قسمت دوم تقریباً جریان دارای شیب صفر و در قسمت سوم، جریان دارای شیب منفی است. حال وضعیت شار عبوری از قطب‌های استاتور را برای این سه حالت بررسی می‌کنیم.



شکل ۳۸.۳ شمای کلی موتور قطب چاک‌دار.

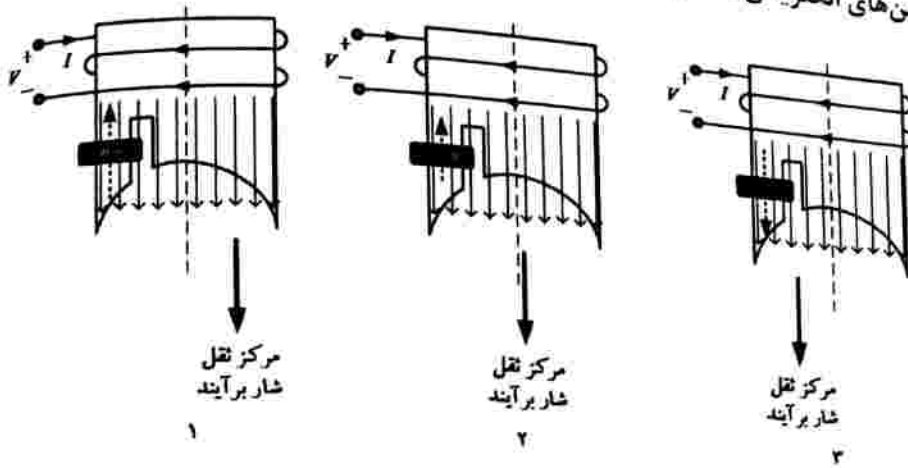


شکل ۳۹.۳ جهت تولید شار در موتور قطب چاک‌دار بدون حلقه اتصال کوتاه مسی.

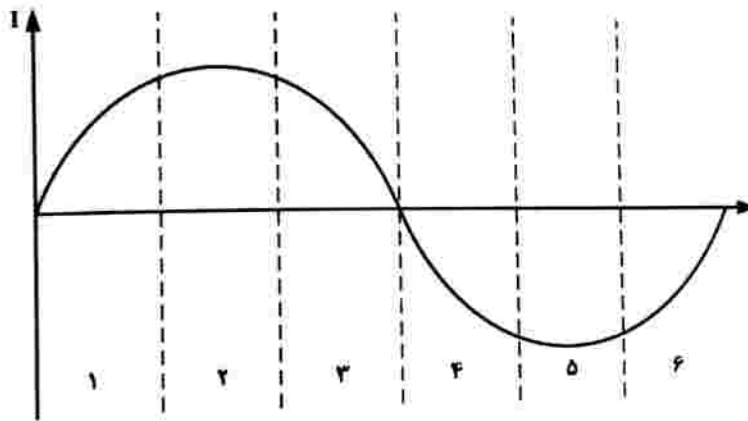


شکل ۴۰.۳ تقسیم‌بندی ناحیه مثبت جریان استاتور.

همان‌طور که در شکل ۴۱.۳ دیده می‌شود، در قسمت اول به دلیل شیب مثبت جریان، جهت شار ایجادشده توسط حلقه مسی، در خلاف جهت شار اصلی است (با عامل به وجودآورنده خود مخالفت می‌کند). در قسمت دوم به دلیل تغییرات تقریباً صفر در جریان، مقدار این شار مخالف بسیار کمتر می‌شود و در قسمت سوم به دلیل شیب منفی جریان، جهت این شار تغییر می‌کند. این عوامل سبب می‌شود که مرکز ثقل شار برآیند در هر قسمت تغییر کند. حال اگر جریان تغذیه موتور را پس از معکوس شدن در سه قسمت در نظر بگیریم، می‌توان شکل ۴۲.۳ را رسم کرد.



