

## فصل اول:

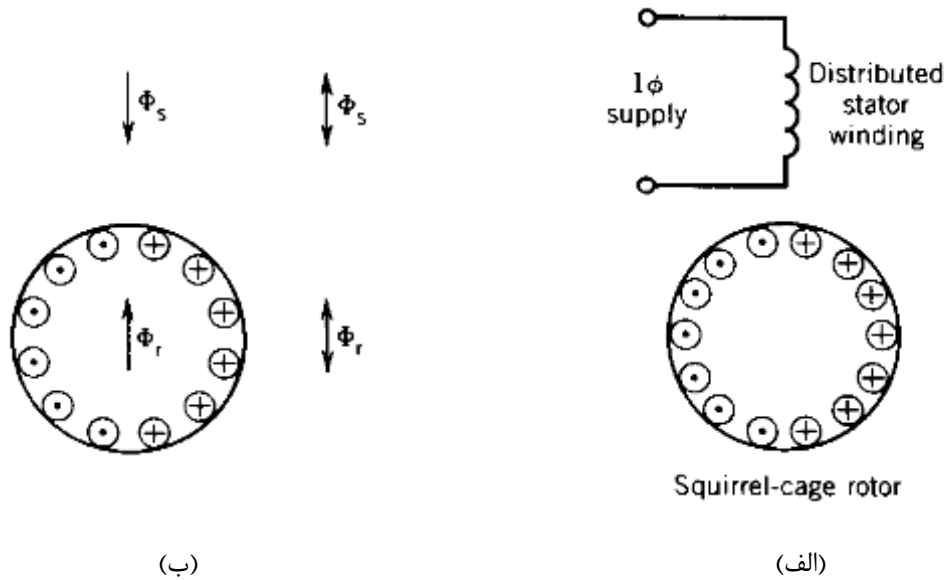
### موتور القایی تک فاز Single Phase Induction Motor

#### ۱-۱- کلیات

- ✓ گاهی اوقات به آن موتور آسنکرون Single Phase Asynchronous Motor نیز معروف است.
- ✓ موتورهای کوچکی هستند که کاربرد زیادی در مصارف خانگی دارد.
- ✓ رتور قفسه سنجابی و استاتور حاوی یک سیم پیچی تک فاز است که به صورت توزیع شده درون شیارهای استاتور جاسازی شده است.
- ✓ گشتاور راه اندازی در این گونه موتورها وجود ندارد ولی اگر به طریقی چرخانده شود می تواند به حرکت دائمی خود ادامه دهد.

## ۲-۱- رتور در حالت سکون

نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ضربانی و در نتیجه شار ضربانی ( $\Phi_s$ ) در راستای محور مغناطیسی استاتور شکل می گیرد.



شکل ۱-۱- موتور القایی تکفاز: (الف) ساختار موتور، (ب) شارهای مغناطیسی رتور و استاتور

