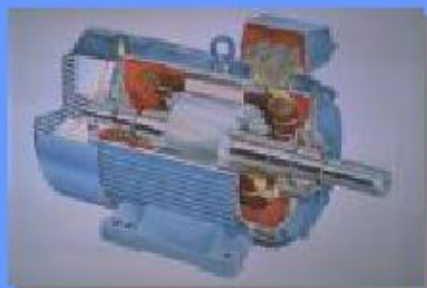


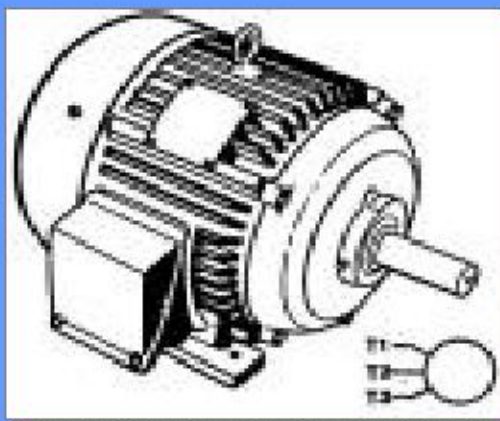


مزایا و معایب موتورهای القایی سه فاز



مزایای موتورهای القایی سه فاز :

- خود راه انداز هستند.
- عدم نیاز به تعمیر و نگهداری
- ارزان هستند
- سادگی ساختمان و استحکام

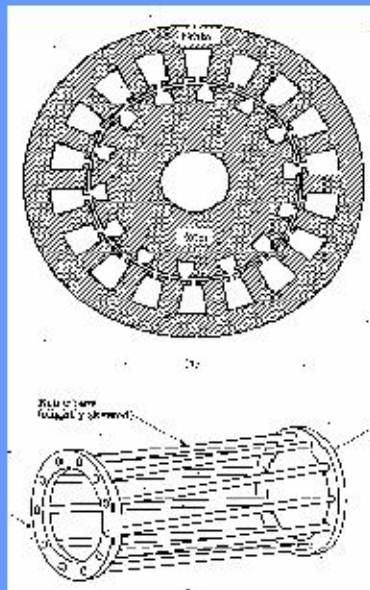


معایب موتورهای القایی سه فاز :

- سرعت ثابت نیست.
- کنترل دور آن به نسبت به موتورهای دیگر سخت تر است.
- ضریب قدرت نسبتاً پایین و ثابت

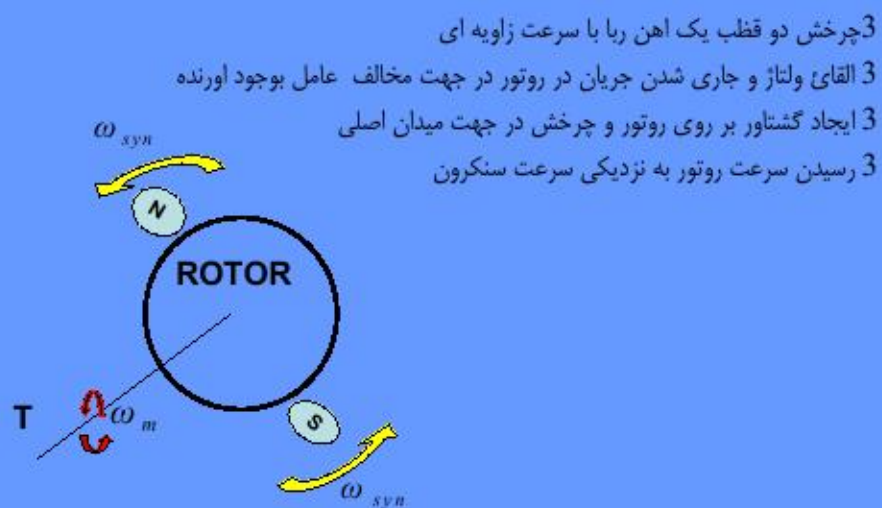


ساختمان موتورهای القایی سه فاز:



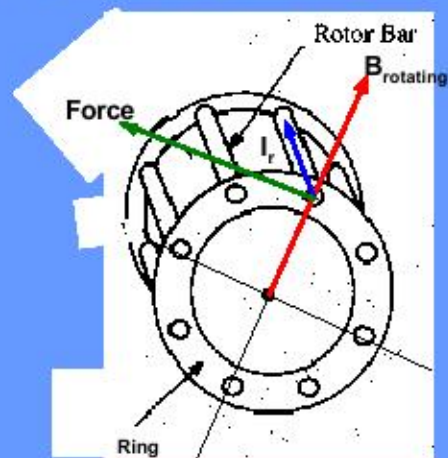


نحوه کار موتور القایی



نحوه کار موتور القایی

ایجاد گشتاور بر روی روتور و چرخش در جهت میدان اصلی





نحوه کار موتور القایی

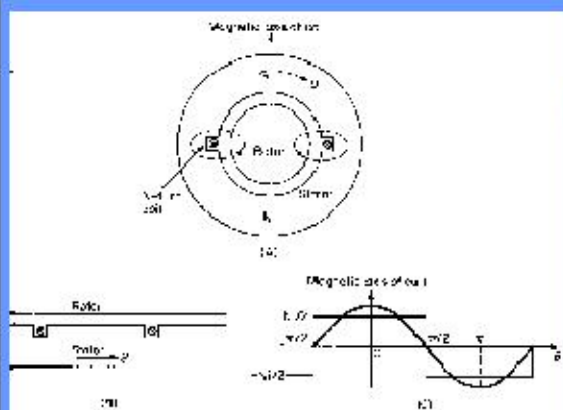
3) اساس کار ماشینهای القایی سه فاز میدان گردان می باشد

3) خطوط شار در فاصله هوایی به شکل شعاعی هستند

3) اندازه میدان مغناطیسی در فاصله هوایی ثابت است



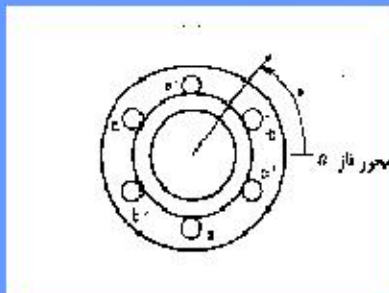
تئوری میدان گردان



$$F_a = \begin{cases} \frac{N i_a}{2} & -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ -\frac{N i_a}{2} & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

$$F_a = K \cdot i_a \cdot \cos \theta$$

تئوری میدان گردان



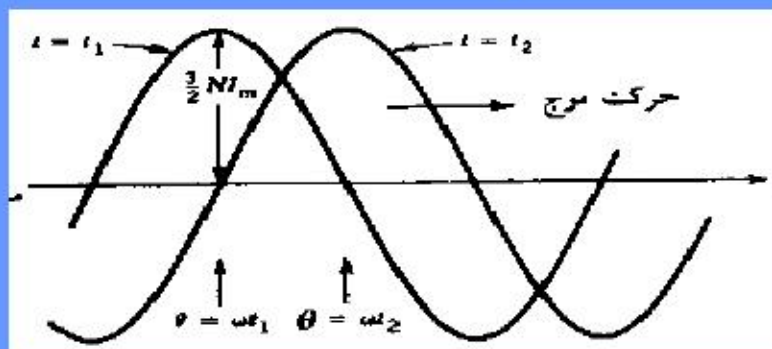
$$\begin{cases} F_a = K i_a \sin \theta \\ F_b = K i_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ F_c = K i_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin \omega t \\ i_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$F = F_a + F_b + F_c$$

$$\rightarrow F = k I_m [\sin \theta \sin \omega t + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})]$$

$$\rightarrow F = \frac{3}{2} k I_m \cos(\theta - \omega t)$$

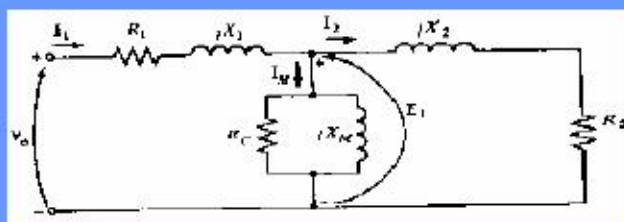
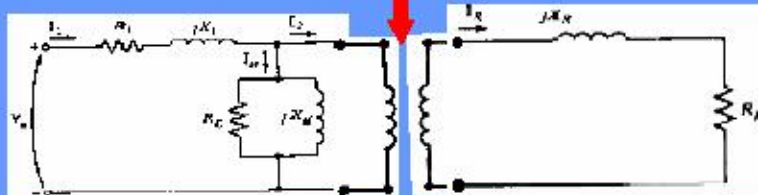




تحليل رفتار موتور القایی سه فاز

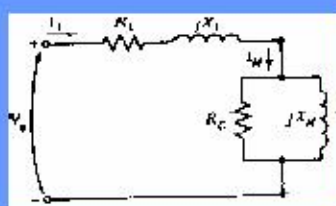
استفاده از مدل معادل ترانس اتصال کوتاه:

ترانس ایدال



تحليل رفتار موتور القایی سه فاز

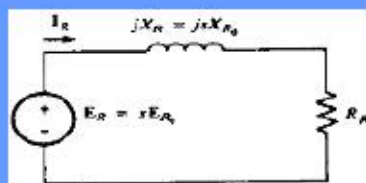
مدل موتور ساکن:



$$\frac{E_s}{E_{R0}} = \frac{N_s}{N_r}$$



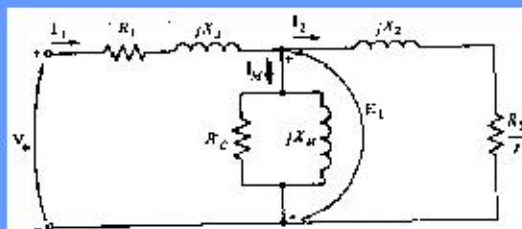
مدار معادل روتور متحرک:



$$X_R = 2\pi \cdot f_r \cdot L_r$$



مدار معادل کلی در موتور القایی و ساده سازی آن



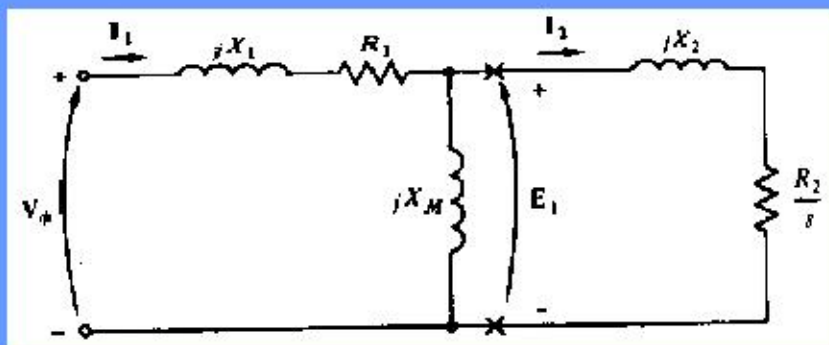
$$s.E_r = R_r.I_r + js.X_r.I_r \quad \longrightarrow \quad E_r = \frac{R_r}{s}.I_r + jX_r.I_r$$

جریان تحریک ماشین القایی نسبت به ترانس درصد بزرگتری دارد و بهمین دلیل انتقال شاخه موازی به انتهای مدار خطای بیشتری دارد.



محاسبه پارامترهای موتور القایی

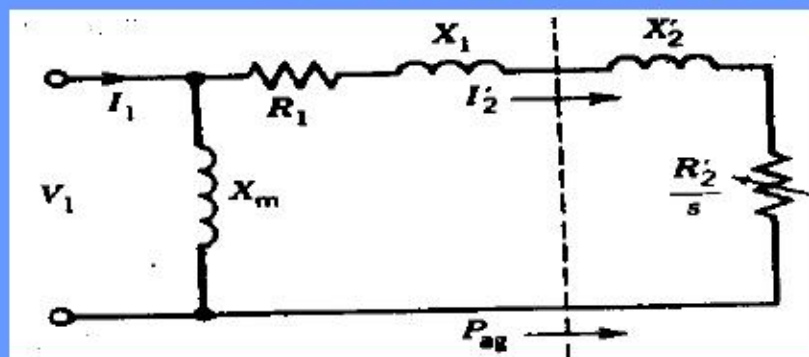
برای محاسبه پارامترهای مربوط به موتور القایی از آزمایشهای بی‌باری، مقاومتی و رتور قفل شده استفاده می‌کنیم.



مدار معادل ساده شده موتور القایی



و در یک شکل ساده‌تر می‌توانیم شاخه موازی را به ابتدای مدار منتقل کنیم که در این صورت محاسبات مربوطه ساده‌تر خواهد شد. و در حالت دقیق‌تر مدار معادل تونن از دید شاخه موازی به صورت روبروست.



مدار معادل تونن از دید شاخه X_m

توان و گشتاور در موتور القایی



توان فاصله هوایی P_g : توانی که از استاتور عبور می‌کند و به فاصله هوایی می‌رسد

$$P_g = 3 \left(\frac{R_2}{s} I_2^2 \right)$$

توان مکانیکی: همان توان فاصله هوایی است که تلفات اهمی روتور از آن کم شده:

$$P_m = P_g - 3R_2 I_2^2 = (1-s)P_g$$

$$\omega_r = (1-s)\omega_s$$

ω_r سرعت چرخش موتور است



$$\begin{cases} T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_g}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s} \\ T_m = \frac{P_g}{\omega_s} \end{cases} \rightarrow P_g = 3 \frac{R_2}{s} \frac{V_1^2}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

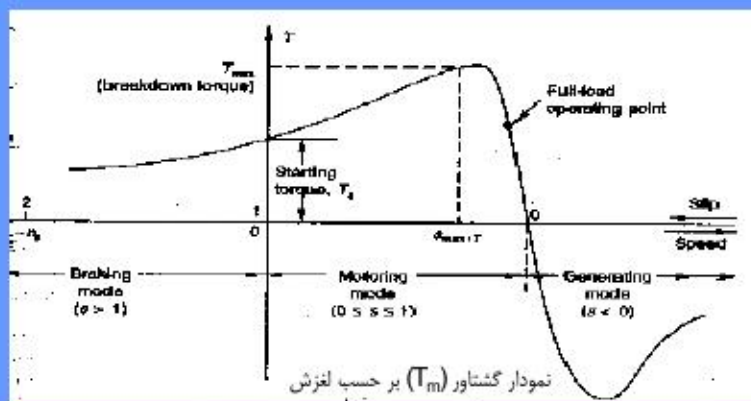
در این رابطه اگر موتور مستقیماً به شبکه وصل شود، V_1 ثابت است و اگر از تأثیرات درجه حرارت روی مقاومت‌ها و راکتانسها صرفنظر کنیم این پارامترها مقادیر ثابتی هستند به عبارت دیگر توان فاصله هوایی تابعی از لغزش خواهد بود



$$T_m = 3 \frac{R_2}{s\omega_s} \frac{V_1^2}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

و برای گشتاور نیز خواهیم داشت:

اگر فرکانس منبع و ولتاژ ثابت باشند، گشتاور تابعی از لغزش خواهد بود.





گشتاور ماکزیمم

نقطه‌ای که در آن گشتاور ماکزیمم است نقطه گشتاور ماکزیمم یا گشتاور شکست یا گشتاور برون کش گفته می‌شود.

در منحنی گشتاور - سرعت اگر شیب منحنی مثبت باشد سیستم ناپایدار است، ولی هر جا شیب منفی داریم سیستم پایدار است.

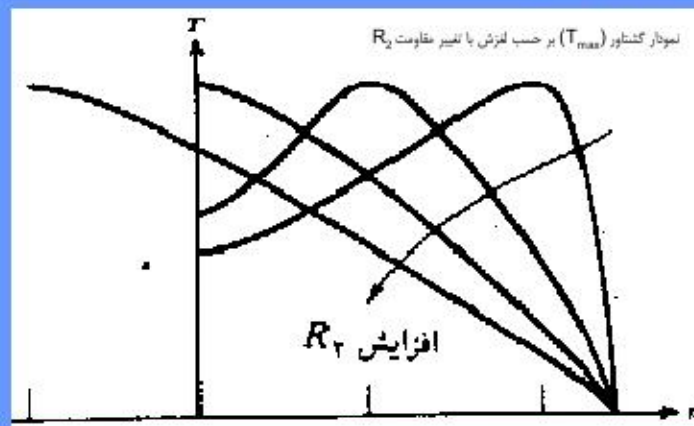
برای بدست آوردن T_{max} و S_{Tmax} از قضیه انتقال توان استفاده می‌کنیم.

$$\Rightarrow \begin{aligned} S_{Tmax} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \\ T_{max} &= \frac{3V_1^2}{\omega_s} \frac{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2})^2 + (X_1 + X_2)^2} \end{aligned}$$

راه اندازی موتور القایی با رتور سیم پیچی شده



اگر در موتور القایی R_2 را زیاد کنیم در این صورت T_{max} تغییری نمی‌کند ولی S_{Tmax} افزایش پیدا می‌کند.





در موتورهای با روتور سیم‌پیچی شده در هنگام راه‌اندازی مقاومت را زیاد می‌کنیم. به این ترتیب گشتاور راه‌اندازی زیاد می‌شود. ضمناً افزایش مقاومت باعث کاهش جریان راه‌اندازی می‌شود.

با زیاد شدن گشتاور و در نتیجه افزایش توان جریان کم می‌شود. چون با زیاد کردن مقاومت اصلاح ضریب توان انجام می‌دهیم و با اصلاح ضریب توان در عین حال که جریان را کم کرده‌ایم توان حقیقی را زیاد کرده‌ایم.

راه اندازی موتور القایی قفس سنجایی



- افزایش مقاومت رتور

- استفاده از مداره ستاره-مثلث (راه‌انداز ستاره-مثلث): علاوه بر اینکه پیکر کم می‌شود، گشتاور هم کم می‌شود پس ستاره - مثلث روش مناسبی نیست.

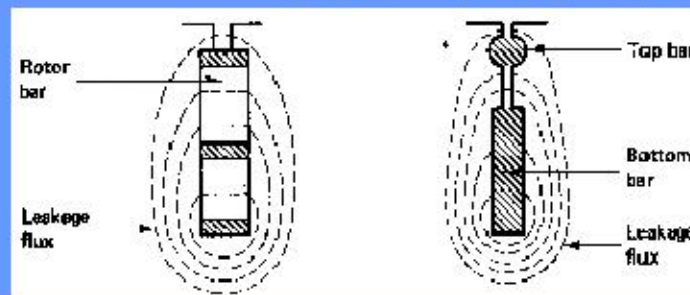
- راه انداز پله‌ای

فرکانس ولتاژ القا شده در روتور در شرایط سکون و راه‌اندازی فرکانسی حدود فرکانس استاتور است، ولی فرکانس ولتاژ القا شده در روتور در کار نامی حدود صفر است. پس تغییر شدید فرکانس داریم. از این خاصیت در طراحی موتورهای القایی استفاده می‌شود.

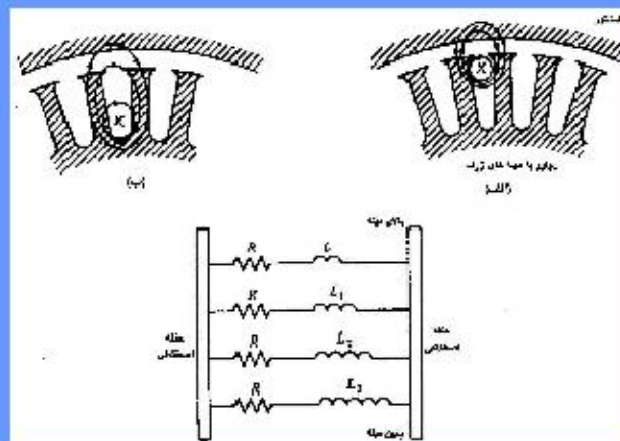


موتورهای القایی از نوع شیاری عمیق

در نوع شیاری عمیق، شیاری مربوط به میله‌های روتور را عمیق می‌گیرند و به سمت مرکز روتور می‌برند. وقتی شیاری عمیق بگیریم در $f_r = 50\text{Hz}$ راکتانس پراکندگی زیاد می‌شود، چون شار پراکندگی زیاد می‌شود. در حالت سکون راکتانس پراکندگی خصوصاً در قسمت مرکز زیاد می‌شود و جریان را به سمت بالا هل می‌دهد چون X پراکندگی در قسمت بالا کم است. همچنین چون سطح موثر میله کوچک می‌شود مقاومت افزایش می‌یابد.



در شرایط کار نامی با فرض $S=4\%$ و $f_r=2\text{Hz}$ راکتانس پراکندگی کوچک می‌شود و جریان به صورت یکنواخت در سطح پخش می‌شود، سطح موثر میله زیاد شده و مقاومت کم می‌شود.



شکل استاتور و روتور در موتورهای با میله‌های ژرف



موتورهای القایی از نوع دو قفسه‌ای

اگر بخواهیم گشتاور راه انداز زیاد و جریان راه اندازی کم باشد، می توان از رتورهای قفس سنجابی مضاعف استفاده کرد. رتورهای قفس سنجابی مضاعف (دوبل) از دو قفس تشکیل شده اند:

- قفس بیرونی یا قفس فوقانی

- قفس درونی یا قفس تحتانی

میله های هر دو قفس از دو انتها بوسیله حلقه های انتهایی اتصال کوتاه شده‌اند.



لازم به تذکر است که:

سطح مقطع قفس بیرونی از سطح مقطع قفس درونی کمتر است.

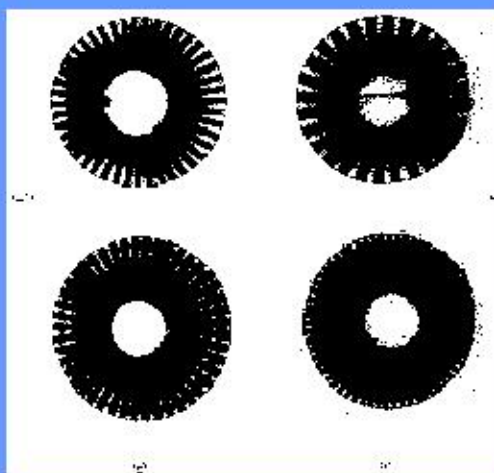
مقاومت ویژه ماده قفس بیرونی از مقاومت ویژه ماده قفس درونی بیشتر است.

با توجه به بندهای فوق مقاومت قفس بیرونی از مقاومت قفس درونی بیشتر است.

با باریک کردن شیار بین دو قفس، راکتانس نشتی قفس درونی نسبت به قفس بیرونی بیشتر می شود.



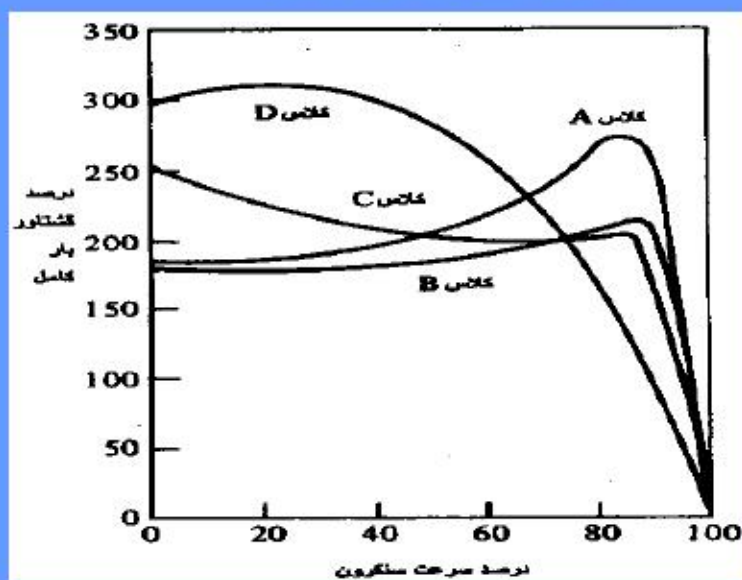
کلاسهای مختلف موتورهای القایی



روتور در کلاس های مختلف موتور القایی

طراحان موتورهای القایی طبق استاندارد NEMA کلاس های مختلفی را تعریف کرده اند که بر طبق این تقسیم بندی ۴ کلاس داریم که گشتاور نامی یکسانی دارند ولی تفاوتشان در T_{st} و T_{max} و نحوه تغییر مقاومت مدار رتور است.

نمودار گشتاور - سرعت کلاس های مختلف موتور القایی





مساله

یک موتور القایی سه فاز، ۴ قطب، 230V، 60Hz، دو قفسه‌ای دارای پارامترهای معادل زیر می‌باشد.

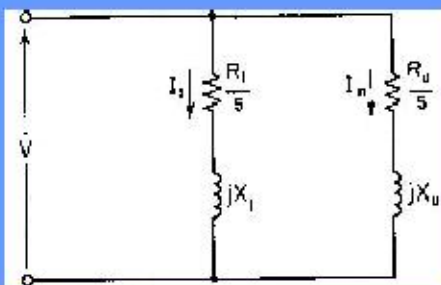
$$R_u = 2.4\Omega \quad X_u = 1\Omega \quad R_L = 0.24\Omega \quad X_L = 4.2\Omega$$

از امپدانس استاتور و اثر متقابل قفسه‌ها صرف‌نظر می‌کنیم. مطلوبست محاسبه گشتاور و جریان ایجاد شده در قفسه بالائی و پائینی در زمان راه‌اندازی و در بار کامل با لغزش 4%.



حل مساله

موتور دو قفسه‌ای دو قفس دارد و در مدار معادل دو قسمت بالا و پائین با یکدیگر موازی شده‌اند.