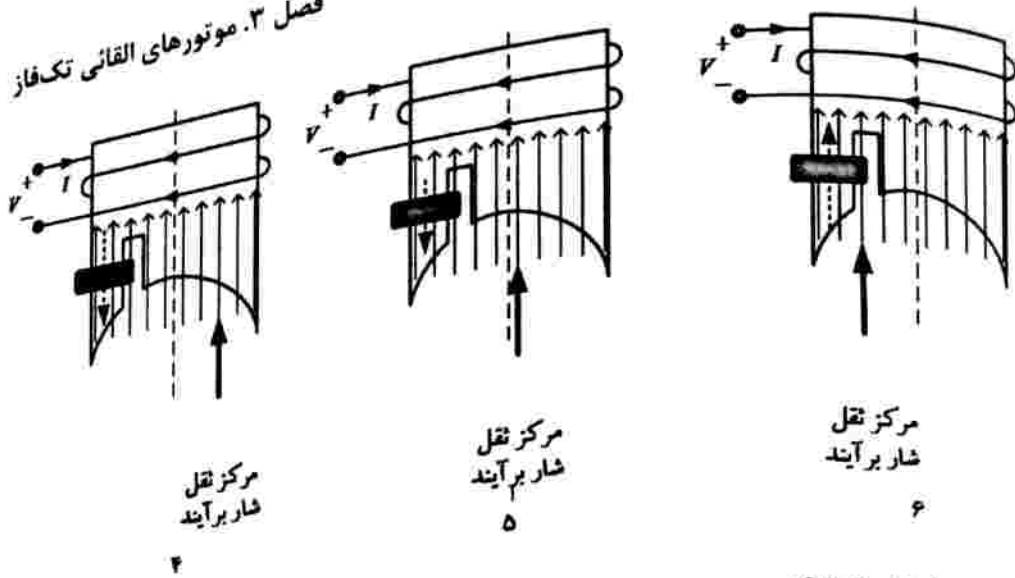
شکل ۴۱.۳ وضعیت شار عبوری از قطب‌های استاتور در قسمت مثبت جریان استاتور.



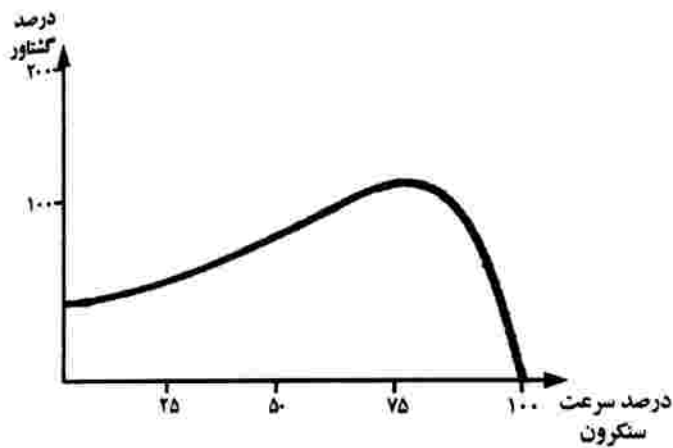
شکل ۴۲.۳ تقسیم‌بندی ناحیه مثبت و منفی جریان استاتور.

در شکل ۴۲.۳ دیده می‌شود که در قسمت‌های ۴ و ۵ و ۶ به ترتیب ما شاهد شیب منفی، شیب صفر و شیب مثبت هستیم. بنابراین شکل ۴۳.۳ را می‌توان برای وضعیت شار بیان کرد. در این شکل مشاهده می‌شود که شار ایجادشده در حلقه اتصال کوتاه در خلاف جهت حالت قبلی است. مرکز ثقل شار برآیند نیز در خلاف جهت حالت قبلی است. ولی همچنان از سمت راست به سمت چپ حرکت می‌کند. با توجه به بحث‌های فوق مشخص شد که مرکز ثقل یا تمرکز شار که در واقع همان قطب‌های مغناطیسی اند، از سمت راست (بخش بزرگ‌تر قطب) به سمت چپ (بخش کوچک‌تر قطب) در حال حرکت است. سرعت حرکت این قطب متناسب با فرکانس جریان عبوری از قطب است. بنابراین تعبیه حلقه مسی بر روی قطب چاک‌دار، باعث ایجاد یک میدان دوار بر روی استاتور می‌شود. اکنون با وجود این میدان دوار موتور گشتاور راه‌اندازی دارد و می‌تواند شروع به چرخش کند. البته واضح است که میدان دوار ایجادشده، میدانی نسبتاً کوچک است و از این رو گشتاور راه‌اندازی قطب چاک‌دار گشتاور کوچکی است. لذا عملکرد و بازده این موتورها نیز ضعیف است.