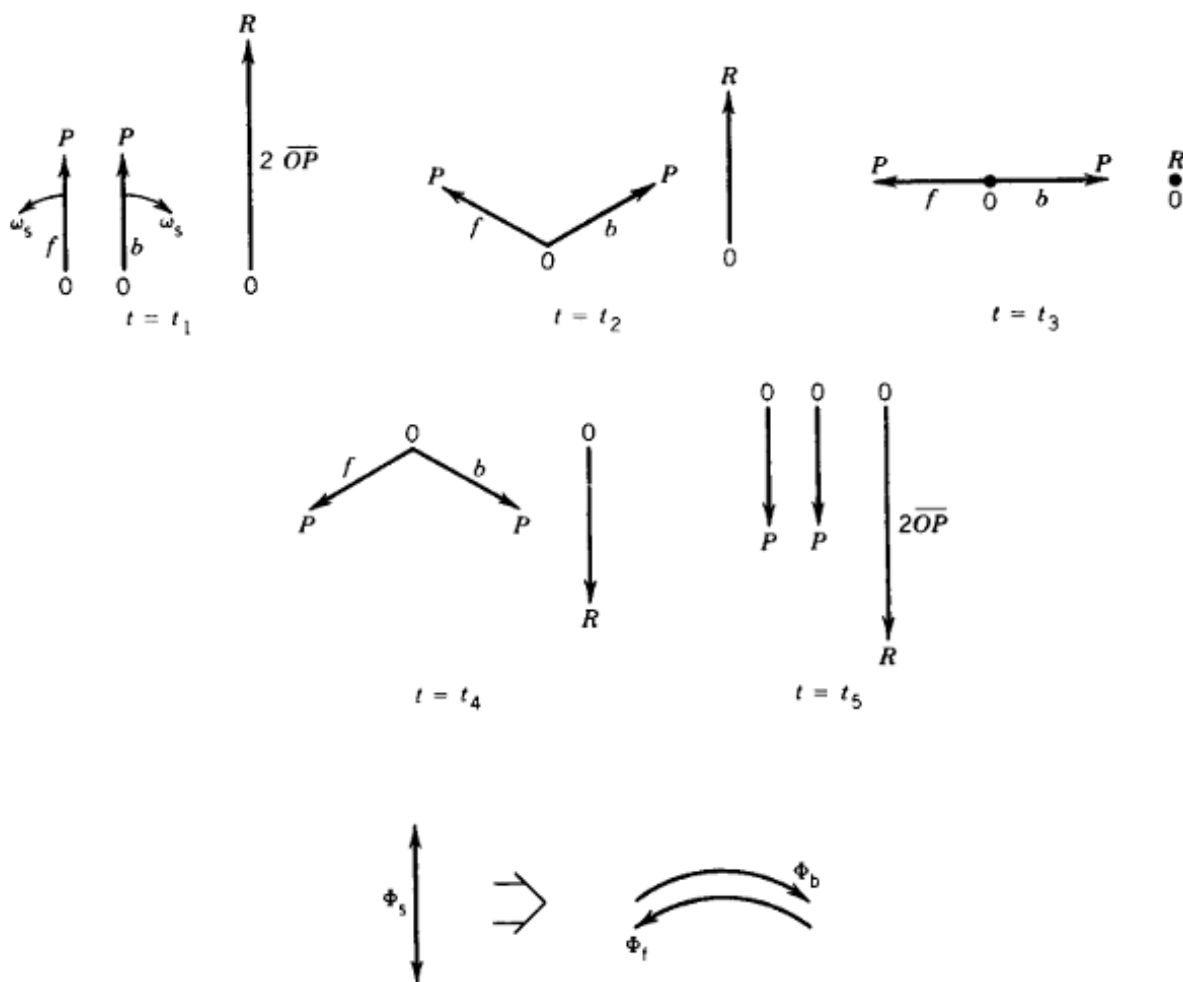
شار  $\Phi_s$  باعث القاء جریان در رتور می شود (عمل ترانسفورماتوری). رتور قفسی سنجابی است و از دو طرف اتصال کوتاه شده است. جریان القاء شده باعث به وجود آمدن شار ضربانی  $\Phi_r$  می شود که در راستای محور مغناطیسی استاتور است.

چون زاویه بین این دو شار صفر است گشتاور راه انداز نداریم.

## ۳-۱- تئوری مربوط به دو میدان گردان

شار ضربانی را می توان بر آیند دو میدان گردان با دامنه نصف شار ضربانی دانست که در خلاف جهت هم با سرعت سنکرون می چرخند. یکی از این میدان ها در جهت عقربه های ساعت (CW) و دیگری در خلاف جهت عقربه های ساعت (CCW) می چرخد.

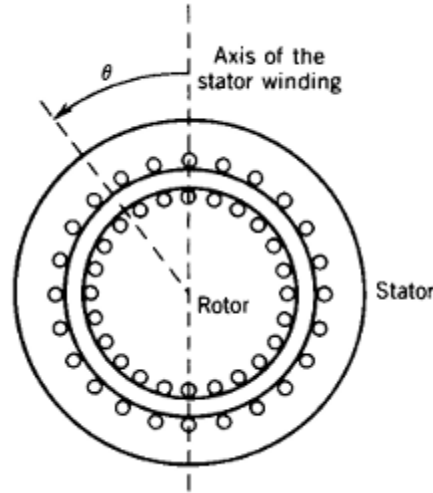
الف- اثبات این مطلب به روش ترسیمی:



شکل ۱-۲- میدان ضربانی و میدان دوار

ب- اثبات این مطلب به روش تحلیلی:

mmf حاصله از سیم پیچی استاتور با توزیع سینوسی در امتداد زاویه  $\theta$ :