شکل مدار مساله

$$V_{ph} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8V$$

$$z_L = \frac{0.24}{s} + j4.2 \quad z_u = \frac{2.4}{s} + j$$

در شرایط راه‌اندازی $S=1$

$$z_u = 2.4 + j \quad z_L = 0.24 + j4.2 \quad \leftarrow$$



$$\rightarrow I_u = \frac{u_p}{z_u} = 51.08 \angle -22.62 \quad I_L = \frac{u_p}{z_L} = 31.58 \angle -86.73$$

چون افت توان روی امپدانس استاتور را نداریم در نتیجه توان فاصله هوایی همان توان ورودی است.

$$n_s = \frac{120 \cdot 60}{4} \quad \omega_s = 60\pi$$

$$T_u = \frac{3I_u^2 R}{s\omega_s} = 99.66 (N.m)$$

$$T_L = 3.81 (N.m)$$

در لحظه راه اندازی

$$\rightarrow T_{total} = T_u + T_L = 103.47 (N.m)$$



در شرایط کار $S=0.04$

$$I_u = \frac{132.8}{\frac{2.4}{0.04} + j} = 2.21 \angle -0.95$$

$$I_L = \frac{132.8}{\frac{0.24}{0.04} + j4.2} = 18.13 \angle -34.99$$

$$T_u = 4.66 (N.m)$$

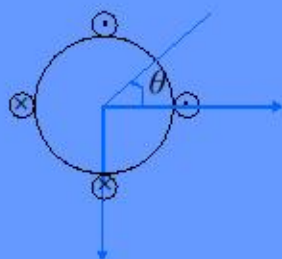
$$T_L = 31.39 (N.m)$$

$$\rightarrow T_{total} = 36.05 (N.m)$$

موتورهای القایی دو فاز



سیم پیچی استاتور شامل دو فاز است که با یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف دارند



$$\begin{cases} F_a = k.i_a.\cos\theta \\ F_b = k.i_b.\cos(\theta - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_b = I_m.\cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ i_a = I_m.\cos\omega t \end{cases}$$

$$\rightarrow F = F_a + F_b = k.I_m[\cos\theta.\cos\omega t + \sin\theta.\sin\omega t] = k.I_m.\cos(\theta - \omega t)$$

مؤلفه‌های متقارن در یک سیستم دو فاز



هر شبکه نامتعادل را می‌توانیم به سه شبکه متعادل تبدیل کنیم. اگر برای سیستم سه فاز نامتقارن یا نامتعادل، سه فاز متقارن را داشته باشیم:

$$V_a = V_a^+ + V_a^- + V_a^0$$

$$V_b = V_b^+ + V_b^- + V_b^0$$

$$V_c = V_c^+ + V_c^- + V_c^0$$

$$9 \quad \begin{cases} |V_a^+| = |V_b^+| = |V_c^+| = V^+ \\ |V_a^-| = |V_b^-| = |V_c^-| = V^- \end{cases}$$

$$[V_{abc}] = [F] \begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{bmatrix}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$$



$$[V^{+0}] = [F]^{-1} [V_{abc}] \quad , \quad [F]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

اگر عین همین کار را برای یک سیستم دو فاز انجام دهیم و فرض کنیم یک سیستم دو فاز نامتعادل داریم و از تبدیل به سیستم‌های متعادل استفاده کنیم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} V_A &= V_A^+ + V_A^- & , & & |V_A^+| = |V_B^+| = V^+ \\ V_B &= V_B^+ + V_B^- & & & |V_A^-| = |V_B^-| = V^- \end{aligned}$$



$$\left. \begin{aligned} |V^+| \square 0^\circ , & \quad |V^+| \square -\pi/2 \quad \text{سیستم جلوگرد} \\ |V^-| \square 0^\circ , & \quad |V^-| \square \pi/2 \quad \text{سیستم عقبگرد} \end{aligned} \right\} \text{سیستم دو فاز نامتعادل}$$

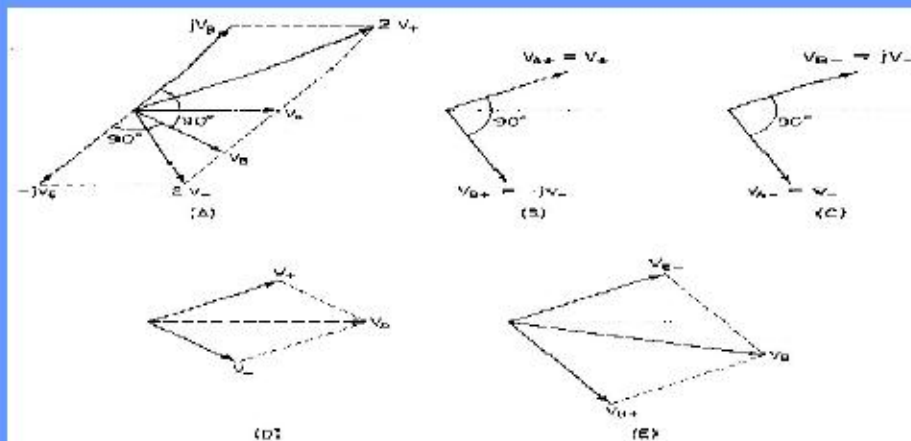
- V_A^+ و V_B^+ یک سیستم دو فاز متعادل را تشکیل می‌دهند که توالی فاز آن مشابه سیستم نامتعادل اصلی است.

- V_A^- و V_B^- یک سیستم دو فاز متعادل را تشکیل می‌دهند که توالی فاز آن مخالف جهت توالی فاز سیستم نامتعادل اصلی است.

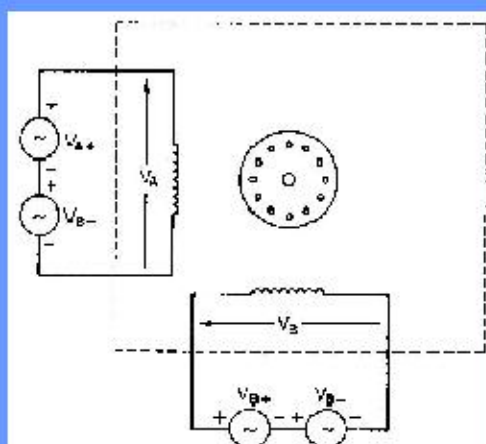
$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix}$$



مؤلفه های متقارن در سیستم دو فاز



تحلیل موتورهای القایی دو فاز در شرایط نامتعادل



برای تحلیل موتورهای القایی دو فاز در شرایط نامتعادل، از مؤلفه های متقارن استفاده می کنیم:

برای این منظور دو ولتاژ V_A و V_B را با دو منبع ولتاژ مربوط به توالی مثبت و منفی جایگزین می کنیم.



برای تحلیل بهتر موضوع یکبار مدل توالی مثبت را در نظر می‌گیریم و بار دیگر مدل توالی منفی را در نظر می‌گیریم.

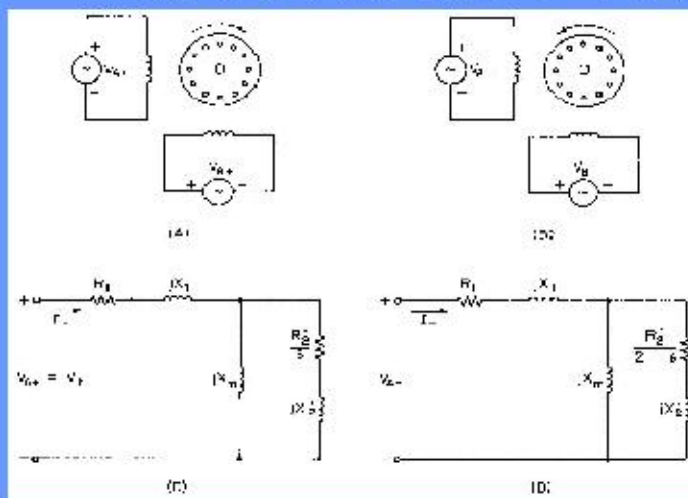
$$\left. \begin{aligned} S^+ &= \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \\ S^- &= \frac{(-\omega_s) - \omega_r}{-\omega_s} = \frac{\omega_r + \omega_s}{\omega_s} \end{aligned} \right\} \Rightarrow S^- = 2 - S^+$$

برای تحلیل یک سیستم دو فاز نامتعادل:

۱- ولتاژها را به مؤلفه‌های متقارن تقسیم می‌کنیم.



۲- دو مدار جداگانه تشکیل می‌دهیم و آنها را تحلیل می‌کنیم و I^+ و I^- را حساب می‌کنیم و از روابط ماتریسی، I_A و I_B را حساب می‌کنیم و سایر پارامترهای مورد نیاز را به دست می‌آوریم.



کاربرد قانون جمع آثار



تمرین:

یک موتور القایی دو فاز، به سیستم نامتعادل زیر متصل است

$$\begin{cases} V_A = 115 \angle 0^\circ \\ V_B = 75 \angle -\pi/2 \end{cases}$$

توان ورودی به فاز A تحت ضریب قدرت 0.39 پسفاز، 464W بوده و توان ورودی به فاز B تحت ضریب قدرت 0.267 پسفاز، 123W در لغزش 0.2 می باشد.

الف: جریان فازهای A و B را محاسبه کنید.

ب: امپدانس فازهای A و B را محاسبه کنید.

ج: اگر امپدانس سیم پیچی ها (امپدانس استاتور $Z_A, Z_B = 2.3 + j4$) باشد و از تلفات هسته و چرخشی صرف نظر کنیم، توان خروجی و بهره ماشین را به دست آورید.



تمرین:

الف: به سهولت داریم:

$$I_A = \frac{464}{115(0.39)} \angle -\cos^{-1} 0.39 = 10.346 \angle -67.046^\circ$$

$$I_B = \frac{123}{75(0.267)} \angle (-90 - \cos^{-1} 0.267) = 6.142 \angle -164.514^\circ$$

ب: به راحتی داریم:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = \frac{115 \angle 0^\circ}{10.346 \angle -67.046^\circ} = 11.116 \angle 67.046^\circ$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{75 \angle -90^\circ}{6.142 \angle -164.514^\circ} = 12.21 \angle 74.514^\circ$$



تمرین:

ج - به راحتی داریم:

$$Z_+ = Z_{i+} - Z_1 = 0.782 + j6.838$$

$$Z_- = Z_{i-} - Z_1 = 1.909 + j3.697$$

لذا:

$$P_{g+} = 2|I_+|^2 R_+ = 2(8.228)^2 (0.782) = 105.883 \text{ W}$$

$$P_{g-} = 2|I_-|^2 R_- = 2(2.165)^2 (1.909) = 17.896 \text{ W}$$



تمرین:

توان حاصله توسط رتور که همان توان خروجی است، به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} P_m &= (1-s)(P_{g+} - P_{g-}) \\ &= (1-0.2)(105.883 - 17.896) = 70.39 \text{ W} \end{aligned}$$

توان ورودی به قرار زیر است:

$$P_{in} = P_A + P_B = 464 + 123 = 587 \text{ W}$$

بهره به شرح زیر است:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{70.39}{587} = 0.12$$



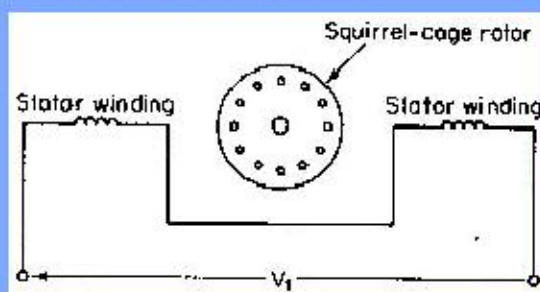
موتورهای القائی تکفاز

در موتور تکفاز یک سیم‌پیچی داریم و روتور از نوع قفس سنجابی است و استاتور فقط شامل یک سیم‌پیچ اصلی است.

ساختار موتور تکفاز

روتور (هسته، قفس سنجابی)

استاتور (هسته، یک سیم‌پیچ اصلی)

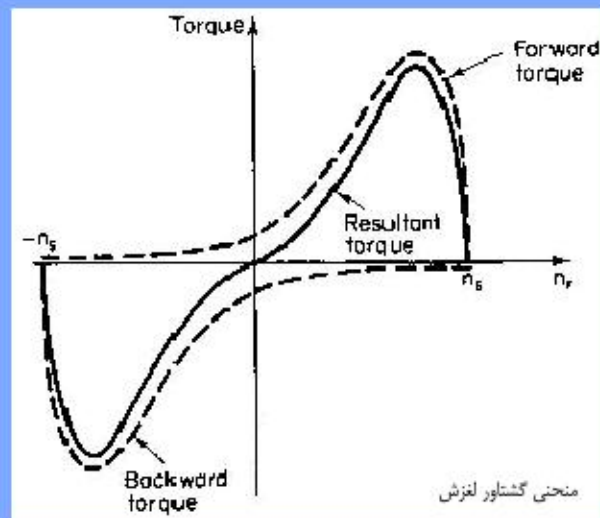


با فرض اینکه توزیع mmf مربوط به سیم‌پیچی‌ها سینوسی است

$$\begin{cases} F_a = k i_a \cos\theta \\ i_a = I_m \cos\omega t \end{cases} \rightarrow F = k I_m \cos\theta \cos\omega t$$

$$\rightarrow F = 0.5 k I_m [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)]$$

موج ضربانی متشکل از دو میدان مولفه جلوگرد و عقب گرد است (F_- , F_+) که دامنه‌شان ثابت است



مولفه برآیند گشتاور، مجموع دو حالت جلوگرد و عقب گرد است و در حالت راه اندازی چون گشتاور + و - مساویند لذا مقدار برآیند صفر است و این برخلاف موتورهای معمول دیگر است.

اگر بتوانیم به نوعی یکی از میدان ها را تقویت کنیم و یا اینکه اگر روتور را در یک جهت کمی بچرخانیم گشتاوری خواهیم داشت و روتور در همان جهت شروع به چرخیدن خواهد کرد.

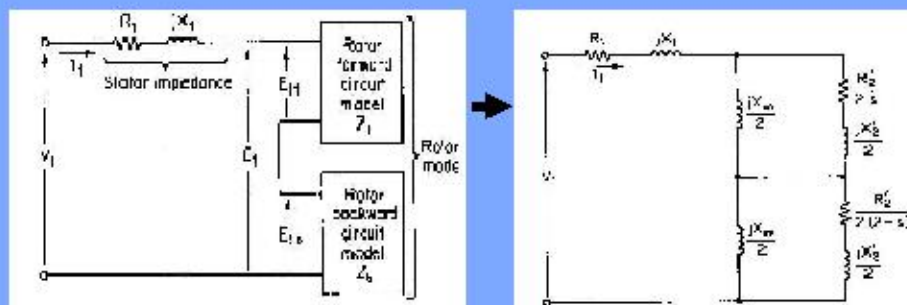
بنابراین مهمترین مسئله در موتورهای تکفاز، راه اندازی می باشد که دسته بندی موتورهای تکفاز نیز بر اساس نوع راه اندازی می باشد.

مدار معادل موتور القایی تکفاز



در لحظه سکون $E_s = E_r$ است و بنابراین مدار معادل زیر را داریم:

$$E_s = E_r = E/2$$

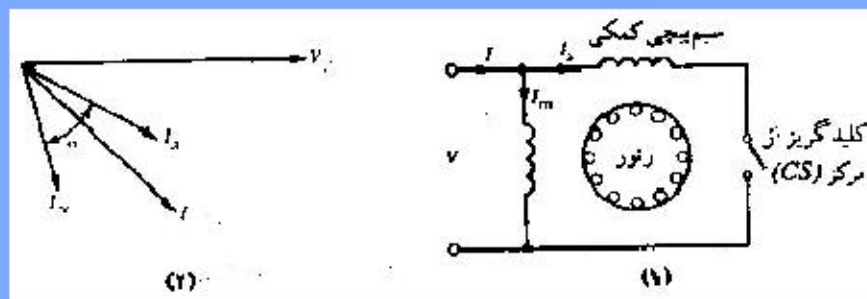


روشهای راه اندازی موتور القایی تکفاز



۱- موتورهای القایی تکفاز - فاز شکسته

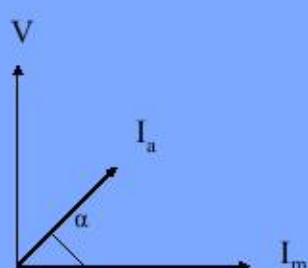
در موتور فاز شکسته یک سیم پیچی فرعی را در مدار قرار داده ایم و امپدانس سیم پیچی فرعی Z_a با امپدانس سیم پیچی اصلی Z_m متفاوت است.





در این وضعیت موتور تکفاز شبیه موتور دو فاز نامتعادل با اختلاف فاز ولتاژهای صفر و امپدانس‌های مختلف است. (تغذیه و سیم‌پیچی‌ها هر دو نامتقارن)

$$T_s = k I_m I_a \sin \alpha \quad (\text{گشتاور راه اندازی})$$



α = زاویه‌ای که جریان I_m با I_a می‌سازد.
 V = بردار ولتاژ القا شده



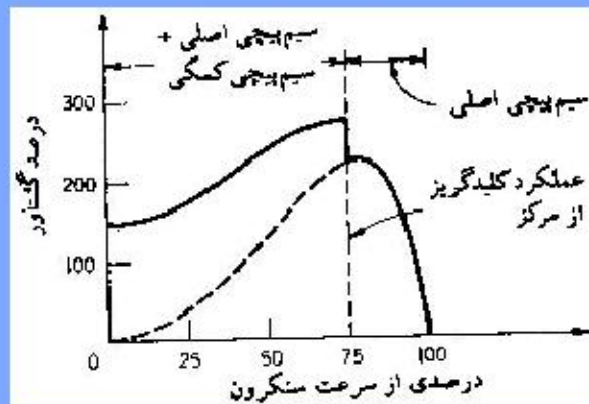
- سیم‌پیچی اصلی به گونه‌ای است که خاصیت سلفی دارد و سیم‌پیچی فرعی به گونه‌ای است که خاصیت اهمی دارد

- برای افزایش گشتاور راه‌اندازی لازم است $I_a \sin \alpha$ افزایش یابد با توجه به دیاگرام فوق R_a یک مقدار بهینه دارد که محاسبه R_a بهینه اهمیت زیادی پیدا می‌کند



عملکرد کلید گریز از مرکز

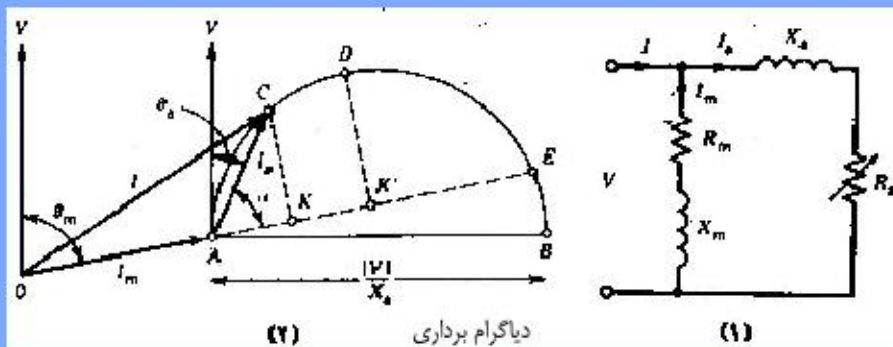
کلید گریز از مرکز یک کلید قابل تنظیم است که در ۶۰٪ یا ۷۰٪ دور نامی از مدار خارج می‌شود. سیم‌پیچی کمکی در حالت کار دائم از مدار خارج می‌شود زیرا که وجود این سیم‌پیچی در مدار تلفات سیستم را افزایش می‌دهد.



بهینه سازی مقدار Z_{th} از نظر طراحی

هدف این است که $I_a \sin \alpha$ را ماکزیمم کنیم که همان CK است. وقتی که میانه AE را K بنامیم مقدار ماکزیمم است و در واقع بردار I بر نیم‌دایره مماس خواهد شد.

$$DK = I_a \sin \alpha$$



$$\begin{cases} AD=DE \\ AK=KE \end{cases} \longrightarrow \theta_a = \theta_{gr}/2 = \alpha \longrightarrow \cot \theta_a = \cot \theta_{gr}/2$$

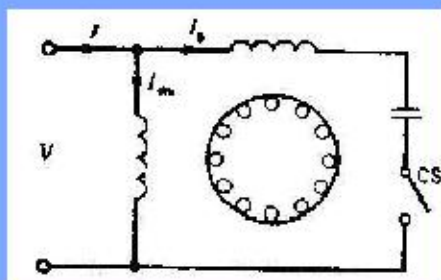
$$\cot \frac{\theta_{gr}}{2} = \frac{\cos \frac{\theta_{gr}}{2}}{\sin \frac{\theta_{gr}}{2}} = \frac{\cos \frac{\theta_a}{2}}{\sin \frac{\theta_a}{2} \cos \frac{\theta_a}{2}} = \frac{1 + \cos \theta_{gr}}{\sin \theta_{gr}}$$

$$\begin{cases} \tan \theta_a = X/R_a \\ \cos \theta_{gr} = R_m / |Z_m| \end{cases} \longrightarrow \begin{aligned} R_a &= \frac{x}{x_m} (R_m + |Z_m|) \\ R_a &= \left(\frac{N_a}{N_m} \right)^2 (R_m + |Z_m|) \end{aligned}$$

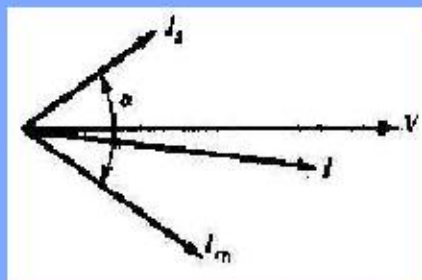
۲- موتور تکفاز از نوع خازن راه‌انداز



برای ماکزیمم کردن $I_a \sin \alpha$ محدودیت داریم چون بخاطر خاصیت سلفی بردار ولتاژ عقب‌تر از جریان است. ولی اگر درسیم‌پیچی کمکی یک خازن قرار دهیم به طوری که جریان به سمت همفازی و حتی پیشفازی از ولتاژ برود هم I_a و هم $\sin \alpha$ افزایش می‌یابد.



مدار معادل موتور خازن راه‌انداز



دیاگرام برداری در حالت خازن راه‌انداز

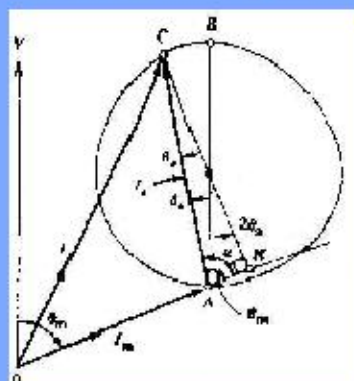
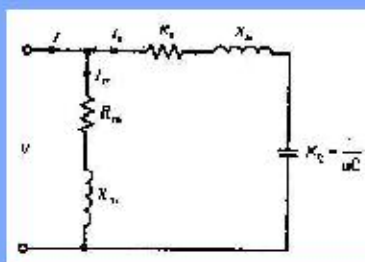
تعیین ظرفیت خازن



تعیین ظرفیت خازن با فرض اینکه گشتاور ماکزیمم شود

برای ماکزیمم شدن گشتاور راه اندازی لازم است $\cos \phi$ ماکزیمم شود یعنی از مرکز دایره عبور کند و با این فرض که $\cos \phi$ از مرکز دایره عبور کند ارتباط زوایا به صورت زیر است:

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



$$\angle AB, AC = \theta$$

$$\angle ACK = \angle AB, AC = \theta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \angle KCA = \theta_a \\ \angle KCA = 11/2 \times \theta_a \end{array} \right. \Rightarrow \theta = \frac{\pi/2 \times \theta_a}{2}$$

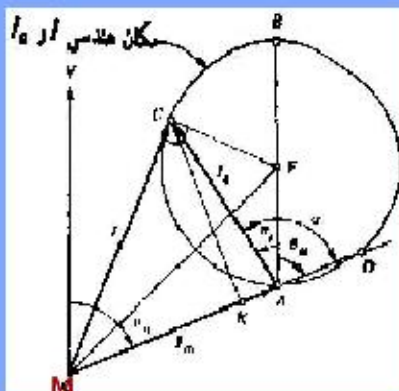
$$\tan \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{1 + \cos 2\theta} = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta}$$

$$\sin \theta = \frac{X_c}{Z}$$

$$\tan \theta = \frac{X_c - X_a}{R} \quad \text{و} \quad X_c > X_a \quad \text{در حالت پیشفرض}$$

$$\frac{X_c}{Z} = \frac{X_c - X_a}{R} \Rightarrow \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + (X_c - X_a)^2}} = \frac{X_c - X_a}{R} \Rightarrow X_c = X_a + \frac{R R_s}{|Z_s| + X_a}$$

تابع هدف: نسبت گشتاور راهاندازی به جریان راهاندازی $\frac{CK}{MC}$



هر وضعیت این نسبت ماکزیمم است که MC بر دایره مماس شود.