فصل ۳. موتورهای القائی تک فاز ۱۳۱



شکل ۴۳.۳ وضعیت شار عبوری از قطب‌های استاتور در قسمت منفی جریان استاتور.



شکل ۴۴.۳ منحنی گشتاور-سرعت موتور قطب چاک‌دار.

منحنی گشتاور سرعت یک موتور نوعی قطب چاک‌دار در شکل ۴۴.۳ نشان داده شده است که در این موتورها گشتاور راه‌اندازی پایین است. یکی از نکات مهم در مورد موتورهای قطب چاک‌دار این است که این موتورها فقط در یک جهت می‌چرخند (از سمت قطب چاک‌خورده به سمت قطب چاک‌خورده)، درحالی‌که برای موتورهای تک‌فاز دیگر کافی است که جهت یکی از سیم‌پیچی‌ها را عوض کنیم تا جهت چرخش عوض شود (روی موتور کلیدی هست که سربندی را عوض می‌کند و جهت چرخش عوض می‌شود). از موتورهای قطب چاک‌دار در پنکه‌ها و اسباب‌بازی‌هایی که به گشتاور راه‌انداز کم نیاز است و نیز سشوارها استفاده می‌کنند. مهم‌ترین ویژگی موتورهای تک‌فاز قطب چاک‌دار قیمت پایین آن‌هاست و اضافه کردن امکانات باعث افزایش قیمت می‌شود. این موتورها در توان‌های ۱/۲۰ hp ساخته می‌شوند و بازده آن‌ها ۲۵٪ و زیر ۲۵٪ است که بازده خیلی کمی است ولی از لحاظ قیمت خیلی ارزان هستند.

۷.۳ مقایسه ویژگی‌های موتورهای القایی تک‌فاز

در این قسمت می‌خواهیم مقایسه‌ای میان موتورهای تک‌فاز بیان شده در قسمت‌های قبل انجام دهیم. موتورهای فاز شکسته از ساده‌ترین نوع موتورهای تک‌فازند. طراحی این موتورها آسان و لذا ارزان است. گشتاور راه‌اندازی این موتور ۱ تا ۱/۷۵ برابر گشتاور نامی‌اش است که نشان می‌دهد این موتور برای راه‌اندازی بارهای با گشتاور زیاد مناسب نیست. در کنار آن جریان راه‌اندازی این موتور بسیار زیاد و حدود ۷ تا ۱۰ برابر جریان نامی است. حداکثر گشتاور این موتور ۲/۵ تا ۳ برابر گشتاور نامی آن است. گستره توان این موتور از ۴۰ تا ۲۵۰ وات است. با توجه به این خصوصیات این موتور برای آسیاب‌ها، فن‌ها، دمنده‌های کوچک و پرس‌های مت‌های مناسب است.

طراحی موتورهای خازن راه‌انداز پیچیده‌تر و لذا گران قیمت‌ترند. گشتاور راه‌اندازی این موتورها ۲ تا ۴ برابر گشتاور نامی‌اند. و جریان راه‌اندازی آن‌ها ۴/۵ تا ۵/۷۵ برابر جریان نامی است که از هر دو جهت نسبت به نوع قبلی مناسب‌ترند. این موتورها با توانی تا ۱/۱ کیلووات تولید می‌شوند. کاربرد این موتورها در تسمه‌نقاله‌های کوچک، پمپ‌های بزرگ و کمپرسورهای هواست.

موتورهای خازن دائم نوع دیگری از موتورهای تک‌فازند. گشتاور راه‌اندازی این موتورها ۰/۳ تا ۱/۵ برابر گشتاور نامی است که چندان مناسب نیست. اما جریان راه‌اندازی آن‌ها کم و حداکثر ۲ برابر جریان نامی است. از مزایای این موتورها عدم نیاز به کلید گریز از مرکز و همچنین قابلیت طراحی موتور برای بازده بهینه و ضریب توان بالاست. این ویژگی‌ها این موتور را به یکی از مطمئن‌ترین انواع موتورهای تک‌فاز تبدیل کرده است. کاربرد این موتورها در فن‌ها و موتورهای بازکننده در پارکینگ‌هاست.