شکل ۱-۳- ساختار موتور القایی تک فاز

$$F(\theta) = N i \cos \theta$$

$$\xrightarrow{i = I_{\max} \cos \omega t} F(\theta, t) = N I_{\max} \cos \theta \cos \omega t$$

$$\Rightarrow F(\theta, t) = \frac{N I_{\max}}{2} \cos (\omega t - \theta) + \frac{N I_{\max}}{2} \cos (\omega t + \theta) = F_f + F_b$$

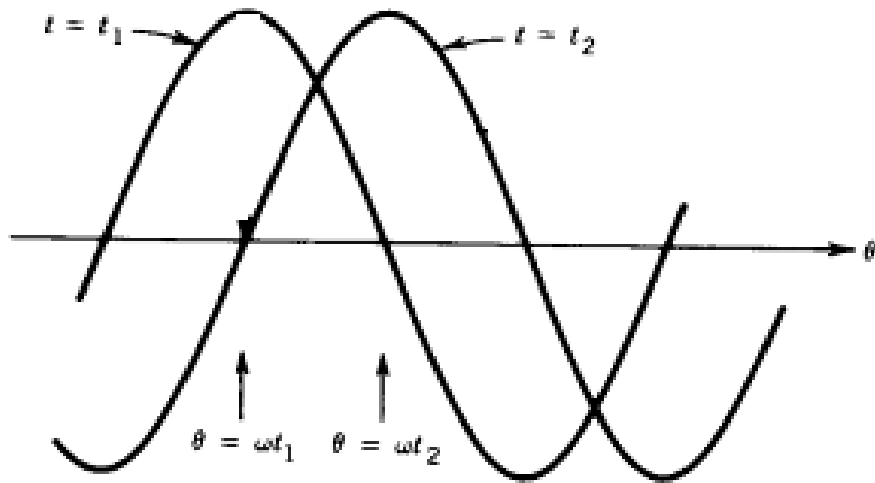
میدان راستگرد ( $F_f$ ) در جهت افزایش  $\theta$  (شکل بالا) حرکت می کند و فازور مربوط که در خلاف جهت عقربه های ساعت  $CCW$  می چرخد با علامت  $f$  نمایش داده شده است (که به  $forward$  اشاره می کند).

فازورهای مربوط به میدان های راست گرد و چپ گرد ( $backward$ ) در شکل ۱-۲ نشان داده شده اند.

با توجه به شکل ۱-۳ که ترم اول مربوط به میدان راستگرد ( $\frac{N I_{\max}}{2} \cos (\omega t - \theta)$ ) را در زمان های

مختلف نشان می دهد مشاهده می شود با گذشت زمان شکل موج مربوط به این نیروی محرکه مغناطیسی به

سمت راست حرکت می کند و به این خاطر لفظ میدان راستگرد به آن اطلاق می شود.



شکل ۱-۴- شکل موج شار مربوط به میدان راستگرد

$$t_2 > t_1 \Rightarrow \theta_2 > \theta_1 \quad (\text{میدان راست گرد})$$

$F_f$  : نیروی محرکه مغناطیسی یا mmf در جهت زاویه  $\theta$  که به mmf راست گرد مشهور است.

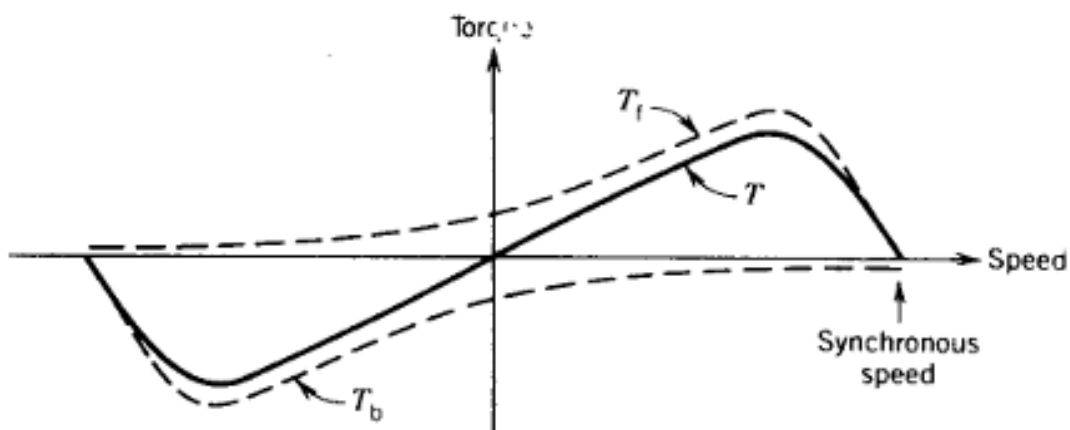
$F_b$  : mmf چپ گرد است.