$\angle MCF = 11.5^\circ$

$$\Delta MCF = MF2 - MC2 + GF2$$

$$\triangle MFA: MF^2 = MA^2 + AF^2 - 2MA \cdot AF \cos 60^\circ = MA^2$$

$$\angle MAF = 11 - 0.01 \text{ rad} \quad \therefore CF = AF = \frac{r}{B} = 0.01 \text{ rad}$$

$$MC_2 = MA_2 - 2MA, AFC_0 \leq MA$$

در وضعیتی این نسبت ماکزیمم است که MC بر دایره محاس شود

$MA = I_c$
 $MC = I$
 $I^2 = I_c^2 + 2\left(\frac{I_c}{2R_g}\right)I_c\left(\frac{R_g}{Z_m}\right)$
 $I^2 = I_c^2\left(1 + \frac{R_g}{Z_m}\right)$
 $\left\{ \begin{array}{l} \frac{I_c}{I_c^2} = \frac{R_g + R_m}{R_g} \\ \frac{I_c}{I_c} = \frac{Z_m + Z_g}{Z_g} \end{array} \right.$

$$X_c = X_a + \frac{-X_m R_a + |Z_m| \sqrt{R_a(R_a + R_m)}}{R_m}$$

M

تمرین:



یک موتور القایی تکفاز از نوع فاز شکسته با مشخصات ۲.۱ kw و ۴ قطب و ۵۰ Hz ، 220 v و با پارامترهای زیر مدنظر می باشد:

$$R_m = 4.2 \Omega \quad X_m = 112 \Omega \quad R_g = 5.16 \Omega \quad X_g = 12.1 \Omega$$

$a = 1$ = نسبت تعداد دور سیم پیچی کمکی به تعداد دور سیم پیچی اصلی

$$X_m = 250 \text{ راکتانس شاخه مغناطیسی} \quad X_2 = 7.2 \Omega \text{ منتقل شده به اولیه} \quad R_2 = 7.45 \Omega$$

الف) گشتاور راه اندازی این موتور چقدر است؟

برای اینکه گشتاور راه اندازی ماکزیمم شود مقدار R_g چه مقدار می بایست تغییر کند

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

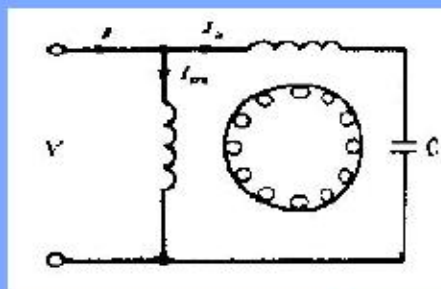


ج) بخش «ب» را برای ماکزیمم نمودن نسبت گشتاور راهاندازی به جریان راهاندازی تکرار کنید و مقادیر گشتاور در بخش‌های الف و ب و ج را با هم مقایسه کنید.
 د) اگر تلفات هسته و گردشی موتور 45 w باشد راندمان موتور را در حالتی که در لغزش ۴ درصد کار می‌کند محاسبه کنید. (در حالت دائم است و فقط سیم‌پیچی اصلی در مدار است و از مدار معادل تکفاز استفاده کنید).

۳- موتور خازن دائم



موتورهای خازن دائم طوری طراحی می‌شوند که دیگر کلید گریز از مرکز ندارند. فلسفه این موتورها این است که موتورهایی با راندمان بیشتر و سر و صدای کمتر داشته باشیم.

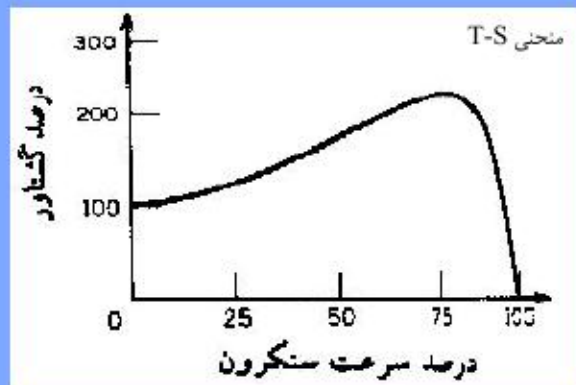


نمای شماتیک موتور خازن دائم

کلید گریز از مرکز نداریم ولی خازنی که در اینجا داریم دائم در مدار است پس کیفیت خازن باید مطلوبتر باشد و از خازن روغنی استفاده می‌کنیم.



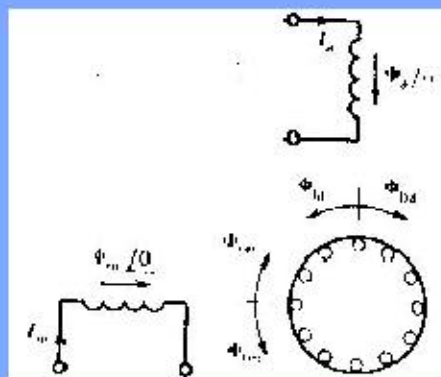
در این موتورها منحنی گشتاور سرعت یک منحنی پیوسته است. در حالت خازن دائم گشتاور نامی بهتری نسبت به خازن راهانداز داریم ولی گشتاور راهاندازی آن کمتر است.




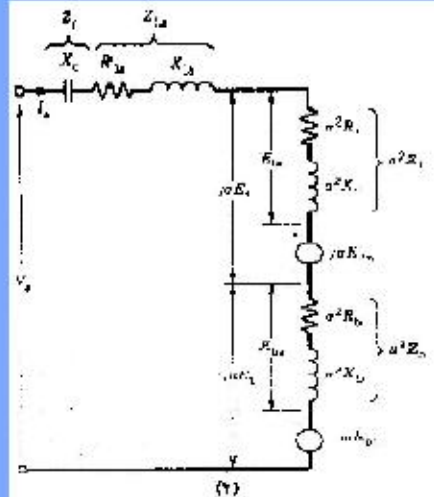
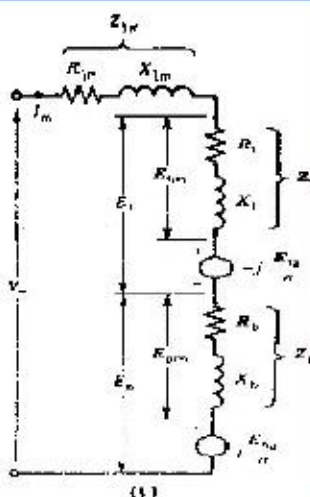
مدار معادل



در حالت خازن دائم با دو سیم پیچی مواجه هستیم که هر سیم پیچی یک شار دارد و شار هر سیم پیچی یک میدان ضربانی است پس دو میدان ضربانی داریم که هر کدام از این میدانها خودش را به دو مولفه تقسیم می‌شوند.





(a) (b)

مدار معادل در حالت خازن دائم

مدل ولتاژ القا شده ناشی از میدان جلوگرد سیم پیچی اصلی است E_{fm}


مدل ولتاژ القا شده ناشی از میدان جلوگرد سیم پیچی کمکی است $-j \frac{E_{fa}}{a}$

مدل ولتاژ القا شده ناشی از میدان عقبگرد سیم پیچی کمکی است $j \frac{E_{fb}}{a}$

E_{fm}

$-j \frac{E_{fa}}{a}$

$j \frac{E_{fb}}{a}$



$$\begin{cases} E_{fm} = Z_f I_m \\ E_{fa} = a^2 Z_f I_a \end{cases} \quad \begin{cases} E_{bm} = Z_b I_m \\ E_{ba} = a^2 Z_b I_a \end{cases} \quad a = \frac{N_a}{N_m}$$

$$\begin{cases} V_m = V = V_a \\ V_m = I_m (R_m + jX_m + Z_f + Z_b) + j \frac{E_{ba}}{a} - j \frac{E_{fa}}{a} \\ V_a = I_a (R_a + jX_a + jX_c + a^2 Z_f + a^2 Z_b) + jaE_{fm} - jaE_{bm} \end{cases}$$

روابط ریاضی مربوطه



$$P_m = (1-S)(P_{gf} - P_{gb})$$

$$Z_f = j \frac{X_m}{2} \parallel \left[\frac{jX_2}{2} + \frac{R_2}{2S} \right]$$

$$E_f = Z_f I_m^2 - j \frac{E_{fa}}{a}$$



$$P_{gf} = \text{Real}\{E_f I_m^* + j a E_f I_a^*\}$$

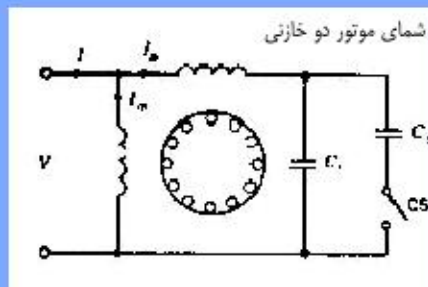
$$P_{gb} = \text{Real}\{E_b I_m^* + j a E_b I_a^*\}$$

4- موتورهای دو خازنی



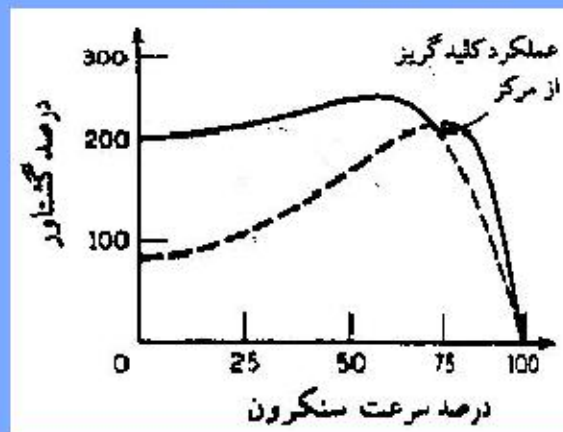
اگر بخواهیم موتوری داشته باشیم که نرم کار کند و گشتاور راهاندازی و گشتاور نامی و راندمان مطلوب داشته باشد، از موتورهای دو خازنی استفاده می‌کنیم که بخاطر خازن راهانداز گشتاور راهاندازی بالا دارند و به علت وجود خازن دائم نرم کار می‌کنند و راندمان مطلوبی دارند.

شمای موتور دو خازنی

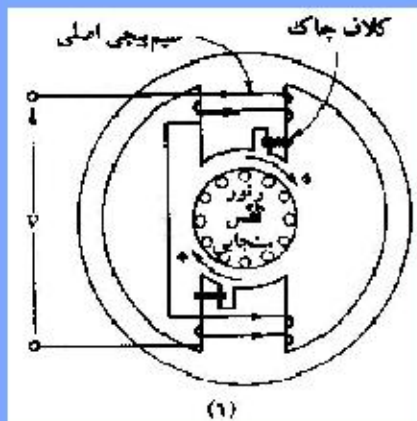




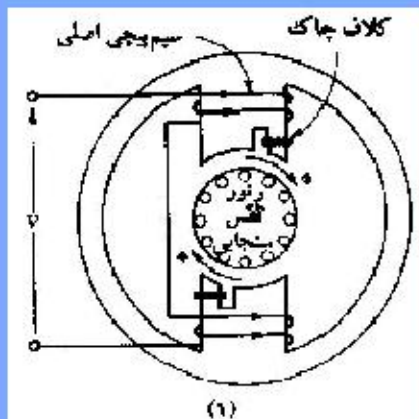
خازن دوم در شرایط راهاندازی در مدار است و ظرفیت خازنی مدار را افزایش می‌دهد و باعث افزایش گشتاور راهاندازی می‌شود.



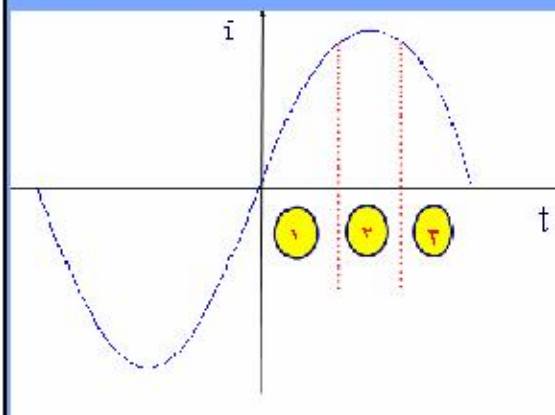
5- موتور قطب چاک دار Shaded Pole Motor



به لحاظ ساختمانی شامل استاتور و روتور است که روتور آن به لحاظ ساختمان شبیه سایر موتورهای تکفاز است اما استاتور آن برخلاف سایر موتورهای تکفاز از نوع قطب برجسته است. شکافی روی قطب آن هست که قطب را به دو قسمت نامساوی تقسیم می‌کند و روی قسمت کوچکتر یک حلقه مسی اتصال کوتاه شده قرار دارد.

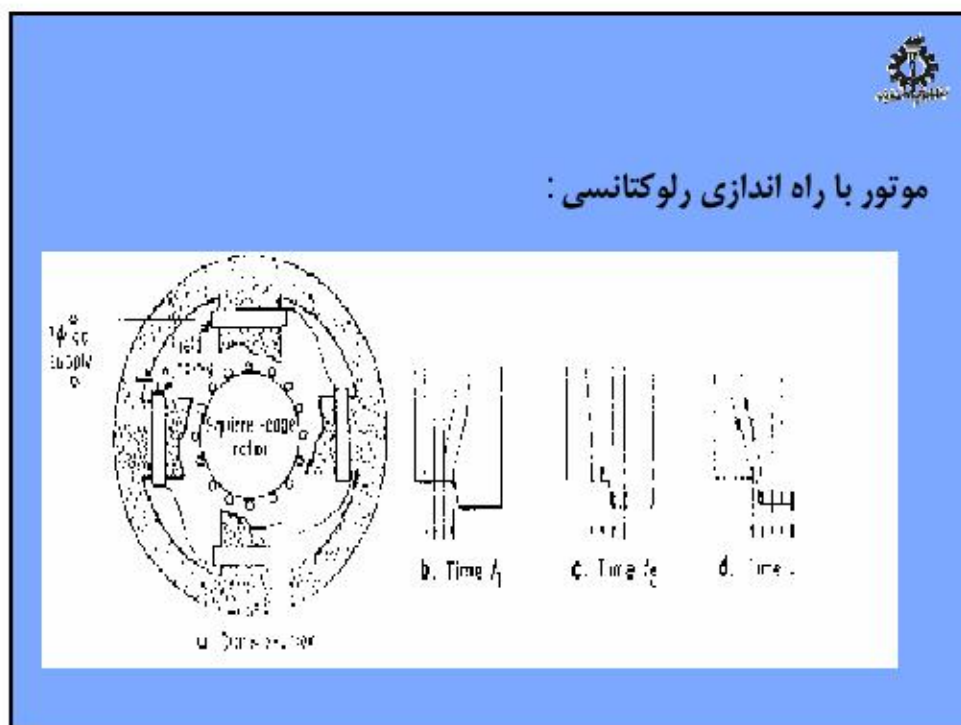
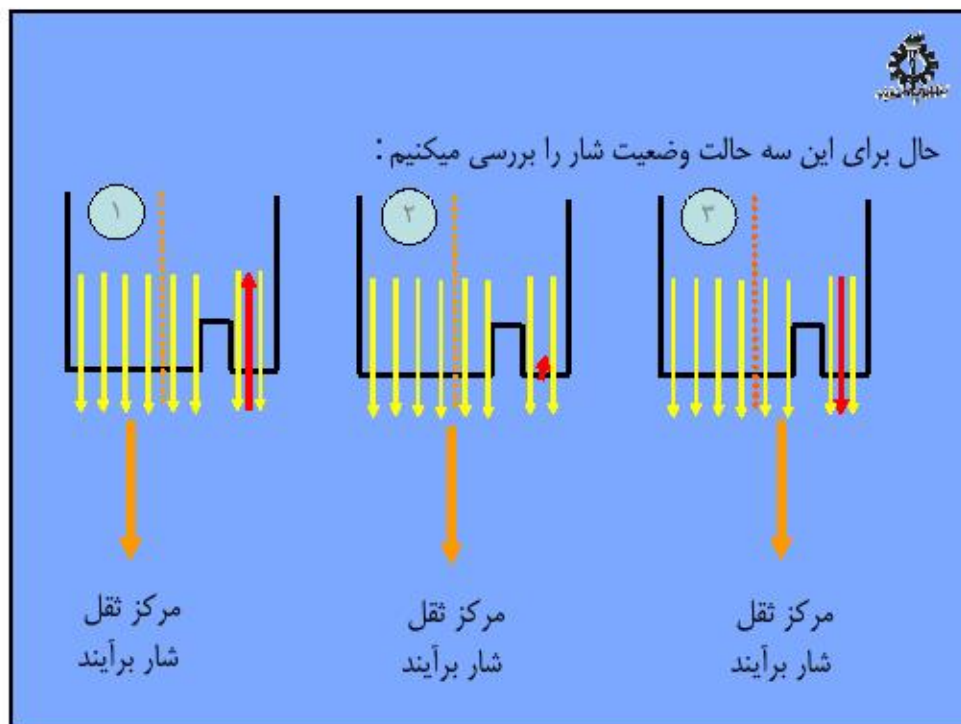


این موتورها فقط در یک جهت می چرخند:
از سمت قطب چاک نخورده به سمت قطب
چاک خورده.
نحوه عملکرد موتور قطب چاکدار را میتوان
با توجه به توزیع زمانی شار در زیر قطب
تحلیل کرد.



برای بررسی نحوه عملکرد موتور
قطب چاکدار، جریان تغذیه موتور را
در سه بازه زمانی متفاوت در نظر
میگیریم:

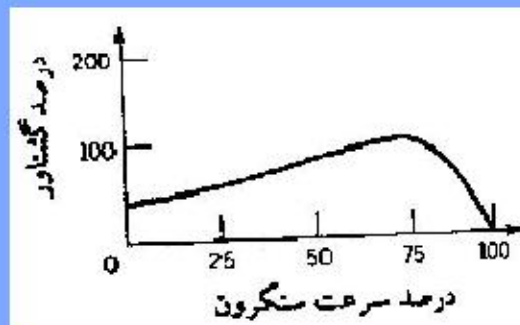
- ۱- تغییرات جریان مثبت است
- ۲- تغییرات جریان صفر است
- ۳- تغییرات جریان منفی است





از موتورهای قطب چاکدار در پنکه‌ها و اسباب بازی‌هایی که به گشتاور راهانداز کمی نیاز دارند و سشوارها و ... استفاده می‌شود.

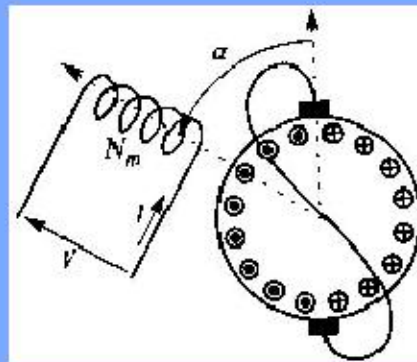
مهمترین ویژگی موتورهای تکفاز قیمت پایین آنها است. این موتورها از 1/250 hp تا 1/6 hp ساخته می‌شوند و راندمان آنها ۲۵٪ و زیر ۲۵٪ است که راندمان خیلی کمی است.

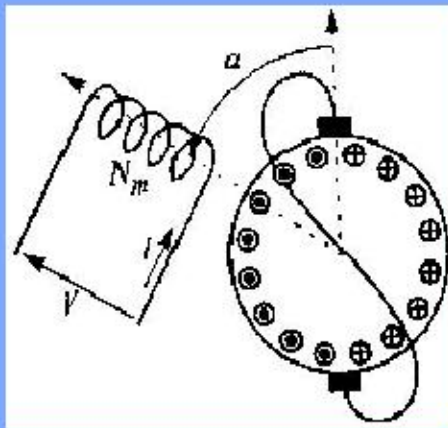


۶- موتور ریپالسیونی یا موتور دفعی Repulsion Motor



موتور ریپالسیونی به لحاظ ساختمانی دارای یک استاتور و یک روتور است و استاتور آن مشابه تمام موتورهای القایی تکفاز است و یک سیم‌پیچ روی هسته استاتور دارد ولی روتور آن مشابه روتورهای سیم‌پیچی شده است. سیم‌پیچی روتور شبیه یک موتور DC است.





در شکل روبرو یک میدان عمودی داریم که به دو مولفه تقسیم می‌شود که با داشتن این دو مولفه موتور می‌چرخد. اگر جاروبک را در زاویه صفر یا 90° قرار دهیم چون یکی از میدان‌ها از بین می‌رود گشتاور صفر می‌شود و اگر بین صفر و 90° درجه باشد گشتاور داریم و اگر محور را 90° بچرخانیم جهت چرخش موتور عوض می‌شود.

درواقع اساس کار موتورهای ریپالسیونی براساس دافعه‌ای است که بین میدان روتور و میدان استاتور به وجود می‌آید.



در موتور ریپالسیونی به $\alpha=0$ نقطه سخت گفته می‌شود که گشتاور برابر صفر ولی جریان آرمیچر ماکزیمم است و بیشترین جریان توسط موتور کشیده می‌شود و به $\alpha=90$ نقطه نرم گفته می‌شود که در آن گشتاور و جریان صفر است.

انواع موتورهای ریپالسیونی

۱. موتور ریپالسیونی
۲. موتور القایی راه‌انداز ریپالسیونی
۳. موتور القائی - ریپالسیونی

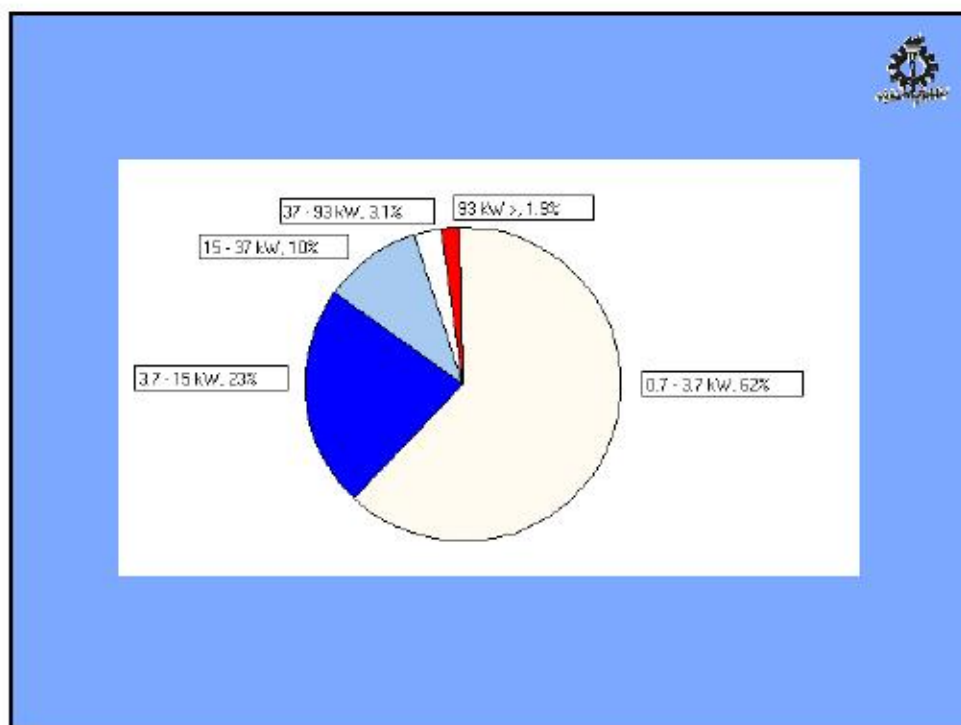
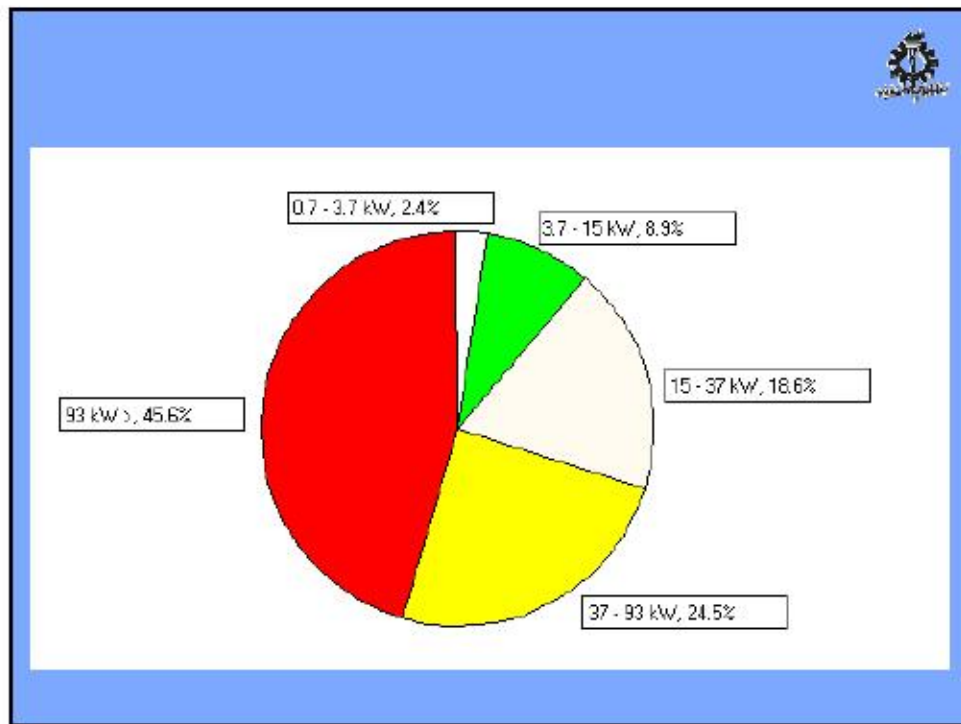
جدول ۱۷ مشخصات و کاربردهای موتورهای القایی و کثرتور

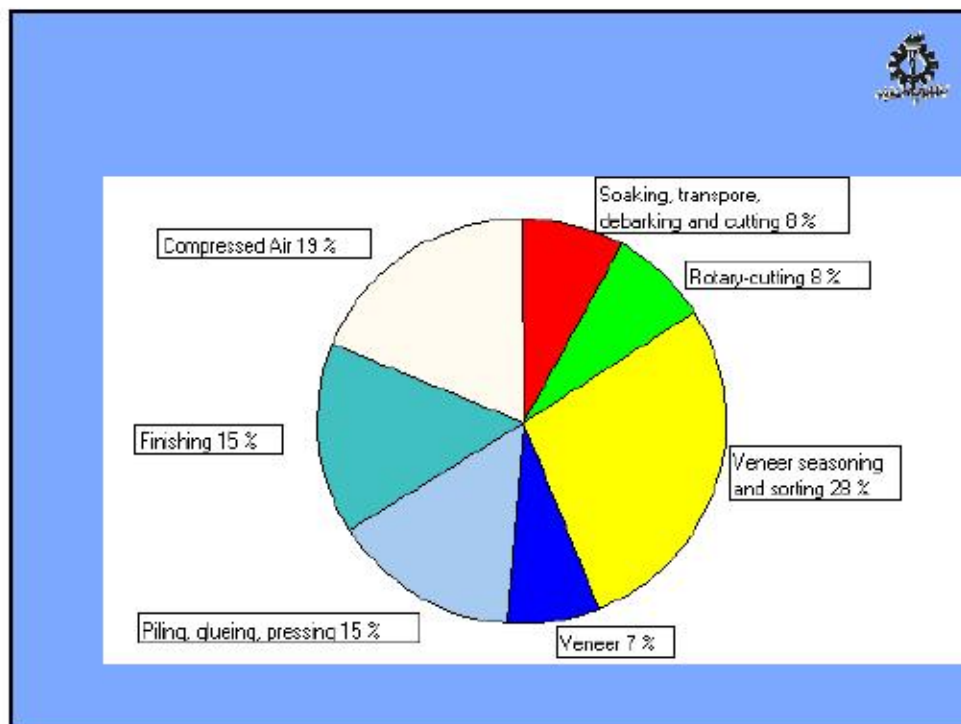
نوع موتور	کثرتور (در صدی از گشتاور اسمی)	کثرتور (در صدی از گشتاور اسمی)	بازده (در صد)	امپدانس	مقایسه (در صد)	تجزیه و تحلیل
موتورهای استاندارد	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۰۰	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.
موتورهای "SPMS"	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۱۵	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.
موتورهای "CSM"	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۲۰	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.
موتورهای "DRM"	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۳۰	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.
موتورهای "ZCR"	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۴۰	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.
موتورهای "NEM"	۱۰۰-۹۵	۳۰-۲۰	۵۵-۶۵	$\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{2}$	۱۵۰	بازده بالا و گشتاور زیاد، اما گشتاور اولیه کم و گشتاور متوسط کم.