موتورهای دو خازنی محاسن هر دو نوع موتورهای خازن دائم و خازن راه‌انداز را دارند. امکان طراحی این موتورها برای حداکثر بازده با حداقل جریان نامی باعث می‌شود این موتور در شرایط کاری یکسان در دمای کمتری نسبت به سایر موتورهای تک‌فاز کار کند. عمده‌ترین عیب این موتور قیمت بالای آن است. این موتورها در رنج توان ۷۰۰ وات تا ۱/۱ کیلووات ساخته می‌شوند و در صنایع چوب، کمپرسورهای هوا، پمپ‌های خلأ و پمپ‌های آب فشار قوی کاربرد دارند.

آخرین نوع موتور، موتور قطب چاک‌دار است. گشتاور راه‌اندازی این موتور بسیار کم و حدود ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ گشتاور نامی است. جریان راه‌اندازی این موتور ۲ برابر جریان نامی است. این موتور دارای لغزش زیاد و بازده بسیار کم و در حدود ۲۰٪ است. در مقابل، ساختمان این موتور ساده و لذا قیمت آن کم است و می‌تواند تا ۱/۵ برابر بار نامی در کوتاه‌مدت بارگذاری شود. کاربرد این موتورها در فن‌های چندسرعتی و برخی اسباب‌بازی‌هاست و بیشتر مصارف خانگی دارند. این موتورها به علت گشتاور کم، بازده کم و استقامت مکانیکی پایین استفاده صنعتی زیادی ندارند. جدول ۱.۳ را می‌توان به منظور مقایسه موتورهای بیان شده به کار برد.

جدول ۱.۳ مقایسه موتورهای القائی تک‌فاز

موتور	فاز شکسته	خازن راه‌انداز	خازن دائم	دوخازنی	قطب چاک‌دار
گستره توانی (وات)	تا ۲۵۰	تا ۱۱۰۰	تا ۱۱۰۰	تا ۱۱۰۰	تا ۴۰
نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی	۷-۱۰	۴٫۵-۵٫۷۵	۲ تا		تا ۲
نسبت گشتاور ماکزیمم به گشتاور نامی	۲٫۵-۳	۳٫۵	۲/۵	۳	۱٫۵
نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور نامی	۱-۱٫۷۵	۲-۴	۰٫۳-۱٫۵	۲-۳	۰٫۲۵-۰٫۷۵
بازده (درصد)	۵۵-۶۵	۵۵-۶۵	۶۰-۷۰	۶۰-۷۰	۲۵-۴۰
ضریب تولن	۵۰-۶۵	۵۰-۶۵	۷۵-۹۰	۸۰-۹۵	۲۵-۴۰
قیمت (درصد)	۱۰۰	۱۲۵	۱۴۰	۱۸۰	۶۰
کاربردها	آسیاب، پنکه‌ها	تسمه نقاله کوچک، کمپرسور هوا، ماشین لباسشویی	فن‌ها، دمنده با صدای کم	پمپ خلأ کمپرسور با صدای کم و گشتاور راه‌اندازی بالا	سشوار، آسیاب بازی‌ها

۸.۳ مسائل

۱. یک موتور القائی فاز شکسته یک سوم اسب بخار، ۱۱۰ ولت، ۶۰ هرتز، و ۶ قطب دارای ابعادهای زیر است.

$$X_{mag} = 59.8 \Omega \quad X_1 = 2 \Omega \quad R_1 = 1.43 \Omega$$

$$X_2' = 1.5 \Omega \quad R_2' = 3.2 \Omega$$

تلفات هسته در این موتور ۲۵ وات و نیز سایر تلفات شامل اصطکاک و بادخوری و سرگردان ۱۰ وات است. موتور با ولتاژ و فرکانس نامی کار می‌کند و سیم‌پیچ راه‌انداز آن مدار باز و لغزش آن ۵ درصد است. در این شرایط موارد زیر را محاسبه کنید.

(الف) جریان استاتور و ضریب توان
(ب) توان ورودی، گشتاور حاصل، توان خروجی، بازده، توان عبوری از فاصله هوایی و تلفات اهمی