هر یک از mmf های مزبور، گشتاوری را پدید می آورند به ترتیب  $T_f$  و  $T_b$

$$F_f \rightarrow T_f \quad , \quad F_b \rightarrow T_b$$

توجه شود گشتاور منتجه ( $T$ ) در حالت سکون صفر است. بنابراین موتورهای تک فاز مشکل راه اندازی دارند

اما تحت هر سرعت دیگری موتور می تواند در دو جهت بچرخد.



شکل ۱-۵- مشخصه ی گشتاور-سرعت موتور القایی تک فاز بر اساس شارهای راستگرد و چپگرد

### ۴-۱- لغزش

فرض کنید رتور در جهت راست گرد می چرخد

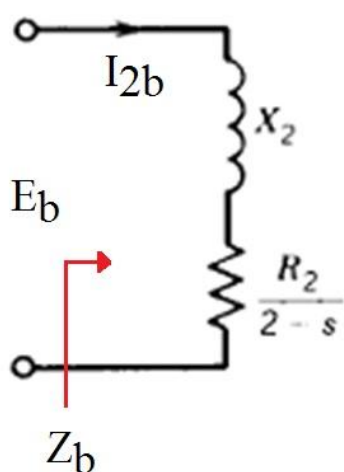
لغزش در رابطه با میدان راست گرد عبارت است از:

$$S_f = \frac{n_s - n}{n_s} \triangleq S$$

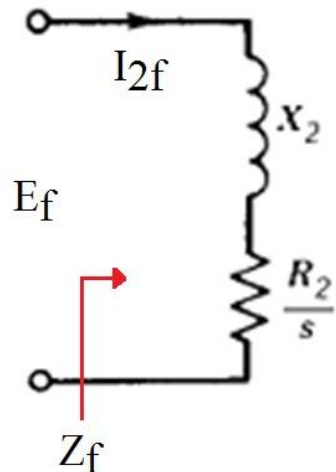
لغزش در رابطه با میدان چپ گرد:

$$S_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} = \frac{n_s + n_s - n_s + n}{n_s} = 2 - S$$

مدار رتور از دیدگاه شارهای راست گرد و چپ گرد:



(ب)



(الف)

شکل ۱-۶- مدار معادل رتور: (الف) برای شار راست‌گرد، (ب) برای شار چپ‌گرد

در حالت سکون ( $S=1$ )، امپدانس‌ها ( $Z_f, Z_b$ ) در دو مدار مزبور یکسان اند و بنابراین:

$$I_{2f} = I_{2b} \quad (\text{حالت سکون})$$

$I_{2f}$ : جریان در مدار راست‌گرد رتور

$I_{2b}$ : جریان در مدار چپ‌گرد رتور

جریان‌های بالا دو mmf راست‌گرد و چپ‌گرد می‌سازند که به خاطر قانون لنز در تضاد با میدان‌های استاتور هستند.

۱- mmf راست‌گرد رتور در جهت مخالف mmf راست‌گرد استاتور

۲- mmf چپ‌گرد رتور در جهت مخالف mmf چپ‌گرد استاتور

در این حالت شارهای چپ‌گرد و راست‌گرد منتهجه در فاصله هوایی دارای دامنه یکسانند.

اگر رتور در جهت راست‌گرد بچرخد، دیگر امپدانس‌ها یکسان نیستند. فرض کنید ( $S=0.05$ ). در این حالت:

$$(Z_b) \text{ امپدانس چپ‌گرد رتور} > (Z_f) \text{ امپدانس راست‌گرد رتور}$$

چون در ابتدا  $E_f = E_b$  ، در نتیجه:

$$I_{2b} > I_{2f}$$

جریان های بالا دو mmf می سازند که دامنه های آنها یکسان نیست.

mmf چپ گرد رتور ناشی از  $I_{2b}$  بزرگتر از mmf راست گرد رتور ناشی از  $I_{2f}$  است.