محدوده قدرت موتورهای

رنج قدرت موتورهای مورد استفاده از میکرووات تا مگاوات در نوسان است، به گونه ای که در تمامی شقوق زندگی موتورهای نقش اساسی ایفا می کنند.

بطور تخمینی ۶۷٪ از انرژی الکتریکی تولید شده در آمریکا توسط موتورهای الکتریکی مصرف می شود در بخش صنعت حدود ۳۵/۵ میلیون موتور که قدرت آنها بیش از ۷ کیلو وات است، موجود است.





				
1381		1373		شاخه مصرف
میزان مصرف		میزان مصرف		
درصد از کل	مقدار میلیون کیلو وات ساعت	درصد از کل	مقدار میلیون کیلو وات ساعت	
29/5	32595/14	30/5	19404	خانگی شهری
3/5	3867/22	4/82	3069	خانگی روستائی
32/2	35578/42	32/17	20471	صنعتی
7	7734/44	12/08	7687	تجاری
8	8978/553	9/53	6060	عمومی
12	10526/22	8/13	5169	کشاورزی
4	4419/68	2/77	1765	سایر
100/00	110492	100/00	63625	جمع

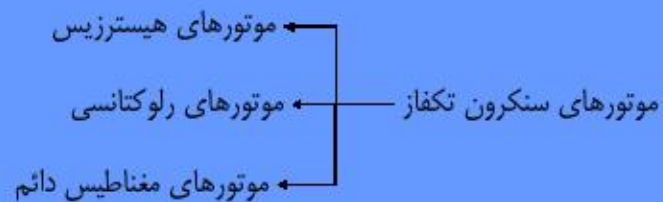
فعالیت	مصرفی (میلیون کیلو وات ساعت)	درصد از کل	مصرف برق موتورهای الکتریکی (میلیون کیلو وات ساعت)	درصد از کل
1 صنایع مواد غذایی، آسمانی و دخانیات	2023/9	9/9	976/5	7/3
2 صنایع نساجی، پوشاک و چرم	2695/9	13/2	1728/6	12/9
3 صنایع چوب و محصولات چوبی	235/7	1/2	143/2	1/1
4 صنایع کاغذ و مقوا و چاپ و انتشار	583/5	2/8	372/1	2/4
5 صنایع شیمیایی و نفت و ریفال سنگ و لاستیک و پلاستیک	1299/6	6/3	748/4	5/6
6 صنایع محصولات کانی غیر فلزی (بجز نفت و ریفال سنگ)	5104/7	24/9	3575/8	26/7
7 صنایع تولید فلزات اساسی	6567/2	22/1	4752/8	35/4
8 صنایع ماشین آلات، تجهیزات و ابزار و محصولات فلزی	1934/4	9/4	1142/7	8/5
9 صنایع متفرقه	35/8	0/2	18/4	0/1
جمع	20480/7	100	13408/6	100

سال 1373				سال 1381			
شاخه مصرف	کل برق مصرفی (میلیون کیلو وات ساعت)	درصد مصرف متوسط	برق مصرفی از کل	شاخه مصرف	کل برق مصرفی (میلیون کیلو وات ساعت)	درصد مصرف متوسط	برق مصرفی از کل
خانگی روستایی	3069	20/9	641/4	2/6	3867/22	20/9	808/25
خانگی شهری	19404	25/6	4967/4	20/4	32595/14	25/6	8344/36
تجاری	7687	15/00	1153/1	4/7	7734/44	15/00	1160/17
عمومی	6060	12/4	812/00	3/3	8978/553	12/4	1113/34
کشاورزی	5169	61/1	3158/3	12/9	10526/22	65	6842/04
صنعتی	20471	65/5	13408/5	54/7	35578/42	65/5	23303/87
سایر	1765	20/00	352	1/5	4419/68	20/00	883/94
جمع	63625	100		38/5	110492/54	100	



8- موتورهای سنکرون تکفاز

ویژگی موتورهای سنکرون این است که سرعت آنها ثابت است و گشتاور آنها متأثر از بار آنها نمی‌باشد.



موتورهای هیستریزیس



موتور هیستریزیس، موتور سنکرون بدون قطبهای برجسته و بدون تحریک جریان مستقیم در روتور است و بنا به خاصیت تلفات هیستریزیس القایی ناشی از میدان گردان اولیه در ماده مغناطیسی هیستریزیس و در اثر پس‌ماند مغناطیسی ثانویه، بطور عادی و با سرعت سنکرون دوران می‌نماید.

موتورهای هیستریزیس معمولاً در رنج قدرت خروجی کمتر از یک اسب بخار بکار گرفته می‌شوند.



موتورهای هیستریزیس

روتور موتور هیستریزیس از مواد نیمه سخت (کبالت - وانادیم ریخته گری شده و...) ساخته شده است. این مواد معمولاً دارای حلقه هیستریزیس عریضی هستند و معمولاً از قیمت بالایی برخوردار هستند.

رینگ هیستریزیس از ماده مغناطیسی ویژه‌ای ساخته شده و این رینگ روی یک استوانه غیرمغناطیسی قرار گرفته و تواما روی محور موتور سوار می‌شوند. رینگ هیستریزیس را معمولاً از اتصال ورقه‌های نازک تشکیل دهنده روتور بدست می‌آورند. در اندازه‌های کوچکتر روتور ممکن است بصورت حلقه یکپارچه یا استوانه‌ای باشد.



موتورهای هیستریزیس



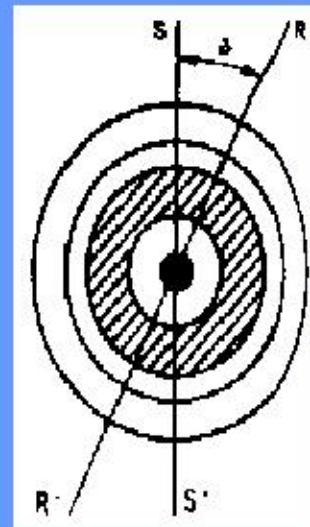
برش عرضی از یک موتور هیستریزیس

استاتور این موتور دارای یک سیم‌پیچ توزیع شده چند فاز مشابیه موتور القایی (سه فاز یا تکفاز) می‌باشد.

در حالت تکفاز سیم‌پیچی از نوع خازن دائم یا فاز شکسته خواهد بود، البته فاز شکسته‌ای که دیگر کلید گریز از مرکز را ندارد.



روتور از دو قسمت تشکیل شده است. یک رینگ مغناطیسی از ماده مغناطیسی نیمه سخت که عامل اصلی ایجاد گشتاور است و قسمت مرکزی و یا قسمت نگهدارنده رینگ. جنس ماده نگهدارنده رینگ تعیین کننده نوع موتور هیستریزیس می باشد. اگر ماده تشکیل دهنده از مواد مغناطیسی نرم با نفوذپذیری بالا ساخته شده باشد، موتور نوع شار شعاعی خواهد بود و اگر از مواد غیرمغناطیسی ساخته شده باشد، موتور نوع شار محیطی خواهد بود.



گشتاور هیستریزیس را می توان با انتخاب مواد مغناطیسی روتور که دارای بیشترین مقدار ممکن نیروی مغناطیس زدای H_c ، چگالی شارپسماند B_p و شکل متقارن باشد، افزایش داد. یک ماده ایده آل دارای یک حلقه هیستریزیس مستطیلی شکل است. موادی که از جنس کبالت و اندیم و نوع *alnico* دارای حلقه ای می باشند که به ماده ایده آل نزدیک است.



جدول مشخصات مغناطیسی مواد بکار رفته در رینگ روتور موتور هیستریز

عملیات حرارتی	(H_c/H_m)	(B_r/B_m)	H_m	ترکیب شیمیایی
آب دادن فلز در دمای ۵۴۰-۶۵۰ درجه	۰/۷۲	۰/۸۴	۳-۵	۳۰ درصد Co-۵ درصد V
آب دادن فلز در دمای ۵۰۰-۶۵۰ درجه	۰/۷	۰/۸۲	۳/۳-۷/۵	۵۳ درصد Co-۷ درصد V
آب دادن فلز در دمای ۴۲۰-۶۲۰ درجه	۰/۷	۰/۸	۴-۲۰	۵۳ درصد Co-۱۱ درصد V
سرد کردن تدریجی و دوباره گرم کردن آن (آب دادن فلز)	۰/۶۸-۰/۷۵	-	۳/۵-۶/۵	Co درصد ۳۵
	-	-	۳/۵-۳/۷	Co درصد ۲۵
آب دادن در درجه حرارت ۱۱۵۰-۱۲۵۰ و سرد کردن تدریجی و گرم کردن مجدد در درجه حرارت ۶۰۰-۷۵۰ درجه سلتیگراد	۷/۰-۷/۵	تا ۰/۹	۲-۳/۲	۱۲ درصد Co-۱۴ درصد W
	۰/۶۵-۰/۷۵	۸/۰-۸/۵	۴-۷	۱۲ درصد Co-۱۰ درصد W-۲۰ درصد Mo
	۰/۷	۰/۸۵	۷-۹/۵	۱۲ درصد Co-۱۰ درصد W-۲۰ درصد Mo
	۰/۶۵-۰/۷۵	۰/۸-۰/۸۵	۸-۲۰	۱۲ درصد Co-۱۰ درصد W-۲۰ درصد Mo
	۰/۶۵-۰/۷۵	۰/۷۵-۰/۸	۲/۲-۲/۷	۱۲ درصد Co-۱۰ درصد W-۲۰ درصد Mo



بعلت داشتن یک گشتاور هیستریز ثابت در تمام پریود راه اندازی از $s=0$ تا $s=1$ ، روتور موتور هیستریز در یک رژیم کاری ملایم و بدون تکان میچرخد. جریان ورودی این موتورها در طی عملکرد از راه اندازی اتصال کوتاه تا عملکرد بی باری بطور قابل صرف نظر کردنی (از ۲۰ تا ۳۰ درصد) تغییر می کند. به این دلیل این موتورها اغلب برای عملکرد متناوب مناسب هستند. همچنین موتورهای هیستریز از نظر طراحی ساده و از نظر عملکرد قابل اطمینان هستند.



این موتورها در سیستم های ضبط صوت، تکثیر کننده ها و سایر سیستم های مشابه استفاده می شود. خصوصیت مهمی که در این سیستم ها بسیار مهم می باشد، کم بودن نویزهای در رنج رادیویی می باشد. بررسی مهمترین عوامل تولیدکننده نویزهای رادیویی و مقایسه آن در بین انواع موتورهای سنکرون انتخاب مناسب را آسان تر می کند. با توجه به نکات ذکر شده، حداقل نویز رادیویی را می توان در موتورهای هیستریز که از نظر الکتریکی و مکانیکی دارای روتور متقارن با سطح صاف هستند را مشاهده کرد. بالاترین سطح نویز نیز به موتورهای رلوکتانسی با قطبهای برجسته مربوط میشود.



در بین موتورهای سنکرون، موتورهای با آهن ربای دائم دارای بالاترین راندمان و ضریب قدرت و کمترین حجم در مقایسه با توان خروجی هستند. با یک منبع تغذیه با فرکانس ۵۰ هرتز و در رنج توان خروجی بین ۱۰ تا ۱۰۰ وات، راندمان این موتورها بین ۴۰ تا ۸۰ درصد می باشد. موتور بعدی از این جنبه، موتور هیستریز می باشد که همانطور که توضیح داده شد در هنگام حرکت مانند موتورهای سنکرون زیر تحریک کار می کنند. تحت شرایط مشابه موتور آهنربای دائم، موتور هیستریز دارای راندمانی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد می باشد. موتورهای رلوکتانسی، در حالتی که فاقد میدان تحریک روتور باشند، کمترین راندمان و ضریب قدرت را دارا می باشند بطوریکه در حالت مشابه حالت فوق راندمان آنها بین ۲۰ تا ۴۰ درصد است.



ویژگی موتور هیستریزیس این است که ارزاتر از حالت آهنربای دائم تمام می‌شود و گشتاور راه‌اندازی دارد در صورتیکه آهنربای دائم گشتاور راه‌اندازی ندارد. گشتاور این موتور از حالت راه‌اندازی $\omega=0$ تا $\omega=\omega_n$ ثابت است، در حالیکه در خود موتورهای سنکرون فقط در حالت کار نامی گشتاور ثابت است و تا رسیدن به ω_n گشتاور متغیری دارند.



گشتاور الکترومغناطیسی




$$\begin{cases} P_h = P_{loop} \cdot f \cdot v \\ P_{loop} = K_h B_{max}^n \end{cases} \rightarrow P_h = K_h f v B_{max}^n$$

v : حجم ماده هیستریزیس
 f : فرکانس میدان



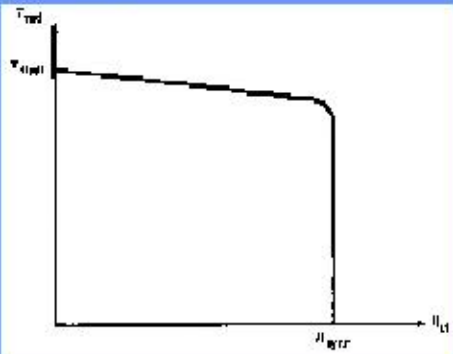



$$P_{ag} = P_h / S \rightarrow P_{ag} = \frac{k_h B_{max}^n \psi S f_s}{S}$$

$$T = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{k_h B_{max}^n \psi f_s}{\omega_s} = \frac{k_h B_{max}^n \psi}{2\pi}$$


با در نظر گرفتن تلفات فوقی

$$\rightarrow P_{ag} = \frac{k_e B_{max}^2 \psi S^2 f_s^2}{S}$$

$$T = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \left(\frac{k_e B_{max}^2 \psi}{2\pi} \right) S \cdot f_s$$


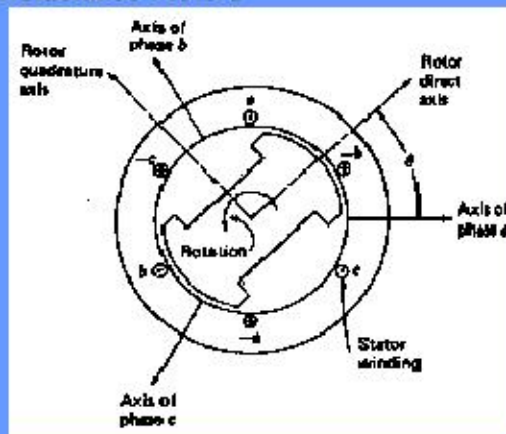
موتورهای رلوکتانسی تکفاز



موتورهای رلوکتانسی به دو دسته تقسیم می‌شوند.

• Synchronous Reluctance Motors

• Switched Reluctance Motors



در موتورهای رلوکتانسی توان انتقالی ناشی از دو بخش بود:

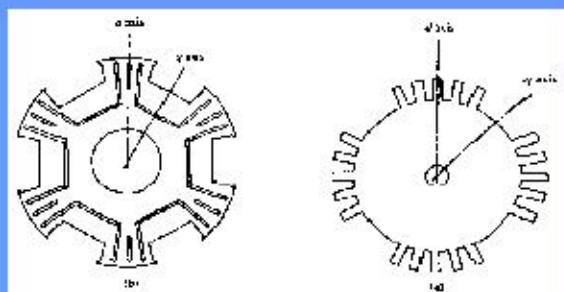
$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta + \frac{v^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

اگر در یک موتور سنکرون تحریک را نداشته باشیم پس توان انتقالی سیستم رابطه زیر را خواهد داشت.

$$P = \frac{v^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$



استاتور این موتورها برای داشتن میدان دوار لازم است که نوع فاز شکسته یا خازن دائم باشد و در بعضی موارد می‌تواند قطب چاکدار هم باشد. روتور نیز باید به نوعی ساخته شود که مقاومت مغناطیسی در امتداد d , q بیشترین اختلاف را داشته باشد.



δ زاویه بین محور استاتور و محور طولی روتور است. $\delta = 0$ بی‌باری



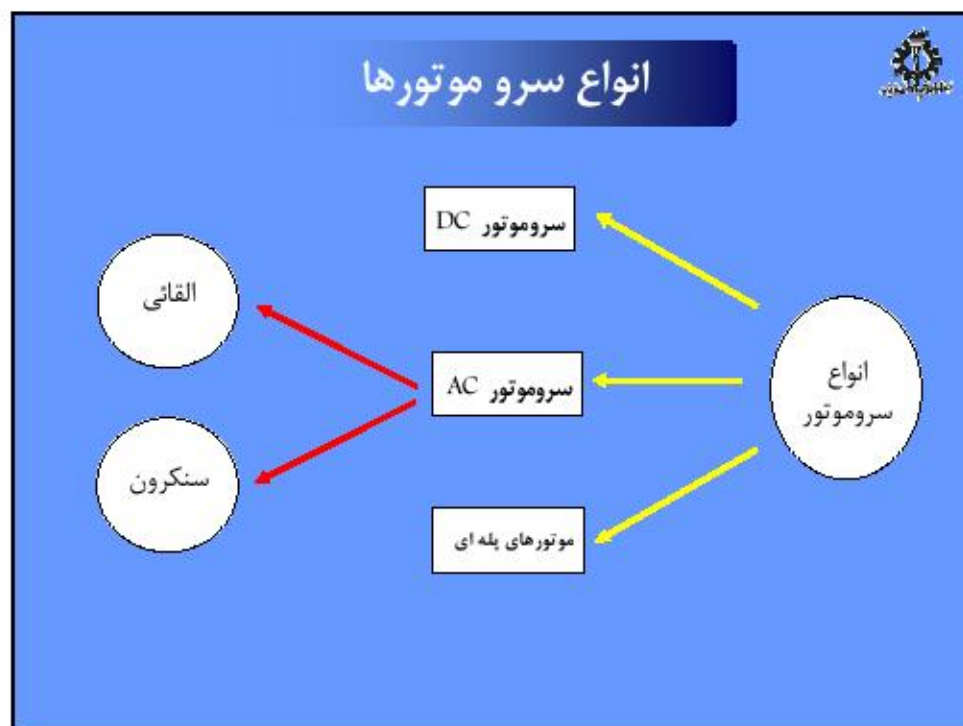
سرو موتورها

اصولاً از موتورهایی که در کاربردهای کنترل موقعیت مورد استفاده واقع می‌شوند، به عنوان سروموتور تعبیر می‌شوند



سرو موتورها

سروموتورها در رنج قدرت پائین مورد استفاده قرار می‌گیرند
وظیفه آنها کنترل تغییرات موقعیت و (سرعت) است.
دارای دقت و سرعت پاسخ بالا هستند لذا دارای اینرسی کم و در نتیجه
طول زیاد و قطر کم هستند
در سیستمهای ربات، کامپیوتر، سیستمهای الکترو مکانیکی و ماشینهای
افزار مورد استفاده قرار می‌گیرند.



مزایا و معایب انواع سرو موتورها

Features of each servo motor

	Stepping motor	DC servo motor	Synchronous servo motor	Induction type servo motor
Capacity (watt)	Less than 100 W	Less than 500 W	100 to 2 kW	2 kW or up
Advantages	Compact and high output. Cheap.	Smaller outside dimensions and large torque. Good operation efficiency. Good controllability. Cheap.	High speed and high torque. Good operation efficiency. No maintenance required.	High speed and high torque. No need maintenance. Durable. Large peak torque.
Disadvantages	Out-of-step and magnet noise at low speed operation.	Limit at rectification. Low reliability. Requires maintenance.	Expensive.	Bad operation efficiency with medium capacity models. Complicated control circuit. Expensive.

سرو موتورهای DC



در واقع یک موتور DC با تحریک جداگانه یا با قطبهایی از آهنربای دائم است.

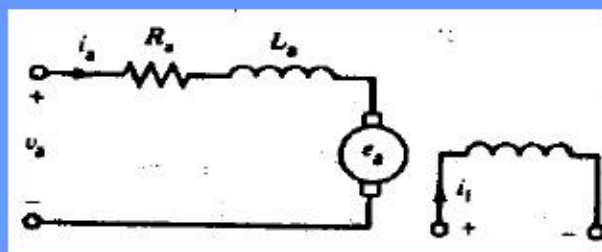
مشخصه های گشتاور سرعت این موتورهای خطی بوده و شیب منفی نسبتاً زیادی دارند.

تغییرات پله ای ولتاژ باعث می گردد در موقعیت یا سرعت روتور تغییر سریع حاصل شود.

سرموتورهای DC



در موتورهای تحریک مستقل داریم



$$E_a = k_a \phi \omega_m = V_t - R_a I_a$$

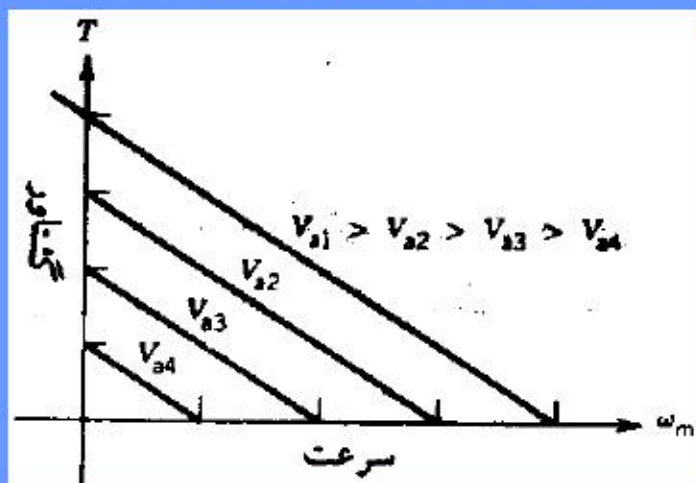
$$\omega_m = \frac{V_t}{k_a} - \frac{R_a}{k_a k_T} T = \omega(T)$$

$$T = \frac{k_T}{R_a} V_t - \frac{k_a k_T}{R_a} \omega_m$$

سرموتورهای DC



اگر فرض کنیم که میدان مقدار ثابتی باشد و ولتاژ آرمیچر بتوانید تغییر کند، داریم:



سرموتورهای AC



امروزه بمرور این سرو موتورها جای خود را در میان سروموتورها باز میکنند.

مشخصه های گشتاور سرعت آنها غیر خطی است.

در سیستمهای کنترل معمولاً از نوع موتورهای القایی دو فاز با روتور قفس سنجابی استفاده می شود.

شامل دو سیم پیچ متعامد است که جهت چرخش موتور به اختلاف فاز دو ولتاژ بستگی دارد.