این بار نیز داریم:

۱- mmf راست گرد رتور در جهت مخالف mmf راست گرد استاتور

۲- mmf چپ گرد رتور در جهت مخالف mmf چپ گرد استاتور

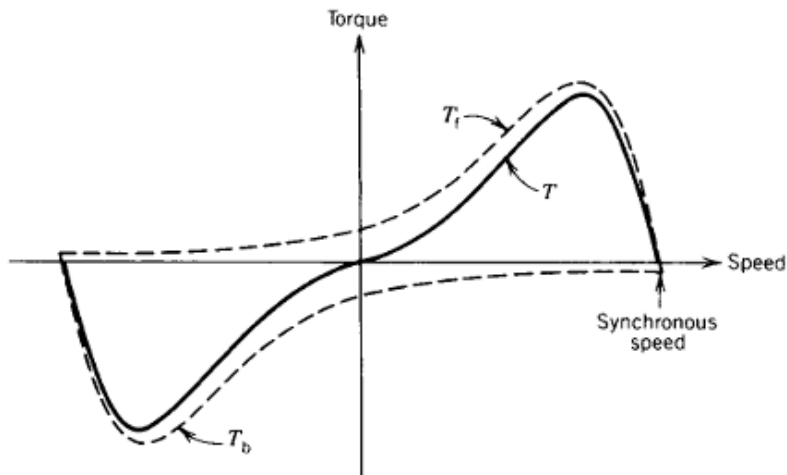
چون mmf چپ گرد رتور که بزرگتر است در جهت mmf راست گرد استاتور است، بنابراین mmf منتهجه

راست گرد در فاصله هوایی (mmf حاصله از تقابل میدان های استاتور و رتور) افزایش می یابد.

در حالیکه mmf منتهجه چپ گرد در فاصله هوایی کاهش می یابد.

$$\Phi_f > \Phi_b$$

در نتیجه، با چرخش رتور گشتاور راست گرد افزایش می یابد و گشتاور چپ گرد کاهش می یابد.



شکل ۷-۱- مشخصه ی واقعی گشتاور-سرعت موتور القایی تک فاز

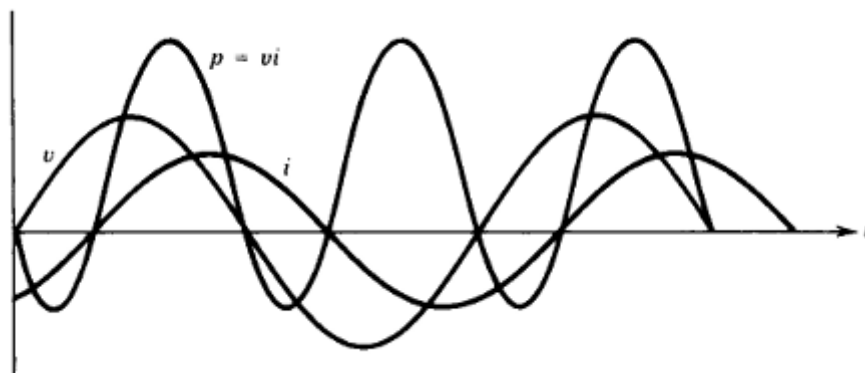


هنگام چرخش رتور در جهت راستگرد، چون شار منتهجه راستگرد فاصله هوایی که از شار راستگرد استاتور و چپگرد رتور به وجود آمده است، بزرگتر است ولتاژ القایی در مدار راستگرد رتور بزرگتر می شود.

$$E_f > E_b$$

اگرچه شار منتهجه راستگرد فاصله هوایی افزایش و شار منتهجه چپگرد فاصله هوایی کاهش می یابد، اما شار منتهجه فاصله هوایی استاتور ثابت می ماند زیرا در حالتی که از امپدانس استاتور صرف نظر شود ولتاژ القایی در استاتور ناشی از این شار منتهجه همان ولتاژ منبع تغذیه است.