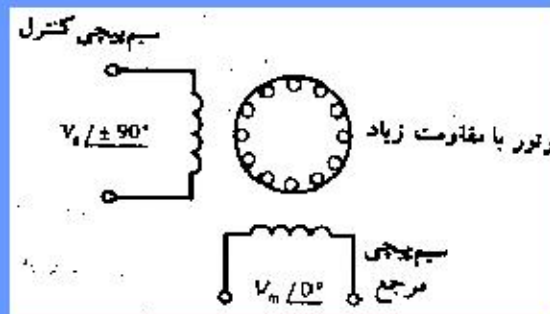




سرموتورهای AC

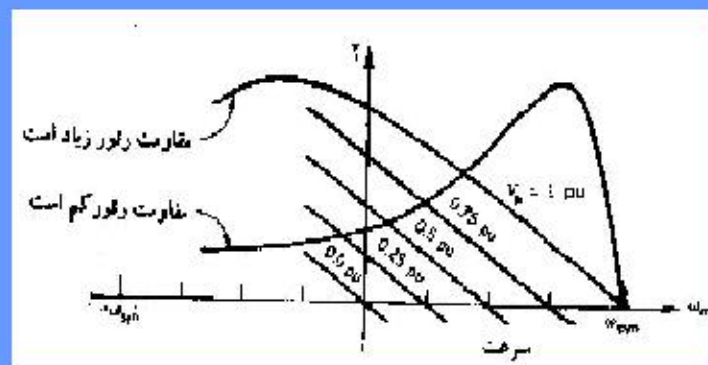
دو سیم پیچ متعامد روی استاتور توسط دو ولتاژ که با یکدیگر 90° درجه اختلاف فاز دارند تغذیه میشوند.

سیم پیچی مرجع با $V_m < 0$ تغذیه می شود و سیم پیچی کنترل هم با $V_a < \pi/2$ تغذیه می شود



سرموتورهای AC

در اینجا V_a می تواند متفاوت با V_m باشد به این ترتیب یک موتور دو فاز نامتعادل داریم منحنی گشتاور - سرعت به صورت زیر می شود:

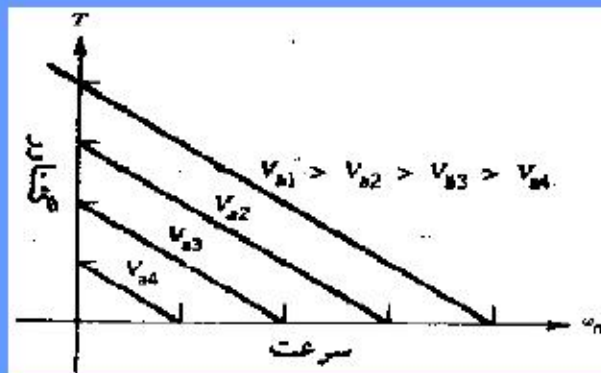


منحنی گشتاور - سرعت

سرموتورهای AC



در واقع در هنگام ساخت مقدار مقاومت اهمی را زیاد می کنند و اگر داشته باشیم $\frac{V_a}{V_m} = a$ در این صورت منحنی فوق در حالت $a=1$ رسم شده است
در نمودار اگر V_m را کم کنیم شیفِت به راست داریم و اگر V_a را کم کنیم شیفِت به چپ خواهیم داشت. برای چرخش معکوس نیز کافی است $V_a = aV_m < -\pi/2$ را داشته باشیم.



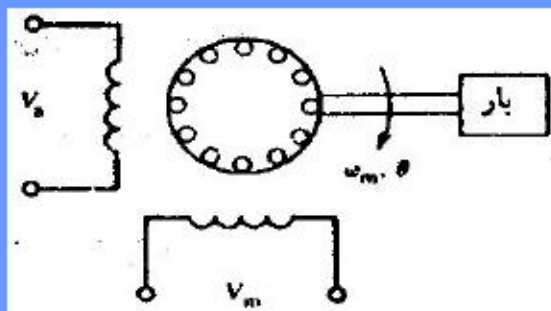
مقایسه سرموتورهای AC و DC



	AC servo	DC servo
Life	<Bearing life> 20,000 hours approx.	<Brush life> Normally, 2,000 to 5,000 h. varies considerably due to load and environmental conditions.
Maintenance	<Not required> No mechanical contact. (No brushes, commutators)	<Required> Requires periodical check and replacement of brushes.
Sound/noise	<Quiet>	<Noisy> Due to brush commutating noise.
Electrical noise	<None> No noise as no brushes.	<Excessive> Noise occurs due to arcing on commutator.
Efficiency	<Excellent> Good cooling efficiency as heat radiates from stator.	<Good> Rectification loss occurs. Bad cooling efficiency due to poor heat.
Against Overload	<Good> Large thermal time constant. High speed and large torque.	<Not so good> Small thermal time constant. Limited current due to brush. However.
Response Characteristics	<Very quick> Large power rate. (Small motor inertia and large torque until high speed range.)	<Quick> small power rate. (Large motor inertia. Decrease torque at high speed range.)
Other notes	<Good> Current can be freely positive or negative.	<Bad> Brushy power occurs.



سیستم نمونه



یک سیستم کنترلی به شکل فوق را در نظر بگیرید. معادله الکترو مکانیکی حاکم بر این سیستم دوار بشرح زیر است :

$$\sum T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + F_L \frac{d\theta}{dt}$$



سیستم نمونه

$$\sum T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + F_L \frac{d\theta}{dt}$$

در معادله فوق :

$$\left. \begin{array}{l} \text{ل ممان اینرسی} \\ \frac{d^2 \theta}{dt^2} \text{ شتاب سیستم} \\ F_L \text{ اصطکاک} \\ \frac{d\theta}{dt} \text{ سرعت} \end{array} \right\}$$



سیستم نمونه

$$T = K_M V_a - F_m \omega_m \rightarrow$$

$$k_m V_a - F_m \omega_m = (J_m + J) \frac{d\omega_m}{dt} + F_L \omega_m$$

$$k_m V_a = (J_m + J) \frac{d\omega_m}{dt} + (F_L + F_m) \omega_m$$

F_m در حقیقت شیب منحنی گشتاور سرعت تحت ولتاژ V_a است.
 K_m در حقیقت تغییر گشتاور به ازای تغییر V_a تحت سرعت ثابت است.

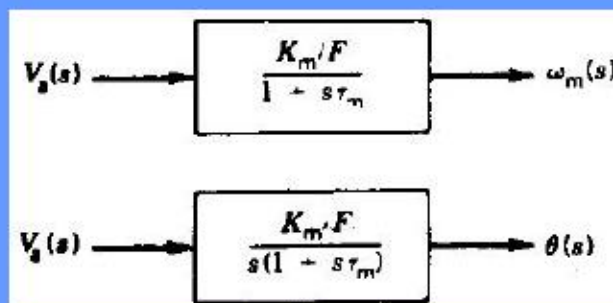


سیستم نمونه

اگر در سیستم فوق تابع تبدیل را بدست آوریم خواهیم داشت:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{k_m}{Js + F} = \frac{\frac{k_m}{F}}{\frac{Js}{F} + 1} = \frac{\frac{k_m}{F}}{\tau s + 1}$$

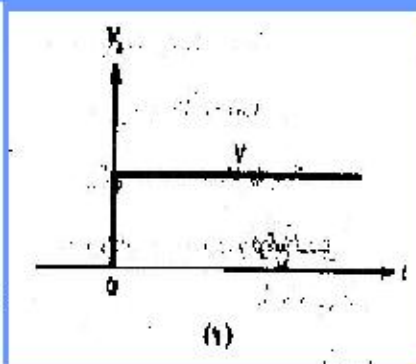
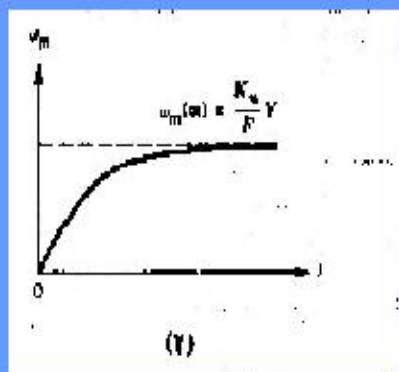
ضریب اصطکاک $F = F_L + F_m$
 $J = J_m + J$





سیستم نمونه

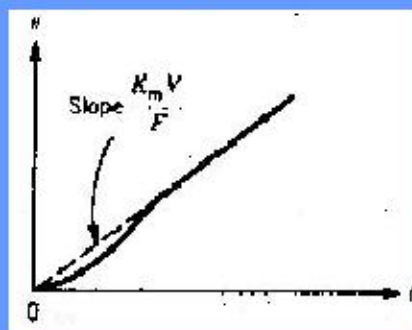
پاسخ سیستم برای خروجی سرعت با ورودی پله

$$\omega_m(t) = \frac{k_m V}{F} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}})$$


سیستم نمونه

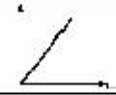
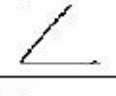

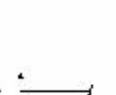
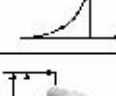
پاسخ سیستم برای خروجی موقعیت (θ) با ورودی پله

$$\theta(t) = \frac{k_m V}{F} t - \frac{k_m V \tau_m}{F} + \frac{k_m V \tau_m}{F} e^{-\frac{t}{\tau_m}}$$



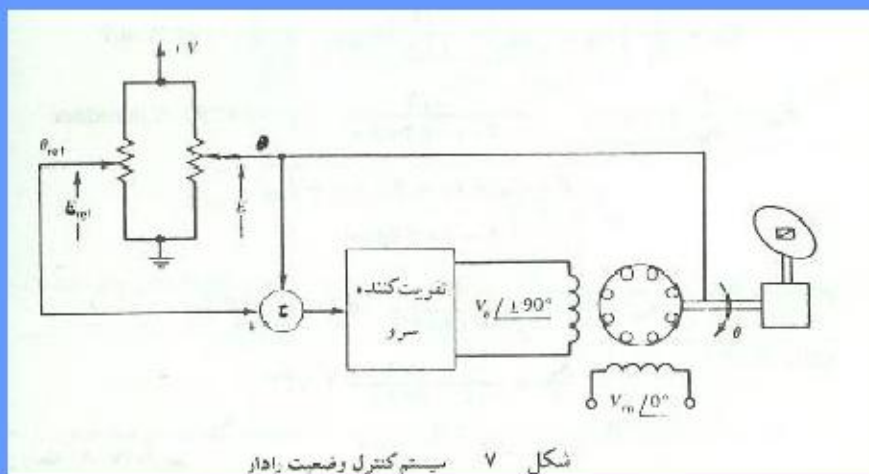


مشخصه های سروموتورها

	Motor torque is linearly proportional to terminal voltage V
	Motor torque is linearly proportional to speed ω
	Motor torque is linearly proportional to speed ω and is independent of terminal voltage V
	Motor torque is linearly proportional to speed ω and is independent of terminal voltage V
	Motor torque is linearly proportional to speed ω and is independent of terminal voltage V



کاربرد سروموتورها در کنترل وضعیت رادار





کاربرد سروموتورها در کنترل وضعیت رادار

شکل قبل سیستم کنترل وضعیت رادار را نشان می دهد که از سروموتورهای AC دوفاز برای کنترل موقعیت رادار استفاده شده است. در این سیستم کنترل ، دو پتانسیومتر وجود دارد:

- 1- پتانسیومتر مرجع ، ولتاژ E_{ref} متناسب با سیگنال موقعیت مطلوب (θ_{ref}) را تولید می کند.
- 2- پتانسیومتر دوم از محور سروموتور فرمان می گیرد و ولتاژ E را متناسب با وضعیت محور (θ) ایجاد می کند.



کاربرد سروموتورها در کنترل وضعیت رادار

سیگنال خطا به تقویت کننده اعمال می شود و این تقویت کننده ولتاژ مورد نیاز V_a را جهت صفر شدن خطا ، مهیا می سازد.

$$E_{error} = E_{ref} - E$$

$$\theta_{error} = \theta_{ref} - \theta$$



سنکروها

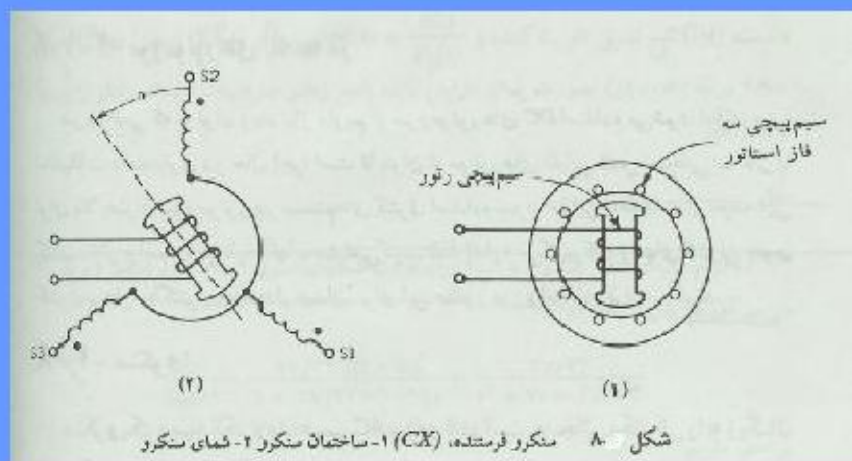
یک وسیله الکترومغناطیسی AC است که برای تبدیل جابجائی مکانیکی به سیگنال الکتریکی استفاده می شود.

3 نوع سنکرو وجود دارد:

- 1- سنکرو فرستنده (CX)
- 2- سنکرو گیرنده (CR)
- 3- سنکرو تبدیل کننده (CT)



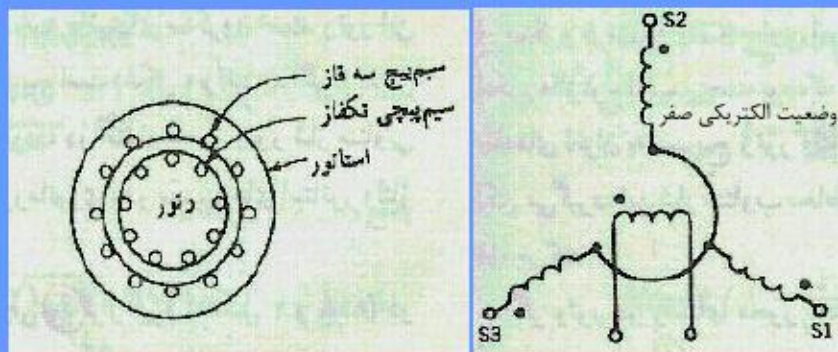
سنکروها



سنکروهای گیرنده و فرستنده شبیه هم هستند. استاتور سه فاز و روتور قطب برجسته و حاوی یک سیم پیچ تکفاز می باشد.



سنکروها



سنکرو تبدیل کننده دارای روتور استوانه ایست در سنکروهای تبدیل کننده استاتور سه فاز است، اما امیدانس هر فاز استاتور در سنکروهای تبدیل کننده از سنکروهای فرستنده بیشتر است. در عمل چندین سنکرو تبدیل کننده از یک سنکرو فرستنده تغذیه گردند.



سنکروها

انتقال گشتاور: گشتاور را در مسیر طولانی بدون وجود اتصال مکانیکی منتقل می کنند. در این سیستم از دو سنکرو گیرنده و فرستنده استفاده می شود.



به سیم پیچ روتور و لثاژ احتمال می شود و شار مشاوب در سیم پیچ استاتور و لثاژ القا می کند. هرگاه در شکل ۲ روتور در امتداد باشد در اینصورت شار گذرنده ماکزیمم خواهد بود. (وضعیت الکتریکی صفر)



سنکروها

سیم پیچهای استاتور دو سنکرو به هم وصل اند و روتور آنها از یک منبع AC تکفاز تغذیه می شوند. اگر کلید SW_1 بسته باشد در اینصورت در استاتور سنکرو فرستنده ولتاژ القا می شود و بلافاصله در سیم پیچهای سنکروگیرنده جریان برقرار می شود.

اگر کلید SW_2 بسته شود میدانی در جهت محور روتور سنکروگیرنده ایجاد می شود. در اثر تداخل میدان روتور و میدان استاتور در سنکروگیرنده، گشتاور پدید می آید. این گشتاور روتور را در سنکروگیرنده به وضعیتی مشابه روتور در سنکرو فرستنده می برد. در این حالت ولتاژ القا شده در استاتور سنکروگیرنده مشابه ولتاژ القا شده در استاتور سنکرو فرستنده است و لذا جریان بین دو سنکرو ایجاد نمی شود و گشتاوری پدید نخواهد شد.

حال اگر روتور سنکرو فرستنده به وضعیتی جدید منتقل شود روتور سنکروگیرنده به همان وضعیت خواهد رفت.



سنکروها

-تشخیص خطا

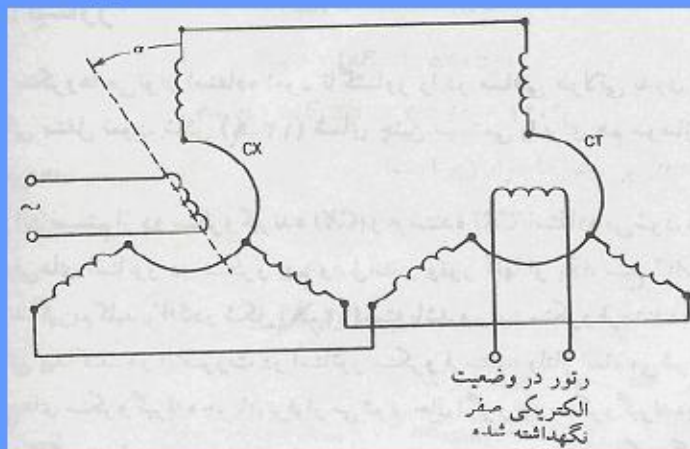
در این سیستم از یک سنکرو فرستنده و یک سنکرو تبدیل کننده استفاده شده است. اگر روتور سنکرو فرستنده بمیزان زاویه α جابجا شود در اینصورت در استاتور سنکرو فرستنده ولتاژ القا می شود و چون دو استاتور به هم وصل اند، جریان برقرار می گردد. جریان در استاتور سنکرو تبدیل کننده میدانی در امتداد زاویه α ایجاد می کند.

سنکروها



اگر روتور سنکرو تبدیل کننده در وضعیت صفر بماند مقدار ولتاژ در روتور تبدیل کننده بصورت زیر است :

$$E = E_{\max} \sin \alpha$$



سنکروها



اگر α_x وضعیت روتور سنکرو فرستنده و α_T وضعیت روتور سنکرو تبدیل کننده باشد ، در اینصورت مقدار موثر ولتاژ در روتور تبدیل کننده بقرار زیر می شود:

ولتاژ لحظه ای بقرار زیر است :

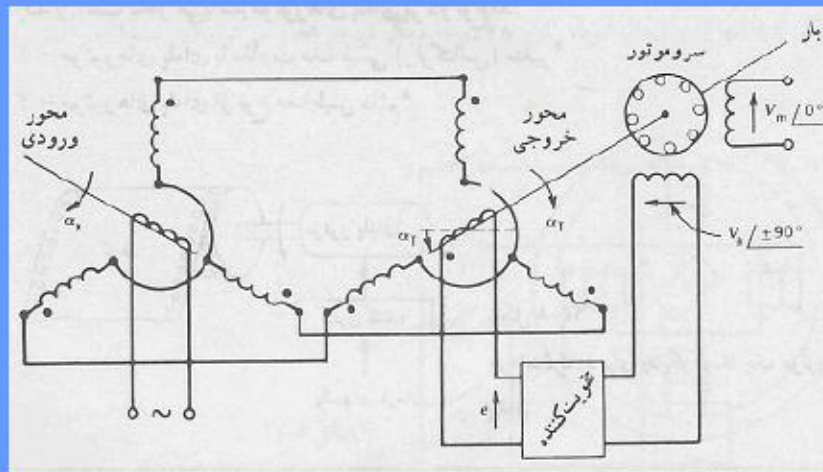
$$E = E_{\max} \sin(\alpha - \alpha_T)$$

$$e = \sqrt{2} E_{\max} \sin(\alpha_x - \alpha_T) \sin \omega t$$



سنکروها

نمونه کاربرد سنکروها در تشخیص خطا در شکل زیر نشان داده شده است



سنکروها

هدف از چنین سیستمی این است که محور خروجی جابجایی زاویه ای محور ورودی را تعقیب کند.

محور ورودی همان محور روتور سنکرو فرستنده و محور خروجی همان محور روتور سنکرو تبدیل کننده است. موقعیت الکتریکی دو روتور نسبت به هم 90° درجه اختلاف دارند. تا زمانی که این اختلاف وجود داشته باشد ولتاژ خطا صفر و در نتیجه ولتاژ V_a صفر است.

زمانی که این اختلاف به هم بخورد ولتاژ خطا ایجاد می شود و پس از تقویت بصورت V_a به سروموتور اعمال می شود. در این حالت موتور به حرکت در می آید و به نحوی می چرخد که ولتاژ خطا صفر شود.



آمپلی فایرهای گردان

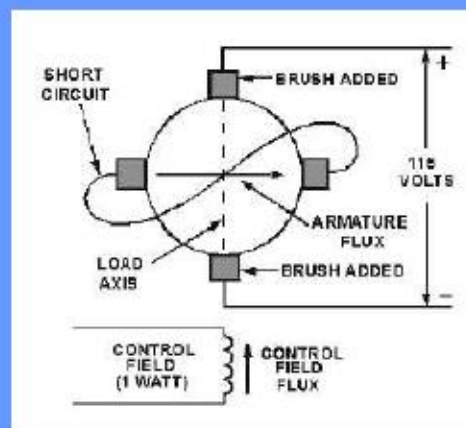
بهره تقویت‌کننده‌هایی که توسط قطعات الکترونیک قدرت ساخته می‌شود محدود می‌باشد. ولی تقویت‌کننده‌های گردان که نوع خاصی از موتورها هستند با این محدودیت مواجه نیستند. یک ژنراتور DC را هم می‌توان یک تقویت‌کننده در نظر گرفت چون به سیم‌پیچی تحریک ولتاژ اعمال می‌شود و در خروجی ولتاژ خیلی بزرگی داریم:

$$G = \frac{E}{V_f} \quad \text{بهره بی‌باری}$$

نوعاً به ژنراتور DC آمپلی‌فایر گردان گفته نمی‌شود بلکه با تغییراتی در آن آمپلی فایرهای گردان را می‌سازیم.



در روتور به جای یک جفت جاروبک که امتداد آن در امتداد محور تحریک است دو جفت جاروبک داریم که یک جفت آن به خروجی می‌رود و یک جفت آن اتصال کوتاه می‌شود که به این ساختار متادین گفته می‌شود.





ولتاژ القاء شده به خاطر جاروبک اتصال کوتاه باعث جاری شدن جریان می شود و این جریان میدان عکس العمل ایجاد می کند که این میدان خودش در روتور ولتاژ القا می کند و به این ترتیب چون یک روتور داریم پس پاسخ زمانی سیستم سریعتر شده است.



اگر یک سیم پیچی با جاروبک اتصال کوتاه شده سری کنیم متادین با سیم پیچی تقویت کننده خواهیم داشت.

شکل مربوطه

اگر یک سیم پیچی سری با جاروبک های در راستای تحریک برای خنثی کردن میدان های مخالف قرار دهیم در این صورت آمپلیدین را داریم.



در ماشین دو تا محور تعریف می کنیم محور طولی (هم راستا با محور سیم پیچی تحریک) و محور عرضی که عمود بر آن است.

شکل ۶-۸



در نیم دایره بالایی جهت میدان به سمت بالاست ϕ_q و جهت چرخش مشخص است پس به خاطر وجود جاروبک های طولی ولتاژی در جهت داخل القا می شود و در نیم دایره پایینی نیز به سمت بیرون است و جهت میدان که در اثر القا ولتاژ و ایجاد جریان در هادی های آرمیچر است در خلاف میدان و جریان تحریک است. حالا همین ϕ_d که مثل یک سیم پیچی تحریک عمل می کند و دوباره در هادی های آرمیچر ولتاژ القا می کند ولی در خلاف جهت قبلی

شکل ۷-۸ ولتاژها و جریانهای القایی



توجه داریم که دو سری هادی نداریم و فقط یک سری هادی داریم که در هر کدام دو سری ولتاژ القا می‌شود در بعضی هادی هم راستا و در بعضی هادیها در خلاف جهت است. در این جا یک میدان داریم که برای کم کردن و خنثی کردن این اثر از یک سیم‌پیچی جبران ساز استفاده می‌شود که در این صورت به آن آمپلی دین گفته می‌شود.

در این جا گین (ضریب بهره) به صورت زیر است:

$$\frac{E_d}{V_f} \quad \text{یا} \quad \frac{E_d}{I_f}$$



برای بدست آوردن گین به روابط ژنراتور DC مراجعه می‌کنیم:

$$E = k I_f \omega$$

$$E_{q1} = k_{qf} I_f \quad \leftarrow \text{مشخص } \omega \text{ با فرض } E_{q1} = k I_f \omega$$

$$E_{q2} = k I_d \omega = k_{qd} I_d \quad , \quad E_d = k I_{q1} \omega = k_{dq} I_{q1}$$

$$E_q = E_{q1} - E_{q2} = k_{qf} I_f - k_{qd} I_d = k_{dq} (I_{q1} - I_{q2})$$



$$E_q = R_q \cdot I_q \quad I_q = \frac{k_{qf} I_f - k_{qd} I_d}{R_q}$$

$$E_d = \frac{k_{dq} k_{qf}}{R_q} I_f - \frac{k_{dq} k_{qd}}{R_q} I_d$$

$$A = \frac{k_{dq} k_{qf}}{R_q} = \text{بهره بي باري متادين}$$

شکل ۸-۹ متادين



$$E_d = A I_f - G I_d$$

$$G = \frac{k_{dq} k_{qd}}{R_q} \quad I_d = 0 \rightarrow A = \frac{k_{dq} k_{qf}}{R_q}$$

اگر بخواهیم گین جریان را بدست آوریم باید خروجی آمپلی دین به یک بار وصل شده باشد و مقاومت محور d را R_d فرض می‌کنیم و بهره را به صورت زیر بدست می‌آوریم .

$$E_d = A I_f - G I_d = (R_L + R_d) I_d \quad \rightarrow \quad \text{بهره جريان} \quad \frac{I_d}{I_f} = \frac{A}{G + R_L + R_d}$$



$$\frac{I_d}{I_f} = \frac{A}{G + R_L + R_d} \quad \text{بهره جریان}$$

اگر صورت و مخرج را بر ω^2 تقسیم کنیم در این صورت A, G ثوابتی خواهند بود که به تعداد هادی‌ها و ... بستگی دارد.

$$\frac{I_d}{I_f} = \frac{\frac{A}{\omega^2}}{\frac{G}{\omega^2} + \frac{R_L + R_d}{\omega^2}} = \frac{k_1}{k_2 + \frac{R_L + R_d}{\omega^2}} \rightarrow I_d = \frac{k_1}{k_2 + \frac{R_L + R_d}{\omega^2}} I_f$$

شکل ۱۱-۸ نمودار $I_d(\omega)$



همانطور که گفته شد در متادین برای تقویت میدان خودی از یک سیم‌پیچ تقویت کننده استفاده می‌شود و میدان اصلی توسط میدان ایجاد شده روی محور d تضعیف می‌شود، برای رفع این مشکل از آمپلیدین استفاده می‌شود.