علاوه بر گشتاور نشان داده شده در شکل بالا، تأثیر متقابل mmf هایی که در خلاف جهت یکدیگر می چرخند و با دو برابر سرعت سنکرون از برابر هم عبور می کنند گشتاوری نوسانی با فرکانسی دو برابر ایجاد می کند که باعث نویز می شود. این نوسانات گشتاور در موتور تک فاز اجتناب ناپذیر است و از نوسان ذاتی توان لحظه ای ورودی مدار تک فاز ناشی می شود. مقدار متوسط گشتاور نوسانی صفر است گشتاوری که در شکل بالا نشان داده شده است متوسط زمانی گشتاور لحظه ای است. اثر گشتاور ضربانی را می توان توسط وصله های لاستیکی به حداقل رساند. گشتاور ضربانی باعث می شود موتور تک فاز نسبت به سه فاز پر سروصداتر باشد.



شکل ۱-۸- منحنی توان ورودی لحظه ای در موتور القایی تک فاز

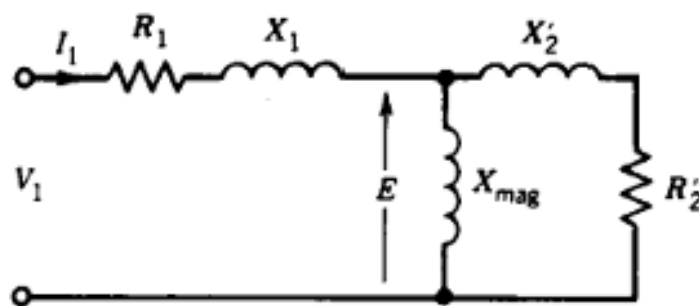
$$v = V_m \sin \omega t \quad , \quad i = I_m \sin (\omega t - \alpha)$$

$$P_i = V_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \alpha) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \alpha - \cos (2\omega t - \alpha)]$$

↓  
دو برابر فرکانس اصلی

### ۱-۵- مدار معادل موتور القایی تک فاز

✓ در حالت سکون عملکرد شبیه ترانسفورماتوری است که ثانویه آن اتصال کوتاه شده است.



شکل ۱-۹- مدار معادل رتور در حالت سکون

$R_1$  و  $X_1$ : مقاومت و راکتانس نشتی سیم پیچی استاتور

$X_{mag}$ : راکتانس مغناطیس کنندگی

$X'_2$ : راکتانس نشتی رتور ارجاع داده شده به طرف استاتور

$R'_2$ : مقاومت رتور

$V_1$ : ولتاژ منبع تغذیه

$E$ : ولتاژ القاء شده در استاتور توسط شار ضربانی فاصله هوایی

$$E = 4.44 N f \phi_{max}$$

برای مشاهده اثر میدان های راست گرد و چپ گرد می توان مدار معادل را به دو نیم تقسیم کرد:

$$E_f = 4.44 N f \phi_f$$

$$E_b = 4.44 N f \phi_b$$

در حالت سکون:  $\phi_f = \phi_b$  و در نتیجه:  $E_f = E_b$

شار دوار راست گرد  
شار دوار چپ گرد

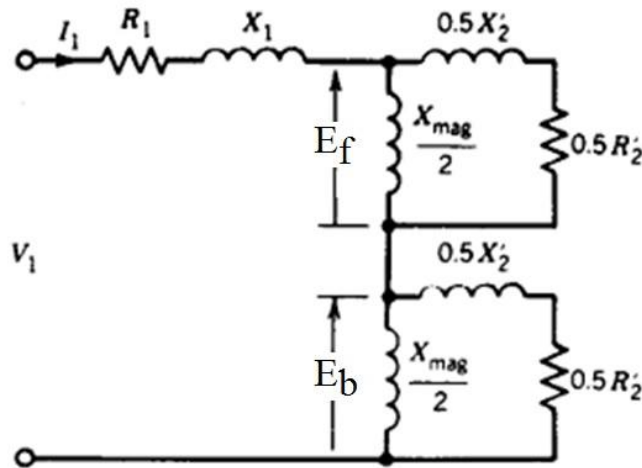
✓ فرض کنید رتور در جهت راست گرد بچرخد و لغزش S باشد

همانطور که بالاتر اشاره شد، mmf راست گرد استاتور و mmf چپ گرد رتور، شار منتجه راست گرد فاصله

هوایی را شکل می دهد که باعث ایجاد  $E_f$  می شود.