شکل ۱۲-۸ آمپلی دین



اگر در نظر بگیریم:

$$C = (\text{شار تضعیف کننده}) / (\text{شار جبران کننده}) = \frac{\square_c}{\square_d} \square \frac{N_c}{N_d}$$

$$E_q = E_{q1} - E_{q2} + E_{qc}$$

$$E_q = R_q \cdot I_q \rightarrow E_q = k_{qf} I_f - k_{qd} I_d + k_{qc} I_d$$

$$E_d = \frac{k_{dq} k_{qf}}{R_q} I_f + \frac{(c-1) k_{dq} k_{qd}}{R_q} I_d$$



$$c = \frac{E_{qc}}{E_{qd}} = \frac{\square_c}{\square_d}$$

اگر مقدار $c=0$ داشته باشیم همان رابطه مربوط به متادین را خواهیم داشت که در این صورت جبران سازی نداریم. و اگر $c=1$ در این صورت ولتاژ القا شده از I_d مستقل می شود و اگر $0 < c < 1$ یا $c > 1$ در این صورت ترکیب های مختلفی از آمپلی فایر گردان داریم.



تلفات در آمپلی فایرهای گردان

در ساختار یک آمپلی فایر گردان داشتیم:

شکل ۱۴-۸

جاروبک‌ها که متعامد هستند روتور را به چهار بخش که دارای مقاومت‌های اهمی یکسان هستند تقسیم می‌کند. اگر مدار را باز کنیم داریم:

شکل ۱۵-۸



اگر مقاومت کلی آرمیچر r_a باشد با فرض اینکه هر کدام از ربع‌ها متقارن هستند هر یک از مقاومت‌ها r_a می‌باشد و مقاومت کل هم r_a خواهد بود.

$$\text{تلفات مقاومت اهمی آرمیچر} = r_a I_a^2$$

$$\text{تلفات اهمی} = 2r_a \left(\frac{I_d}{2} - \frac{I_q}{2}\right)^2 + 2r_a \left(\frac{I_d}{2} + \frac{I_q}{2}\right)^2 = \frac{r_a}{2} [(I_d - I_q)^2 + (I_d + I_q)^2]$$

$$\text{تلفات اهمی} = r_a [I_d^2 + I_q^2]$$

$$\rightarrow I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$



بنام خدا

موتورهای خطی



مطالب کلی

۷ مقدمه

۷ قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

۷ ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

۷ شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

۷ آنالیز میدان

۷ موتور القائی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت

۷ بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوایی

۷ پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد موتور خطی

۷ پارامترهای موتور القائی

۷ مدار معادل موتور القائی خطی

۷ نتیجه گیری



مقدمه

سیستمهای الکترومغناطیسی را از نظر کاربرد به بخشهای زیر تقسیم نمود.

- ماشین های نیرو (فشار)
- ماشین های توان
- ماشینهای انرژی

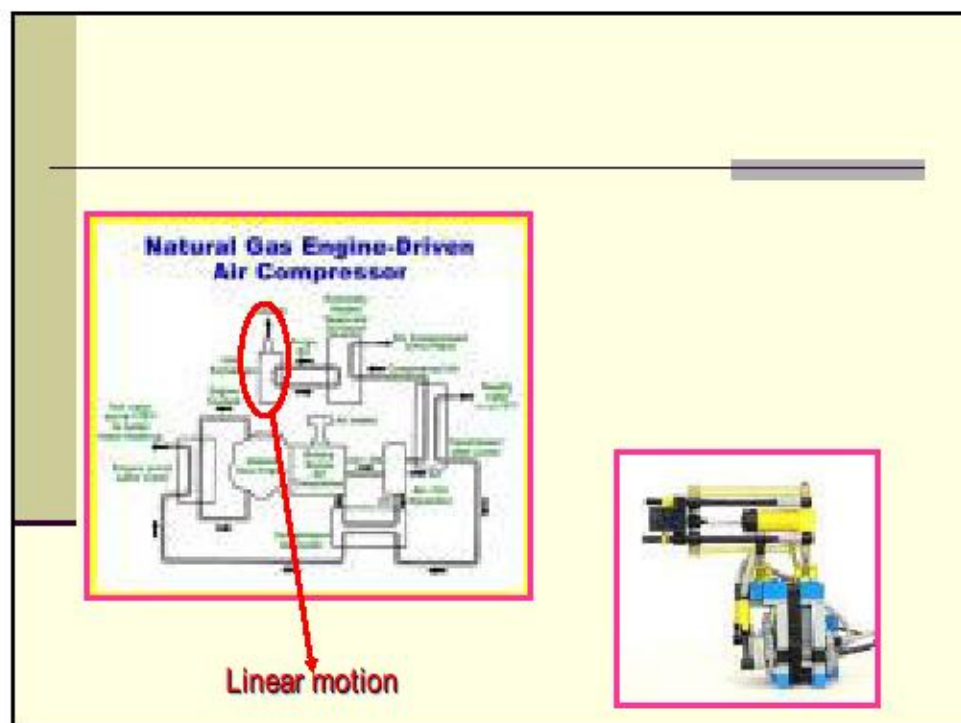


مقدمه

ماشین های نیرو، ماشینهای با زمان کارکرد کوتاه مدت می باشند که اساساً در حالت سکون با سرعتهای خیلی پائین کار می کنند. و در مقایسه با کارکرد و پاسخ کلی مسئله، راندمان چندان مهم نمی باشد.

ماشین های توان اغلب در سرعتهای متوسط یا بالا کار می کنند و ماشین های با زمان کارکرد پیوسته می باشند. این گونه ماشین ها در اندازه های کوچک خیلی مفید می باشند.

ماشین های انرژی ماشین هایی هستند با زمان کارکرد کوتاه و به عنوان شتاب دهنده کاربرد پیدا کرده اند.



مقایسه موتورهای خطی و دوار

Linear Motor	Rotary/Linear Conversion
Direct thrust	Rotary to linear mechanism required
Minimal maintenance	More maintenance
No internal moving parts	More wear
Virtually silent operation	Noisy
Very low inertia	Higher inertia

Linear Electric Motors provide direct thrust for the Advantages of linear motors

- Simple mechanical arrangement, minimum number of moving parts.
- Direct thrust motors, no backlash, no wear.
- Wide speed range, from microns / sec to >10m/s.
- High acceleration, high motor force to weight ratio 20G peak.
- Smooth, virtually silent motion.
- Maintenance-free motor, no internal moving parts.



Angular velocity ω radian / sec

Torque T N.m

Controlling the torque

$$T = K_t * I$$

where:

K_t = torque constant



Linear velocity V m / sec

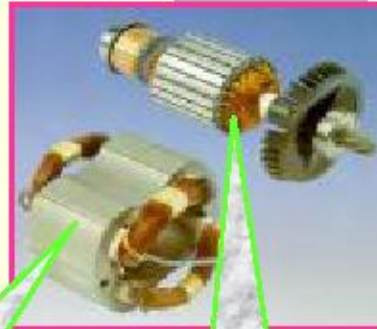
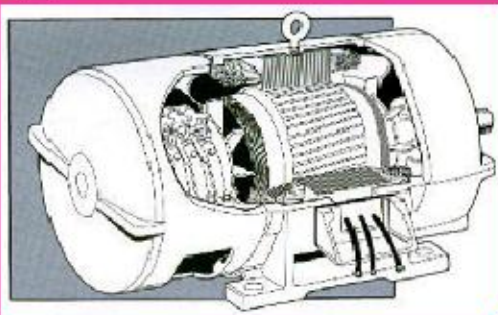
Force F N

Controlling the forces

$$F = K_f * I$$

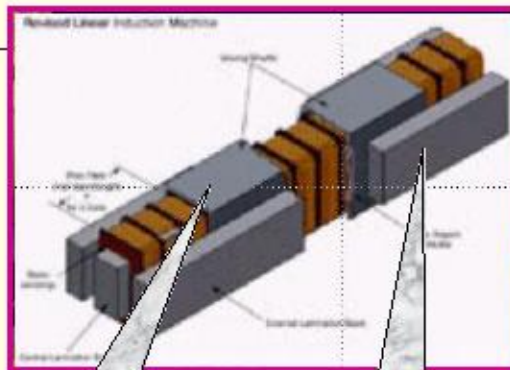
K_f = force constant

A rotating machine is consist of:



Stator fixed part

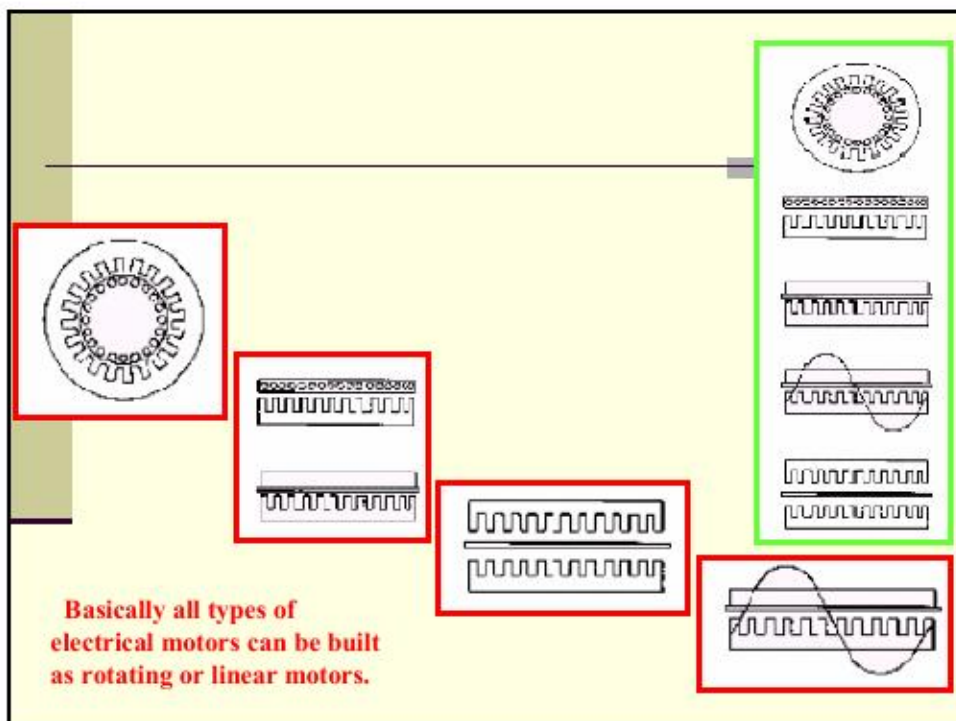
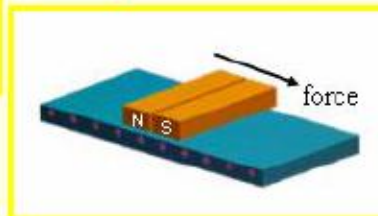
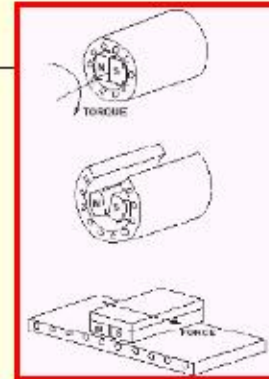
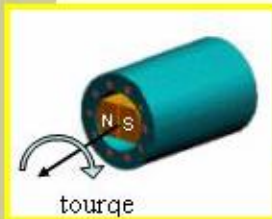
Rotor moveable part

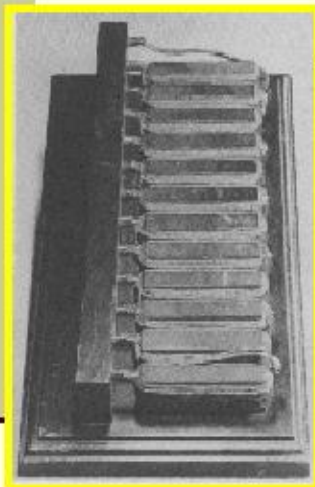
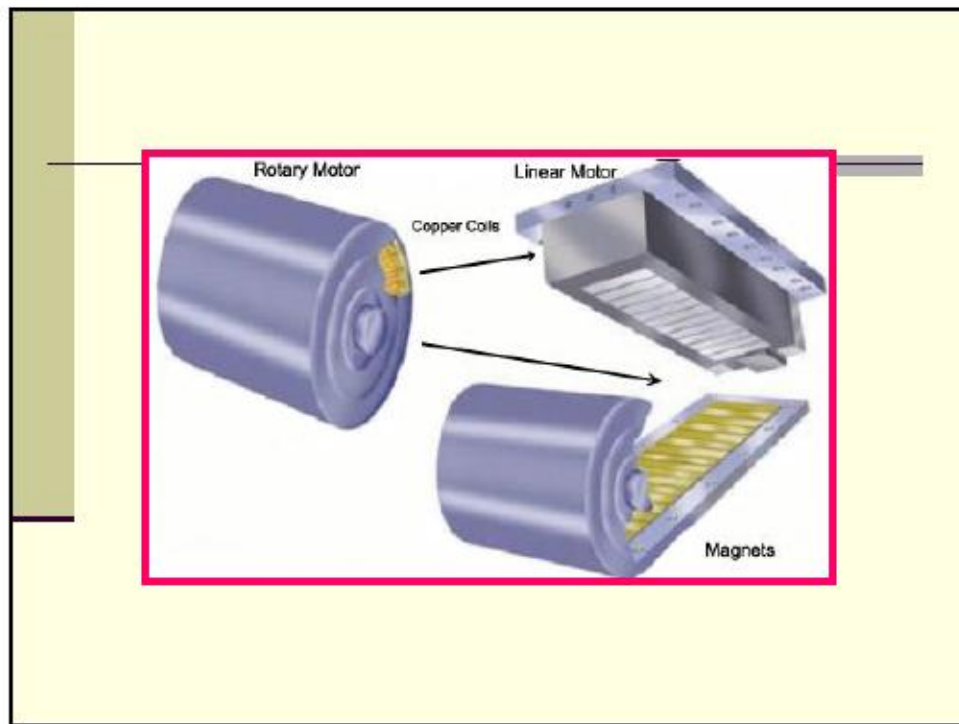


Slider moveable part

Stator fixed part

Fundamental of linear synchronous motors





First picture of a linear motor (Mr. Wheatstone 1845)

- q Electromagnetic Linear Motors are based on the same physical laws as rotating motors.
- q Basically all types of electrical motors can be built as rotating or linear motors.
- q Because of the outstanding performance of power and control most of the linear motors used for industrial applications are based on the principle of the brushless synchronous motors with permanent magnets.



مقدمه

موتورهای خطی لزوماً بهترین انتخاب برای هر کاری که دارای حرکت خطی است، نمی باشند

از دلایل این امر میتوان موارد زیر را برشمرد:

- از زمان اختراع تا پیشرفت این موتورها زمان زیادی میگذرد و گمان نمیرود تکنولوژی آن پیشرفتهای داشته باشد.
- راندمان نسبتاً کمی دارند.
- ذاتاً فاصله هوایی بزرگی دارند.
- کاربردهای خاصی دارند و ممکن است به درد کار خطی استفاده کننده نخورد.



مقدمه

دلایلی که موجب میشود با این همه عیوب ما باز به طرف موتورهای القایی خطی برویم:

- بی سرو صدایی این موتورها.
- ارزان بودن این موتورها.



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

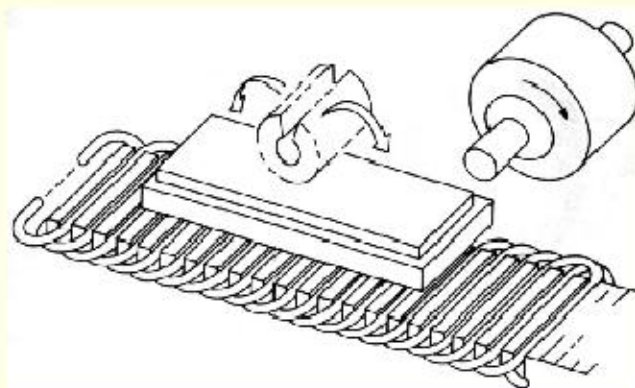
موتورهای خطی به انواع مختلفی قابل تقسیم هستند:

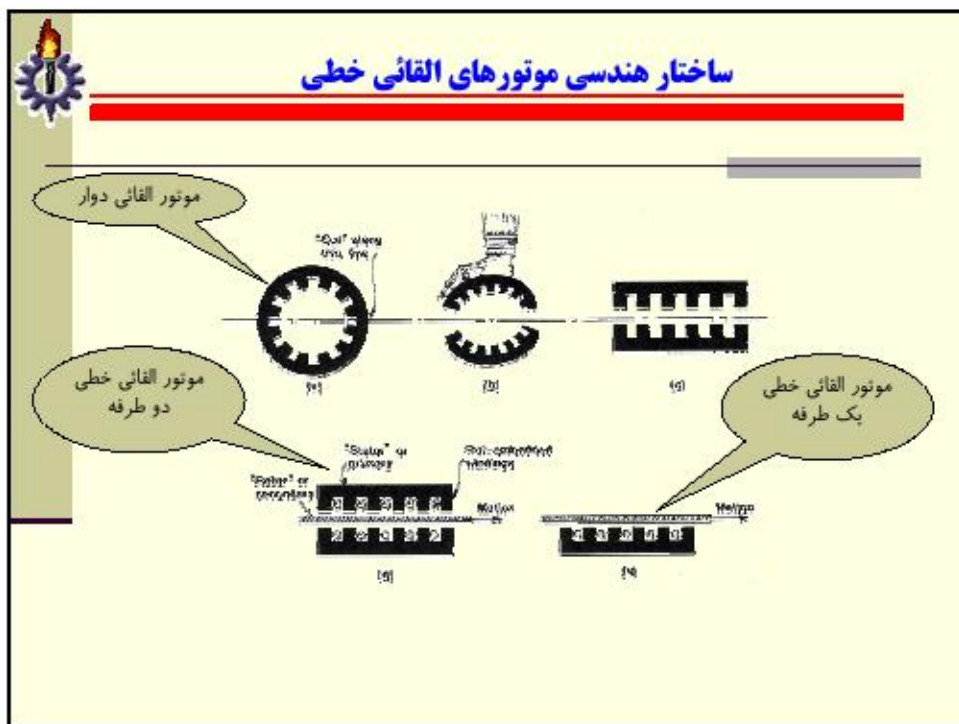
- موتورهای القایی خطی
- موتورهای سنکرون خطی
- موتورهای DC خطی
- موتورهای پله ای خط



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تجسم یک موتور القایی خطی با باز کردن یک موتور القایی و مسطح کردن آن بهتر صورت میپذیرد.





ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

با باز کردن موتور کلیه مشخصه های کاری، طراحی و خصوصیات مداری و مغناطیسی موتور تغییر می کند. از این موارد میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

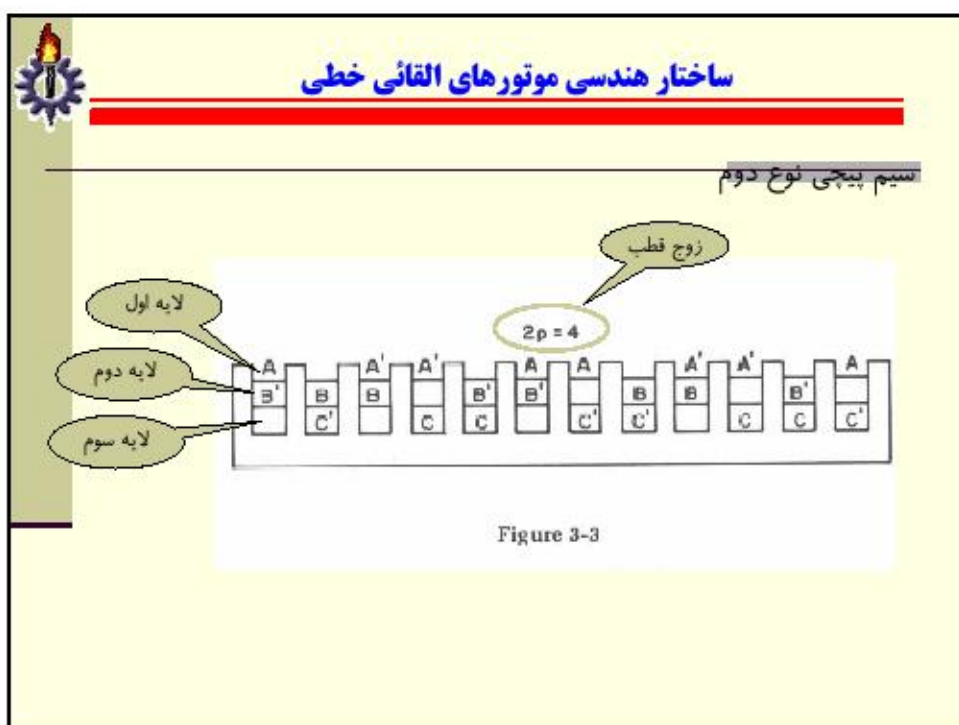
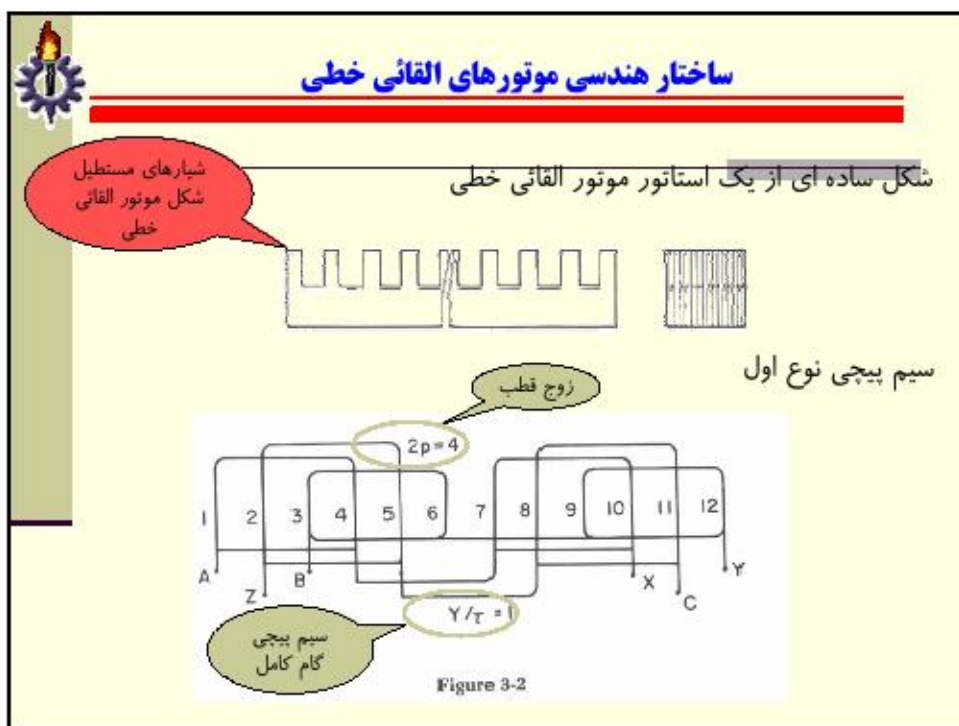
۱. نیروی گردشی موتور دوار تبدیل به نیروی رانشی در موتور خطی میشود.
۲. فاصله هوایی بسیار زیاد میشود.
۳. اثر لبه یا اثر انتها خواهیم داشت.
۴. افزایش مقدار مقاومت موثر ثانویه در موتور خطی.



ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

در عمل ساختارهای متفاوتی برای سیم پیچی استاتور موتورهای القائی خطی پیشنهاد می شود. اکثراً این سیم پیچی ها به هم شبیه هستند و گاهی هم اندازه هستند. در میان انواع مختلف سیم پیچی ها چهار نوع بیشتر مورد توجه هستند:

۱. سیم پیچی یک لایه با تعداد قطبهای زوج (شکل ۳-۲)
۲. سیم پیچی سه لایه با تعداد قطبهای زوج (شکل ۳-۳)
۳. سیم پیچی دولایه با تعداد قطبهای فرد و شیارهای انتهائی با نیمه پر (شکل ۳-۴)
۴. سیم پیچی اقتصادی برای هر موتور القائی خطی با قدرت کم (شکل ۳-۵)



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تشریح قانون مسیر شار مغناطیسی:

هسته الکترومغناطیسی

صفحه آهنی

انرژی ذخیره شده در میدان

$$W_m = \frac{B^2}{2\mu_0} (Ax)$$

نیروی منتجه

$$F_e = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad \text{N}$$

نیروی بالا برنده الکترومغناطیسی

$$f_e = \frac{F_e}{A} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad \text{N/m}^2$$

قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تشریح قانون مسیر شار مغناطیسی:

دیده میشود اگر چگالی شار برابر یک تسلا باشد نیروی برابر $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ تولید میشود.

تشریح قانون نیروی آمپر:

اگر یک هادی به طول ۲۵ سانتیمتر یک جریان ۲۰ آمپر را حمل کند و در یک میدان ۰/۴ تسلا قرار بگیرد از قانون آمپر داریم:

$$F_e = I l B \sin(\theta) = 20 \times 0.25 \times 0.4 \times \sin(90^\circ) = 2 \text{ N}$$



شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

- موتور خطی بر خلاف موتور دوار در مسیر حرکتش یک ابتدا و یک انتها دارد. این خصوصیت تولید اثر دو انتها خواهد کرد.
- اغلب موتورهای خطی روتورهایشان فاقد میله های هادی یا سیم پیچهای الکتریکی است و عضو متحرک در یک موتور خطی تقریباً همیشه از صفحه یا ورقه های یکپارچه ساخته می شود.
- فاصله هوایی در موتور خطی نسبتاً بزرگ می باشد. که جزء لاینفک موتور خطی می باشد. در یک موتور دوار فاصله هوایی تا حد امکان کوچک می باشد بعلاوه جریان مغناطیسی نسبتاً خوبی دارد. فاصله هوایی اثر نامطلوبی روی رفتار موتور خطی می گذارد.



شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

- در موتورهای خطی ثانویه یا روتور پهن تر از اولیه می باشد. این خصوصیت که ویژه موتورهای خطی می باشد، تاثیر مهمی روی عملکرد موتور دارد.
- در موتورهای خطی یک طرفه نیروی عمودی (نیروی نرمال) وجود دارد، که این نیرو ممکن است جاذبه یا دافعه باشد. این نوع نیرو در موتورهای دوار وجود دارد ولی دیده نمی شود. این نیروهای نرمال بر سطح استاتور نیروهای متعادل کننده برونسو هستند که در موتورهای دوار در محیط پیرامون فاصله هوایی قرار دارند بطوری که اگر موتور دارای شکل متعادل هندسی باشد. این نیروهای عمود بر سطح یکدیگر را خنثی می کنند و اگر موتور متعادل مرکز نباشد، موتور دوار حاوی نیروی نرمال خالص خواهد بود.



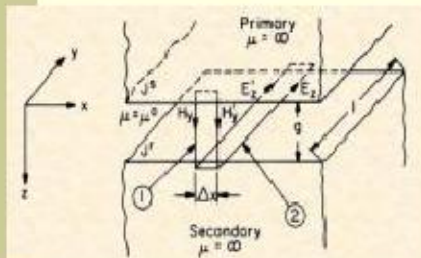
شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابیه دوارش

- شباهتگیری و کاستن از سرعت موتورهای خطی به نحو مطلوبی امکان پذیر است.
- حفاظت مکانیکی و الکتریکی و قابلیت تحمل شرایط محیطی نامتقارن نسبت به مشابیه دوارش بهتر صورت می‌پذیرد.
- نگهداری، تعمیر و تعویض موتورهای خطی ساده می‌باشد.
- توانائی اعمال نیرو در ثانویه بدون اینکه نیازی به کنتاکت مکانیکی باشد. و نیز کنترل مناسب و راحت نیرو و سرعت نیز از مزایای این نوع موتورها می باشد



آنالیز میدان

۱- به جای جریان جاری در سیم پیچهای اولیه، یک لایه جریان بی نهایت نازک در هر طرف فرض می کنیم ($JS/2$). همچنین به جای جریان القائی جاری در صفحه ثانویه یک لایه جریان بی نهایت کوچک در نظر می گیریم (Jr).



۲- با توجه به شکل مقابل فرض می کنیم اولیه و ثانویه در امتداد X از دو طرف تا بی نهایت ادامه یافته باشند. و نیز فرض می کنیم ثانویه تا بی نهایت از دو طرف در امتداد Z ادامه یافته باشد.

۳- اولاً آهن دارای پرماییلیته بی نهایت باشد تا به اشباع نرود. ثانیاً هسته های اولیه نیز از ورقه های نازک در نظر می گیریم.

۴- فاصله هوائی را به اندازه کافی کوچک فرض می کنیم به طوری که اندوکسیون فاصله هوائی فقط در امتداد Z باشد.



آنالیز میدان

۵- ثانویه را به اندازه کافی نازک فرض می کنیم طوری که اثر پوستی در آن قابل صرف نظر باشد.

$$H'_y = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Delta x + H_y \quad E'_z = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Delta x + E_z \quad j_r = \sigma' E_z \quad \sigma' = \sigma d$$

$$\oint H \cdot dl = \oint j_s \cdot ds \quad g_c \frac{\partial H_y}{\partial x} = j_s + j_r \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

$$g_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0} \frac{\partial j_s}{\partial x} \quad \leftarrow \text{معادله درجه دوم میدان معروف}$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma' U_x}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial x} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0} \frac{\partial j_s}{\partial x} \quad U_x \text{ سرعت نسبی اولیه و ثانویه}$$



موتور القائی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت

- ورقه های تشکیل دهنده هسته اولیه در جهت تا بی نهایت امتداد داده شده اند.
- ثانویه در جهت Y تا بی نهایت امتداد دارد.
- سیم پیچی تحریک جاسازی شده در شیارهای اولیه برای راحتی ساختمان مسطح شده تا تحریک ماشین را مثل یک صفحه جریان با ضخامت ناچیز و پهنای بی نهایت فرض می کنیم.
- حرکت ثانویه فقط در جهت X است.
- ثابتهای فیزیکی لایه ها هم جنس، هم شکل و خطی اند.
- مواد فرو مغناطیسی به کار رفته هیچ وقت به اشباع نمی روند.
- از تغییرات در جهت Z صرف نظر می شود
- تمام جریانها فقط در جهت Z جاری می شوند.
- ساختمان اولیه از آهنهای مورق تشکیل شده تا قابلیت هدایت در جهت Z را قابل صرف نظر کند.
- تغییرات مکان و زمان به صورت سینوسی می باشد.



آنالیز موتور القائی خطی ایده آل

نتایج زیر را می توان در مورد فرضهای اخیر نتیجه گرفت:

- ۷ یک نقطه شروع برای تحلیل را مهیا می سازند.
- ۷ امکان تحلیل به صورت ریاضی وجود دارد.
- ۷ ثانویه از یک هادی صلب تشکیل شده که فقط در یک جهت حرکت می کند.
- ۷ مسئله به دو بعد کاهش می دهند و به صورت میدان دو بعدی بیان می کنند.
- ۷ هسته اولیه مورق می باشد. این امر موجب می شود که تلفات هسته را صفر در نظر بگیریم.



آنالیز موتور القائی خطی ایده آل

مقدار متوسط نیروی محوری

$$F_x = \frac{SB_m^2 \delta V_s \lambda L}{4|\Delta^2| \operatorname{Re}(\alpha)}$$

$$\Delta = \cosh \beta g + \frac{d\mu_0}{\beta \mu} \sinh \beta g$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{\tau}$$

$$\alpha^2 = \beta^2 + jS\omega\mu_0\sigma_s$$



بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوائی

$$(j\beta)^2 \beta_y - \frac{1}{g} (j\omega s \mu_0 \sigma') \beta_y = \frac{1}{g} (-j\beta) j_m$$

$$\beta_y = \frac{j\mu_0 j_m \frac{\beta}{g}}{\beta^2 + j\omega s \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0}} = \frac{\mu_0 j_m}{g\beta(sG - j)}$$

G : ضریب مرغوبیت ماشین نامیده می شود

$$G = \omega \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0 \beta^2} = \frac{2f \mu_0 \sigma d \tau^2}{g_0 \pi} = \frac{\mu_0 U_s d \sigma}{g_0 \pi}$$



پارامترهای تأثیر گذار بر عملکرد موتور خطی

اثرات تغییرات برخی از پارامترها را بر روی پارامترهای دیگر در موتورهای خطی		
پارامتر مورد نظر	اثرات افزایش	اثرات کاهش
فاصله هوائی	زیاد شده جریان مغناطیسی افزایش تلفات نهائی	افزایش ضریب مرغوبیت، افزایش راندمان زیاد شدن تعداد قطبها
گام قطبی	زیاد شده ضریب مرغوبیت کاهش ضخامت آهن پشتیان	زیاد شدن تعداد قطبها
تعداد قطبها	کاهش اثر دو انتها	افزایش راکتانس نشتی ثانویه
ضخامت ثانویه	افزایش ضریب مرغوبیت افزایش جریان راه اندازی	افزایش راکتانس پراکندگی
قابلیت مقامتی ثانویه	کاهش اثر دو انتها	افزایش ضریب مرغوبیت کاهش تلفات در ثانویه
پهنای دندانه ها	افزایش راکتانس نشتی	افزایش نیرو و راندمان



پارامترهای موتور القائی

سرعت سنکرون

سرعت سنکرون موتور خطی معادل سرعت موج سیار ناشی از سیم پیچ اولیه نسبت به آن است مانند حالت موتور گردان موج سیار در هرسیکل منبع جریان متناوب دو گام قطب حرکت میکند. سرعت سنکرون موتور القائی خطی عبارتند از:

$$v_s = 2\tau f \quad (\text{m/s})$$

که τ گام قطب و f فرکانس منبع میباشد.

سرعت روتور V و کمتر از سرعت سنکرون میباشد. لغزش عبارتند از:

$$s = \frac{v_s - V}{v_s}$$



پارامترهای مدار موتور القائی

مدار معادل موتور القائی خطی

یک موتور القائی خطی چند قطب را میتوان با تقریب خوب توسط مدار معادلی همانند مدار معادل موتور القائی معمولی نمایش داد. اما دارای تفاوتهای زیر میباشد:

۱. به علت فاصله هوایی زیاد **مقاومت مغناطیس کننده کم** است.
۲. مقاومت موثر ثانویه بعلت توزیع جریان در ثانویه و اثرلیه نسبتاً بالاست.
۳. ضریب القاء پراکندگی ثانویه بعلت توزیع جریان ثانویه تمایل دارد **زیاد** باشد.
۴. به علت فاصله هوایی زیاد شار فاصله هوایی کم است و **تلفات هسته کم** است.

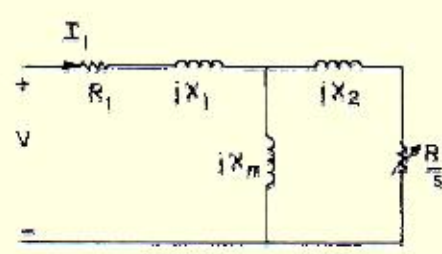
پارامترهای مدار معادل موتور القایی

$$\lambda_s = \frac{h_s}{12} (1 + 3\beta_1), \lambda_d = \frac{5 \frac{g_{ci}}{W_s}}{5 + 4 \frac{g_a}{W_s}}, \lambda_c = 0.3(3\beta_1 - 1)$$

$$X_1 = \frac{2\mu_0 \omega}{p} \left[\lambda_s \left(1 + \frac{3}{2p} \right) + \lambda_d \frac{2a}{q} + \lambda_c L_{cc} \right] W_1^2 = K_1 W_1^2$$

$$X_m = \frac{12\mu_0 \omega a_c K_{w1} W_1^2 \tau}{\pi^2 p g_{ci}} = K_m W_1^2$$

$$R_1 = \frac{1}{2\sigma_c} \frac{4a + 2L_{cc}}{W_1 I_1} j_c^2 W_1^2 = K_{R1} W_1^2$$

$$R_2' = \frac{X_m}{G_{ci}} = \frac{12a_c K_{w1} W_1^2}{d p \tau \sigma_{ci}} = K_{R2'} W_1^2$$


پارامترهای موتور القایی

$$F_x = \frac{3I_2'^2 R_2' \frac{1-s}{s}}{U_s (1-s)} = \frac{3I_2'^2 R_2'}{S U_s} = \frac{3I_1'^2 R_2'}{2s\tau f \left[1 + \left(\frac{1}{sG_{ci}} \right)^2 \right]}$$
 ← نیروی رانش
$$F_c = 2a_c \frac{p\tau^3}{\pi^2} \frac{\mu_0 j_m^2}{g_{ci}^2 (1 + G_{ci}^2)} \left[1 - \left(\frac{\pi}{\tau} g_{ci} s G_{ci} \right)^2 \right]$$
 ← نیروی نرمال
$$\eta = \frac{3I_2'^2 R_2' \frac{1-s}{s}}{3I_1'^2 R_1 + 2I_2'^2 \frac{R_2'}{s}} = \frac{F_x U_s (1-s)}{3I_1'^2 R_1 + F_x U_s}$$
 ← راندمان
$$\cos\phi = \frac{3I_1'^2 R_1 + F_x U_s}{3VI}$$
 ← ضریب قدرت



پارامترهای مدار موتور القایی

$$P_{\text{ma}} = \frac{R'_r}{s} (I'_a)^2 + \frac{1-s}{s} R'_r (I'_a)^2 \quad W \quad \leftarrow \text{توان مکانیکی}$$

$$P_{\text{mech}} = Fv = \frac{2(1-s)}{s} R'_r (I'_a)^2 \quad W \quad \leftarrow \text{قدرت خروجی هر فاز}$$



نتیجه گیری

برای تحلیل موتورهای القایی خطی کلیه روابط موجود برای موتورهای القایی گردان معتبر هستند، تنها مهمترین تغییر لازم در تحلیل، سرعت سنکرون میباشد.
ولی روابط ها همان روابط میباشد. نمودارهای عملکردی مشابه ای نیز دارند.



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

بر مبنای قوانین مسیر شار مغناطیسی و قانون نیروی آمپر میتوان انواع مختلفی از موتورهای خطی را گسترش داد:

- موتورهای القایی خطی
- موتورهای سنکرون خطی
- موتورهای DC خطی
- موتورهای پله ای خطی

این موتورهای خطی حرکاتی همچون دوار، پله ای، ضربه ای، خطی در یک جهت، نوسانی را تولید میکنند. این دو قانون یا هر دو یا یکی از آنها به طریقی در این موتورها مورد استفاده قرار میگیرند.



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

کلیه موتورهای خطی بر اساس دو قانون زیر توسعه داده شده اند و اصول کلیه این موتورها بر اساس این دو قانون میباشد:

- مسیر شار مغناطیسی (*Alignment of magnetic flux*)
- قانون نیروی آمپر یا معادله نیروی لورنتز

یک راه کار مناسب جهت درک فرایند تولید نیرو در موتور خطی از طریق قانون همپلتون میباشد. نتیجه ای که میتوان از این قانون گرفت این است که حرکت تولید شده ناشی از نیرو باعث مینیمم شدن میزان انرژی ذخیره شده مغناطیسی در سیستم میشود. این نتیجه با مسیر شار مغناطیسی سازگار است.

نیروی که از تغییر میزان انرژی ذخیره شده در سیستم به وجود میآید را میتوان توسط معادلات زیر نمایش داد:



قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

$$F_c = \frac{\partial W_m}{\partial x}(\lambda, x) \quad N$$

شار پیوندی یک متغیر وابسته است و داریم:

$$F_c = -\frac{\partial W_m}{\partial x}(i, x) + i \frac{\partial \lambda}{\partial x}(i, x) \quad N$$

W_m میزان انرژی ذخیره شده در سیستم میباشد.

F_c نیروی الکتریکی میباشد.

نیروی به وجود آمده از واکنش میان جریان i عبور

کننده از یک هادی به طول l در یک میدان

مغناطیسی B به صورت زیر میباشد:

$$\vec{F}_c = \vec{I} \times \vec{B} \quad N$$

بنام خدا

موتور dc بدون جاروبك

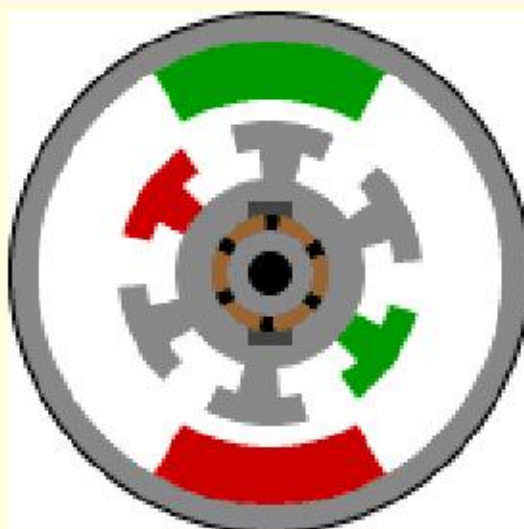
موتور dc بدون جاروبك

موتورهاي dc بدون جاروبك

اگر چه ارائه نظریه مربوط به موتور dc بدون جاروبك به بیش از نیم قرن پیش باز می گردد، اما تنها در طول دو دهه گذشته بز این اساس سیستمهای عملی موثر و ارزشمندی ساخته شده اند.

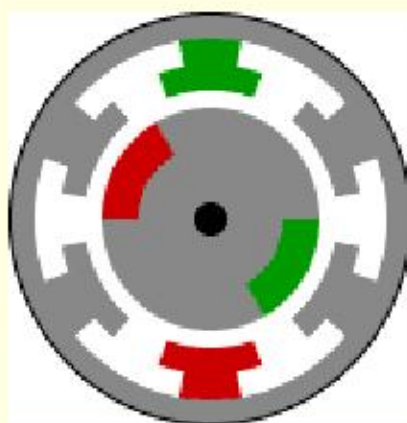
از مهمترین عواملی که به افزایش محبوبیت این نوع محرک منجر گردیده، مربوط به بهبودهایی است که در زمینه مواد آهنربائی و کاهش قیمت مدارهای مجتمع (IC ها) و ساخت کلیدهای الکترونیک قدرت ولتاژ بالا، جریان بالا میباشد.

موتور dc بدون جاروبک



موتور DC
اثریابی
دائم

موتور dc بدون جاروبک



روتور اثریابی دائم برای موتور DC بدون جاروبک

موتور dc بدون جاروبک



موتور dc بدون جاروبک

موتورهای dc بدون جاروبک مشخصه های مطلوب دو موتور معمول را با یکدیگر ترکیب می کنند. قابلیت گشتاور ایستای موتور معمول dc با جاروبک علاوه قابلیت عملکرد سرعت بالای مربوط به موتور رلکتانس یا موتور القایی

برخی از مزایایی که سیستم های محرکه dc بدون جاروبک ارائه می کنند به صورت زیر خلاصه می شود:

موتور dc بدون جاروبک

کارکرد در سرعت‌های بالاتر نسبت به ماشینهای dc

قابلیت اطمینان بیشتر و عدم نیاز به تعمیر

حذف انواع تداخل فرکانس رادیویی

از بین بردن جرقه زدن جاروبک

کاهش وزن و حجم موتور

حذف لوازم
جاروبک و
کموتاتور

موتور dc بدون جاروبک

حذف تلفات مسی روتور

بهبود قابل توجه در مشخصه‌های حرارتی

کاهش قطر روتور نسبت به موتور معمول

کوچکی اینرسی روتور و شتاب سریعتر

روتورهای
آهنربای
دائم

موتور dc بدون جاروبک

اجزای اصلی یک سیستم محرکه dc بدون جاروبک شامل:

عضو سیم پیچی شده ثابت یا استاتور

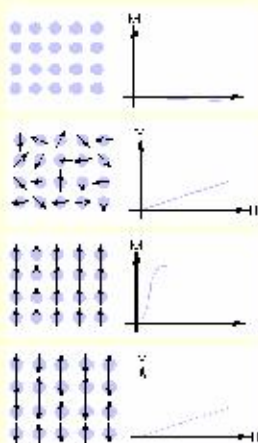
روتور حامل سیستم تحریک آهنربای دائم

حسگرهای موقعیت روتور

بدلیل اهمیت مواد آهنربای دائم در اینگونه موتورها بطور خلاصه به این موضوع میپردازیم:

موتور dc بدون جاروبک

انواع مواد از نظر مغناطیسی:



دیامغناطیسها

پارامغناطیسها

فرومغناطیسها

آنتی فرومغناطیس

1
H

Ferromagnetic

Antiferromagnetic

3
H

Paramagnetic

Diamagnetic

3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne												
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar												
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																		
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																		
87 Fr	88 Ra	89 Ac																101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

58
Ce

59
Pr

60
Nd

61
Pm

62
Sm

63
Eu

64
Gd

65
Tb

66
Dy

67
Ho

68
Er

69
Tm

70
Yb

71
Lu

موتور dc بدون جاروبک

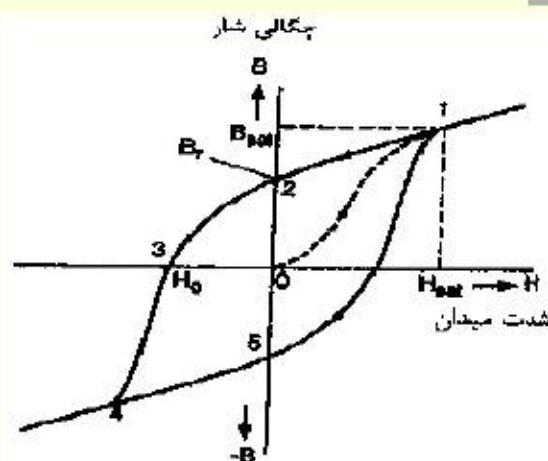
مواد آهنربای دائم:

- میدان مغناطیسی از طریق دو نوع آهنربا میتواند ایجاد شود: آهنربای الکتریکی و آهنربای دائم
- هنگامی که میدان مغناطیسی با آهنربای الکتریکی ایجاد شود، اگر چه انرژی میدان تحریک همچنان باقی می ماند اما با این حال قدری انرژی، تلفات اهمی جریان تحریک، از بین خواهد رفت
- بخاطر برخی مزایای آهنرباهای دائم در دسته ای از ماشینهای الکتریکی برای ایجاد میدان تحریک، مورد استفاده قرار گیرند.

موتور dc بدون جاروبک

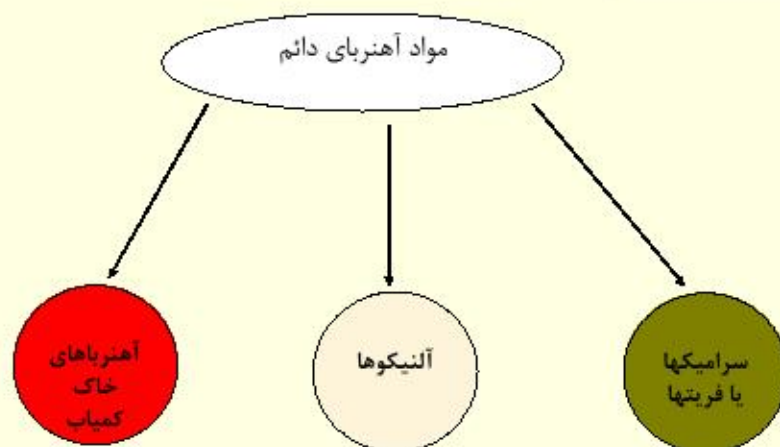
- آهنرباهای دائم در واقع مواد مغناطیسی سخت با حلقه‌های هیستریزس بزرگ می‌باشند.
- زمانی که یک ماده آهنربا در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد رفتار چگالی شار با تغییر شدت میدان مغناطیسی در ماده، مبین خواص ماده مغناطیسی ماده می‌باشد.
- مقدار چگالی شار در نقطه 2 روی حلقه هیستریزس ($H=0$) به عنوان چگالی شار باقیمانده یا پسماند ماده آهنربا شناخته شده، و نشان دهنده مقدار شار مغناطیسی است که ماده می‌تواند تولید کند.
- حلقه هیستریزس در ربع دوم به عنوان منحنی مغناطیس زدایی نرمال شناخته می‌شود که مهمترین ناحیه مشخصه آهنربا می‌باشد.
- مقدار میدان مغناطیسی که در آن چگالی شار در آهنربا به صفر می‌رسد به عنوان پسماند زدایی یا نیروی پسماند زدا شناخته می‌شود.

موتور dc بدون جاروبک



شکل ۱-۵ حلقه هیستریزس آهنربای دائم.

موتور dc بدون جاروبک



موتور dc بدون جاروبک

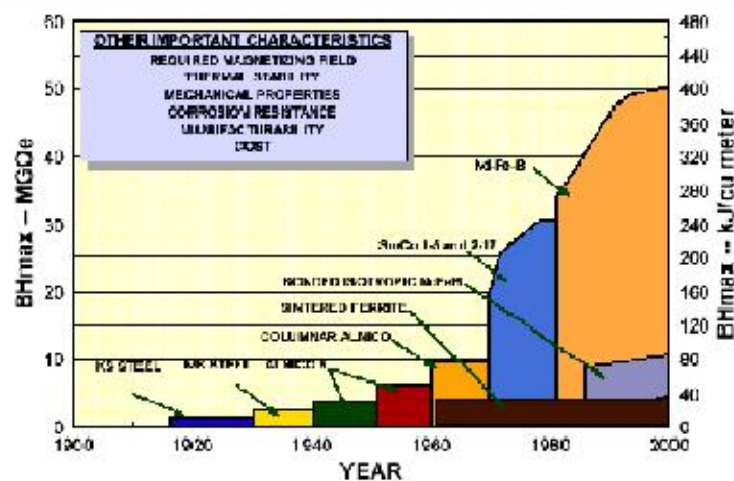
- فریتها (سرامیکهای کاملاً مغناطیسی) عایقهای حرارتی و الکتریکی هستند در حالی که سایر آهنرباها، هادیهای فلزی می باشند.
- آلنیکوها پسماند نسبتاً زیاد و نیروی پسماند زدای کمی دارند، اما سرامیکها دارای پسماند کم و نیروی پسماند زدای نسبتاً زیادی می باشند، در حالی که در مورد آهنرباهای خاک کمیاب، هر دوی این پارامترها بزرگ می باشد.
- سرامیکها به عنوان مواد خام فراوان و خیلی ارزان مورد استفاده قرار می گیرند. آلنیکوها و آهنرباهای کبالت مخاک کمیاب (کبالت - ساماریوم) از کبالت اما با درصدهای مختلف استفاده می کنند، در حالی که در سرامیکها و آهنرباهای فریت - خاک کمیاب (آهنرباهای نئودیمیوم - آهن - بورون) اصلاً از کبالت استفاده نمی شود.

موتور dc بدون جاروبک

خواص مغناطیسی:

- مناسب ترین پارامتر برای تعیین کیفیت آهنربا، انرژی ماکزیموم آن است که حاصل ضرب میدان مغناطیسی و چگالی شار آهنربا می باشد. این پارامتر بیانگر ماکزیموم انرژی است که می توان از آهنربا بدست آورد.
- وقتی که آهنربا در نقطه حاصل ضرب انرژی ماکزیموم خود کار می کند، ابعاد آن مینیموم می باشد.
- بیش از این بهترین آهنرباهای دائم مواد کبالت - خاک کمیاب (ساماریم کبالت) بودند که دارای حاصل ضرب انرژی ماکزیمومی بین 190 - 130 کیلو ژول بر متر مکعب بودند.
- در سال 1984 با ظهور ترکیب نئودیمیوم - آهن - بورون بدون کبالت که انرژی ماکزیموم 290 کیلو ژول بر متر مکعب را داشت، این وضعیت تغییر یافت. سرعت گسترش و پیشرفت این ماده جدید در طول چند سال گذشته بسیار سریع بوده به طوریکه هم اکنون این ماده در ابعاد تجاری از طریق تولید کنندگان آهنربا، قابل دسترسی است.

موتور dc بدون جاروبک



موتور dc بدون جاروبک

مشخصه آهنربا	$(BH)_{\max}$ (KJ / m^3)	B_r (T)	H_c (KA / m)	قیمت واحد
Nd-Fe-B	۲۰۰-۲۹۰	۱/۲۰	۸۷۰	۲/۳
SmCo ₅	۱۳۰-۱۹۰	۰/۹۷	۷۵۰	۵/۷
Sm ₂ Co ₁₇	۱۸۰-۲۴۰	۱/۰۵	۶۶۰	۵/۱
Alnico	۷۰-۸۵	۱/۱	۱۳۰	۲/۷
Ceramics	۲۷-۳۵	۰/۴	۲۴۰	۰/۳

موتور dc بدون جاروبک

۱) گر چه در جدول قبل خواص مغناطیسی گروههای اصلی مواد آهنربا همراه با قیمت تقریبی هر واحد انرژی آنها، نشان داده شده اما هر گروه از مواد، خود دارای چندین درجه است، بنابراین محدوده وسیعی از حاصل ضرب انرژی ماکزیموم وجود خواهد داشت.

۲) پسماند و پسماند زدایی برای انواع گروههای به کار گرفته شده در ماشینهای الکتریکی، به صورت مقادیر متوسط داده شده است. خواص انواع مواد نئودیمیوم - آهن - بورون و سرامیکهای استحکام یافته با پلیمر و خانواده آلنیکو که قیمت انرژی پایینی دارند در این جدول مورد مقایسه قرار نگرفته اند.

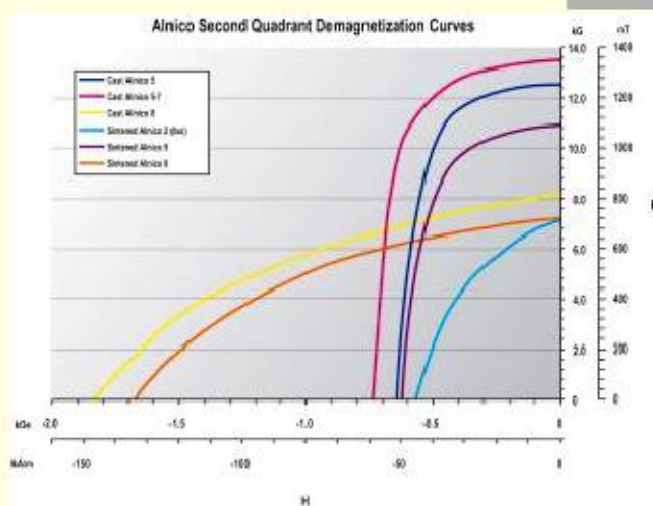
۳) باید توجه شود که قیمت یک آهنربای دائم عمدتاً به ابعاد، پیچیدگی ماشین کاری لازم بر روی آن، و دقتهای مورد نیاز برای ابعاد و خواص مغناطیسی آهنربا بستگی دارد. بین انواع مواد در هر گروه نیز از نظر قیمت، تفاوتی وجود دارد. قیمت هر واحد انرژی که در جدول آورده شده، در واقع قیمت متوسط می باشد و برای مقایسههای اولیه می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

موتور dc بدون جاروبک



مقایسه اندازه انواع آهنرباها
با محتوای انرژی یکسان :

موتور dc بدون جاروبک



موتور dc بدون جاروبک

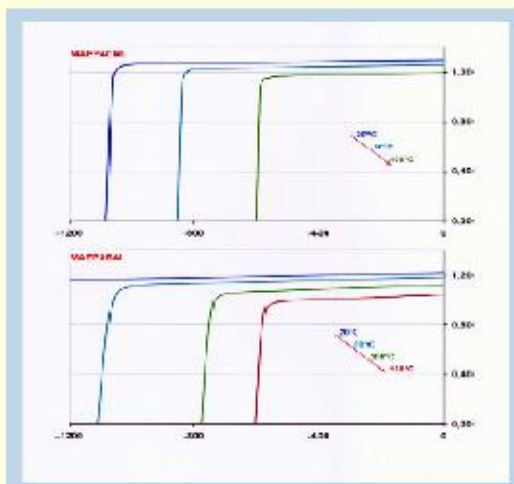
خواص حرارتی:

- وقتی دما افزایش می یابد، خواص مغناطیسی قدری کاهش می یابد، که بخشی از آن برگشت پذیر و بخشی برگشت ناپذیر است.
- تغییرات برگشت پذیر در پسماند و نیروی پسماند زدا معمولاً برحسب درصد بر کلون بیان شده که به ترتیب به کمک ضرایب حرارتی α و β نشان داده می شود.
- تغییرات برگشت ناپذیر تابعی از دما، نقطه کار آهنربا، و شدت میدان مغناطیس زدا می باشند.
- دمای کوری دمای لازم برای از بین بردن کامل خاصیت آهنربایی است. در دمای کوری ماده، هر گونه خاصیت مغناطیسی از بین خواهد رفت، و در دمای کمتر مغناطیس کنندگی مجدد مورد نیاز خواهد بود.

موتور dc بدون جاروبک

مشخصه آهنربا	دمای کوری	α (%/K)	β (%/K)	ماکزیمم دمای کاری
Nd-Fe-B	۳۱۰	-۰/۱۳	-۰/۶۰	۱۴۰
SmCo	۷۲۰	-۰/۰۴۵	-۰/۲۵	۲۵۰
Alnico	۸۳۰	-۰/۰۲	-	۵۰۰
Ceramics	۴۵۰	-۰/۲۰	-	۳۰۰

موتور dc بدون جاروبک



تغییرات حلقه هیستریزس
با دما برای دو نمونه ماده

موتور dc بدون جاروبک

موتور

بیشتر موتورهایی که در محرکه های dc بدون جاروبک به کار رفته اند، موتورهای سه فازی هستند با یک سیم پیچ بیرونی ساکن به عنوان استاتور (آرمیچر) و روتوری که متشکل از آهنربای دائم گردان (میدان) می باشد.

موتورهایی که در محرکه های dc بدون جاروبک با عملکرد زیاد به کار می روند، از آهنرباهای خاک کمیاب استفاده می کنند، در حالی که آهنرباهای سرامیکی در محرکه های با عملکرد متوسط، نسبتاً ارزان، به کار برده می شوند.

موتور dc بدون جاروبک

▮ هنگامی که آهنرباهای سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بارگذاری مغناطیسی ویژه (یا چگالی شار فاصله هوایی)، ماکزیموم مقداری در حدود 0/2 تسلا خواهد داشت. بنابراین، استاتور (آرمیچر) باید دندانه‌های باریک و شیارهای پهنی داشته باشد.

▮ اما از سوی دیگر در طراحی آهنرباهای خاک کمیاب، کمترین حجم برای آهنربا زمانی بدست خواهد آمد که نقطه کاری آهنربا در حدود 0/55 تسلا باشد.

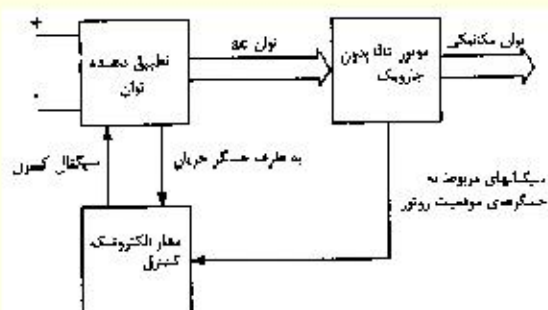
موتور dc بدون جاروبک

▮ نحوه کلید زنی این موتورها به گونه ای است که در هر لحظه فقط دو فاز تحریک میشوند.

▮ تعداد موثر هادیهای آرمیچر دو سوم برابر تعداد واقعی هادیها خواهد بود که بارگذاری الکتریکی ویژه نیز بر مبنای تعداد موثر هادیها در نظر گرفته می شود.

▮ سیم پیچی استاتور، به روشی مشابه با سیم پیچی اولیه یک موتور القایی چند فاز طراحی می گردد. در حقیقت، در بسیاری از کاربردهای صنعتی این امکان وجود دارد که، استاتور یک موتور القایی را مورد استفاده قرار داد.

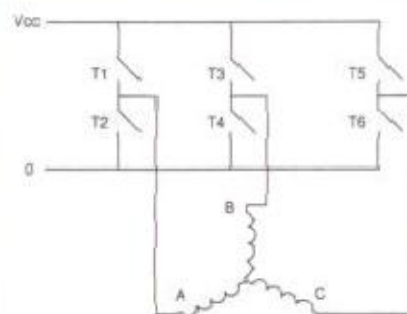
موتور dc بدون جاروبک



شکل ۲-۶ طرح بلوک دیاگرام محرکهای dc بدون جاروبک.

مدار 6 کلیدی به کار برده شده در شکل را می توان به عنوان مثال مورد بررسی قرار داد.

موتور dc بدون جاروبک



شکل ۶-۹ تصویری از اصول کار موتورهای dc بدون جاروبک

مدار 6 کلیدی به کار برده شده در شکل را می توان به عنوان مثال مورد بررسی قرار داد.

موتور dc بدون جاروبک

با توجه به شکل، کلیدهای T1, T4, T1, T6, T3, T6, T3, T2 و غیره، پیوسته برای انتقال میدان اطراف فاصله هوایی در جهت عقربه های ساعت، فعال می شوند..

ترتیب کلیدزنی و جهت میدان بوجود آمده در فاصله هوایی برای چرخش جلوگرد (در جهت عقربه های ساعت) در شکل بعد نشان داده شده است.

برای چرخش عقبگرد (در خلاف جهت عقربه های ساعت)، ترتیب کلیدزنی برعکس می شود.

موتور dc بدون جاروبک

سبب پیکهای برق دار شده	A & B	A & C	B & C	B & A	C & A	C & B
جهت میدان مغناطیسی						
کلیدهای فعال شده	T1 & T4	T1 & T6	T3 & T6	T3 & T2	T5 & T2	T5 & T4
زاویه محور موتور	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300	300-360

شکل ۶-۱۰ ترتیب کلیدزنی و جهت میدان بوجود آمده در فاصله هوایی.

شکل ۶-۱۰ ترتیب کلیدزنی و جهت میدان بوجود آمده در فاصله هوایی.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای موقعیت

این حسگرها موقعیت آهنرباهای گردان را آشکار ساخته و کدهای منطقی را به یک رمز گشای کموتاسیون ارسال می کنند، رمز گشا پس از پردازش این کد، مدارهای آتش کلیدهای نیمه هادی که تامین کننده توان سیم پیچی استاتور موتور تحریک هستند را به کار می اندازد.

از طریق تاثیر متقابل بین آهنرباهای دائم و جریانهای جاری شده در سیم پیچی، گشتاوری ایجاد می شود. بدیهی است که روشهای قابل اطمینان در حس کردن وضعیت و موقعیت روتور، همواره مستلزم تماس بین قسمت‌های متحرک و ساکن نمی باشد.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای عملی بدون تماس را می توان به صورت زیر طبقه بندی نمود:

- (۱) حسگرهای نوری
- (۲) حسگرهای رلوکتانسی
- (۳) حسگرهای میدان مغناطیسی
- (۴) حسگرهای خازنی
- (۵) حسگرهای نیروی ضد محرکه

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای نوری

یک منبع نور (ثابت) از میان یک صفحه متصل به محور روتور نور می تاباند و یک دیود (ثابت) حساس به نور وضعیت نور را آشکار می کند.

مزیت اصلی این روش این است که نقاط کلید زنی به خوبی مشخص می شوند. همچنین سیگنال خروجی dc بوده و بنابراین به یکسو سازی یا فیلتر نمودن نیازی نیست.

معایب حسگرهای نوری قیمت بالای آنها و نیاز آنها به محیط تمییز می باشد. همچنین، منبع نور قابلیت اطمینان کار خیلی بالایی نداشته، بعلاوه سیگنال خروجی از دیود معمولاً خیلی ضعیف است و نیاز به تقویت دارد.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای رلوکتانسی

در این روش، از یک چرخ مغناطیسی دندانه دار که روی محور روتور نصب شده و بین سیم پیچهای ثابت قطبها می چرخد استفاده می شود. دامنه سیگنال القاء شده در هر سیم پیچ تابعی از رلوکتانس فاصله هوایی بین چرخ دندانه دار و قطب مربوطه است بدین ترتیب موقعیت روتور تشخیص داده شود. مزایای این روش عبارتند از: قیمت پائین، سادگی طراحی و مناسب بودن جهت استفاده در محیطهای آلوده.

معایب این روش شامل: تدریجی بودن ساخت سیگنال، نیاز به یکسو سازی و فیلتر نمودن سیگنال خروجی است و نیاز به یک مدار تریگر برای آشکار نمودن نقاط صحیح کلیدزنی، است.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای میدان مغناطیسی

در این روش موقعیت آهنرباهای دائم متصل به روتور، بوسیله حسگرهای اثر هال مشخص می‌شود. حسگرها باید به اندازه کافی دور از سیم پیچ استاتور قرار داده شوند تا از مزاحمت میدان مغناطیسی تولید شده بوسیله جریانهای استاتور نسبت به عملکردشان جلوگیری شود.

مزیت حسگرهای میدان مغناطیسی هال عبارتند از: عاری بودن از تداخلات رادیویی، قابلیت کارکرد در محدوده گسترده و دقت بالا.

در گذشته، قیمت حسگرهای هال و تجهیزات جانبی خیلی بیشتر از قیمت اجزاء مکانیکی یا نوری مربوط به حسگرهای رلوکتانسی بود. قیمت حسگرهای هال در سالهای اخیر به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای خازنی

این وسایل تا حدی مشابه با حسگرهای رلوکتانسی هستند. موقعیت یک چرخ که به طور مناسبی طراحی و ساخته شده و روی محور روتور نصب شده است، بوسیله یک حسگر اندازه گیر خازنی مشخص می‌شود.

حسگرهای خازنی، فشرده و کم حجم بوده و می‌توانند به راحتی در داخل قاب موتور قرار داده شوند.

اما با این حال، برای افزایش سیگنال خروجی به یک سطح قابل استفاده، تقویت نسبتاً زیادی مورد نیاز است.

موتور dc بدون جاروبک

حسگرهای نیروی ضد محرکه

این امکان وجود دارد که موقعیت روتور را از طریق مشاهده شکل موجهای emf تولید شده بوسیله شار روتور در سیم پیچی استاتور تعیین نمود

این روش هزینه و دردسر مربوط به تطبیق مکانیکی و نگهداری حسگرهای موقعیت در داخل موتور را حذف نموده و بنابراین، قابلیت اطمینان را نیز بهبود می بخشد.

معایب این روش عبارتند از اثر نویز تولید شده ناشی از عمل کلیدزنی در سیم پیچ بر روی سیگنالها، به علاوه، در سرعتهای خیلی کم، موقعیت روتور را نمی توان مشخص نمود، چرا که مقادیر نیروی ضد محرکه بسیار ناچیز می باشند.

موتور dc بدون جاروبک

مقایسه بین روشهای تعیین موقعیت روتور

از بین حسگرهای موقعیت بحث شده فوق، حسگرهای اثر هال، رلوکتانسی، و نوری عملی تر هستند. معیار تجاری این حسگرها در جدول زیر ارائه شده است:

جدول 6-1 معیار تجاری سه نوع حسگر

پارامتر	رلوکتانسی	نوری	هال
طول عمر پیش بینی شده	3	2	1
پیچیدگی طراحی	1	2	3
RFI (ایجاد جرقه)	3	1	1
قیمت	1	3	3
محدوده تغییرات محیط	1	3	1
دقت	3	1	1

موتور dc بدون جاروبک

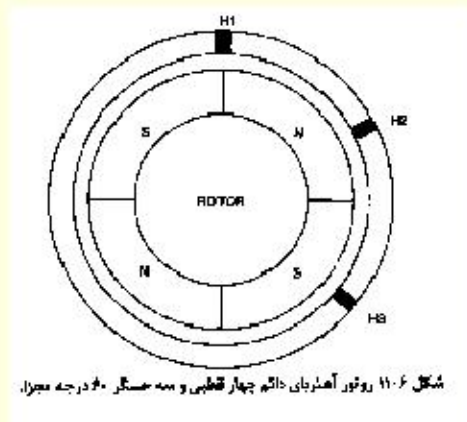
رمز گشای کموتاسیون

رمز گشای کموتاسیون سیگنالها را از حسگرهای موقعیت دریافت نموده و آنها را به سیگنالهای کلیدزنی برای مدارهای آتش کلیدهای الکترونیکی تبدیل می کند. در یک سیستم تحریک 6 پالسی دو کلید همزمان برای انرژی دادن به دو فاز استاتور فعال می شوند و یک میدان گردان در اثر ترکیب جریان تحریک دو سیم پیچ، در فاصله هوایی ایجاد می شود.

اساس کار کلی تحریک یک موتور dc بدون جاروبک سه فاز، در شکل بعد نشان داده شده است

موتور dc بدون جاروبک

طرحی از مقطع روتور و حسگرهای موقعیت، در شکل زیر نشان داده شده است.



موتور dc بدون جاروبک

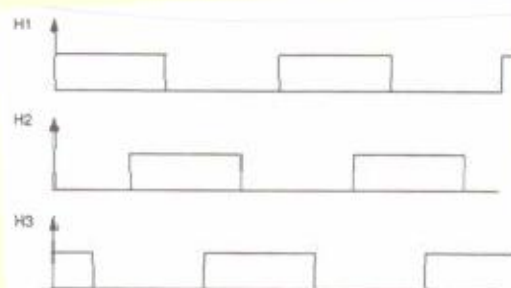
□ در این موتور حسگرهای هال در نظر گرفته شده و هر حسگر هنگامی که از کنار قطب S عبور نماید، عمل کرده و هنگامی که از کنار قطب N عبور کند آزاد می شود.

□ برای موقعیت اولیه نشان داده شده در شکل اولین حسگر (H1) در صفر درجه عمل می کند.

□ دومی (H2) پس از 60 درجه عمل نموده و سومی (H3) پس از 30 درجه چرخش در جهت عقربه های ساعت (مسیر جلوگرد) آزاد می شود.

موتور dc بدون جاروبک

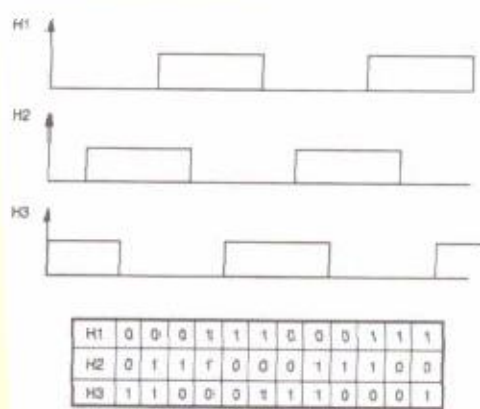
خروجی حسگرها و کدهای منطقی متناظر برای چرخش ساعتگرد



H1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
H2	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
H3	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1

موتور dc بدون جاروبک

خروجی حسگرها و کدهای منطقی متناظر برای چرخش در جهت مثلاًثانی



موتور dc بدون جاروبک

□ حسگرها ممکن است در فواصل ۳۰، ۶۰ یا ۱۲۰ درجه مکانیکی قرار داده شوند.

□ طراحی رمز گشا ابتدا برای حالت با فواصل ۶۰ درجه مورد بحث قرار گرفته و سپس برای دو حالت دیگر تعمیم داده می شود.

□ کدهای منطقی برای حالت‌های با فاصله ۳۰ درجه و ۱۲۰ درجه بین حسگرها نیز بدست می آید.

جدول 2-6 کدهای منطقی سنسورهای هال.						
	موقعیت سنسورها	روتور (الکتریکی)	زاویه	H1	H2	H3
30°		0-60		0	0	0
		60-120		0	0	1
		120-180		0	1	1
		180-240		1	1	1
		240-300		1	1	0
		300-360		1	0	0
60°		0-60		1	0	1
		60-120		1	0	0
		120-180		1	1	0
		180-240		0	1	0
		240-300		0	1	1
		300-360		0	0	1
120°		0-60		1	1	0
		60-120		1	0	0
		120-180		1	0	1
		180-240		0	0	1
		240-300		0	1	1
		300-360		0	1	0

موتور dc بدون جاروبک

باید توجه داشت که اگر چه حسگرها در 30، 60 یا 120 درجه مکانیکی جدای از هم قرار داده می شوند، اما آنها معمولاً موقعیت روتور را برای 60 درجه از چرخش الکتریکی مشخص می کنند. آنچه که سه جایگاه استقرار حسگر را مشخص می کند، کدگذاری ویژه برای هر 60 درجه افزایش موقعیت روتور است.

ترتیب کلیدزنی و جهت میدان بوجود آمده در فاصله هوایی برای چرخش جلوگرد (در جهت عقربه‌های ساعت) در شکل بعد نشان داده شده است.

موتور dc بدون جاروبک

جدول درستی رمزگشا، به راحتی به کمک شکل 10-6 و جدول 2-6 بدست می آید.

برای داشتن چرخش در هر دو جهت، یک کد براساس جهت دلخواه چرخش (انتخاب چرخش جلوگرد یا عقب گرد) به عنوان یک ورودی به رمزگشای کموتاسیون اضافه می شود.

موتور dc بدون جاروبک

توابع بولی کلیدهای نیمه هادی در پیوست 4 آمده اند. نتایج به صورت زیر است:

$$T1 = (\overline{F.H1.H2})(\overline{R.H1.H2})$$

$$T2 = (\overline{F.H1.H2})(\overline{R.H1.H2})$$

$$T3 = (\overline{F.H2.H3})(\overline{R.H2.H3})$$

$$T4 = (\overline{F.H2.H3})(\overline{R.H2.H3})$$

$$T5 = (\overline{F.H3.H1})(\overline{R.H3.H1})$$

$$T6 = (\overline{F.H3.H1})(\overline{R.H3.H1})$$

جدول 3-6 جدول درستی برای چرخش جلوگرد و عقب گرد

	وضعیت روتور	جهت چرخش	ورودی رمزگشا										حالت کلیدها	
			F/R	H1	H2	H3	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
جلوگرد	0-60		0	1	0	1	1	0	0	1	0	0		
	60-120		0	1	0	0	1	0	0	0	0	1		
	120-180		0	1	1	0	0	0	1	0	0	1		
	180-240		0	0	1	0	0	1	1	0	0	0		
	240-300		0	0	0	1	0	1	0	0	1	0		
	300-360		0	0	0	1	0	0	0	1	1	0		
عقب گرد	0-60		1	0	0	1	0	0	1	0	0	1		
	60-120		1	0	1	1	1	0	0	0	0	1		
	120-180		1	0	1	0	1	0	0	1	0	0		
	180-240		1	1	1	0	0	0	0	1	1	0		
	240-300		1	1	0	0	0	1	0	0	1	0		
	300-360		1	1	0	1	0	1	1	0	0	0		

موتور dc بدون جاروبک

عناصر کلیدزنی

ملزومات کاربردی، انتخاب عناصر کلیدزنی را که در منبع قدرت به کار برده می شوند، تحت تاثیر قرار می دهد. ترانزیستورهای قدرت، MOSFET و دو قطبیهها بسیار سریعتر از ترستورها و GTO ها قطع و وصل می شوند.

به طور نمونه، برای یک سیستم با توان زیر کیلووات، زمانهای کلیدزنی برای ترانزیستورهای دو قطبی باید بین 1 تا 2 میکرو ثانیه و برای MOSFET ها بین 30 تا 150 نانو ثانیه باشد، و می توان آنها را به ترتیب با جریان بیس و ولتاژ گیت کنترل نمود.