به صورت مشابه، شار منتجه چپ گرد در فاصله هوایی (برآیند شار چپ گرد استاتور و راست گرد رتور)، باعث

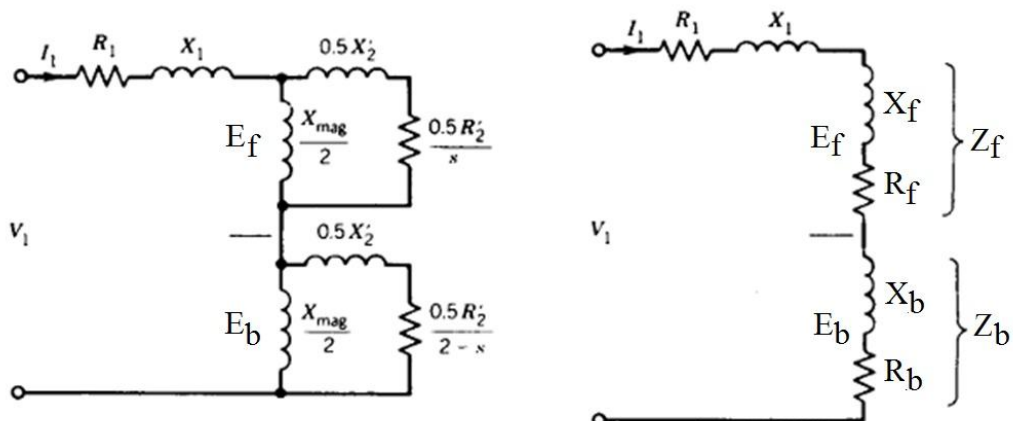
ایجاد ولتاژ  $E_b$  می گردد.



شکل ۱-۱-۱ مدار معادل رتور در حالت سکون

$$Z_f = R_f + j X_f = (j 0.5 X_{mag}) \parallel \left( 0.5 \frac{R'_2}{S} + j 0.5 X'_2 \right)$$

$$Z_b = R_b + j X_b = (j 0.5 X_{mag}) \parallel \left( 0.5 \frac{R'_2}{2-S} + j 0.5 X'_2 \right)$$



شکل ۱-۱-۱- مدار معادل موتور القایی تکفاز در حالت چرخش در جهت راست گرد با لغزش S

در شرایط چرخش موتور در جهت راست گرد:

$$\begin{cases} Z_f > Z_b \\ E_f > E_b \\ \phi_f > \phi_b \end{cases}$$

توان عبوری از فاصله هوایی در رابطه با میدان های راست گرد و چپ گرد:

$$\begin{cases} P_{gf} = R_f I_1^2 \\ P_{gb} = R_b I_1^2 \end{cases}$$

البته می توان توان عبوری از فاصله هوایی مربوط به میدان راست گرد را از  $P_{gf} = 0.5 \frac{R_2'}{s} \times I_{2f}'^2$  نیز

بدست آورد.

گشتاور حاصله:

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_{syn}}, \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_{syn}}$$

$\omega_{syn}$ : سرعت سنکرون

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega_{syn}} (R_f - R_b)$$

توان مکانیکی حاصله:

$$P_{\text{mech}} = T \omega_n = T \omega_{\text{syn}} (1 - s) = I_1^2 (R_f - R_b)(1 - s)$$

که در آن  $\omega_n$  سرعت چرخش رتور است.

$$P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} \quad \text{توان خروجی برابر است با:}$$

که در آن  $P_{\text{rot}}$  تلفات چرخشی است و شامل تلفات اصطکاک، بادزنی و هسته می باشد.

در محاسبه تلفات اهمی (مسی) داریم:

$$P_{2f} = S P_{gf}$$

$$\Rightarrow P_2 = P_{2f} + P_{2b} = S P_{gf} + (2 - S) P_{gb}$$

$$P_{2b} = (2 - S) P_{gb}$$

مثال ۱-۱: موتور القایی تک فاز  $\frac{1}{4}$  hp ، 120 V ، 60 Hz و  $1730^{\text{rpm}}$  مفروض است و مقاومت استاتور

$$R_1 = 2.9 \Omega \text{ می باشد.}$$

$$V = 43 \text{ V} , I = 5 \text{ A} , P = 140 \text{ W}$$

نتایج آزمایش رتور قفل شده:

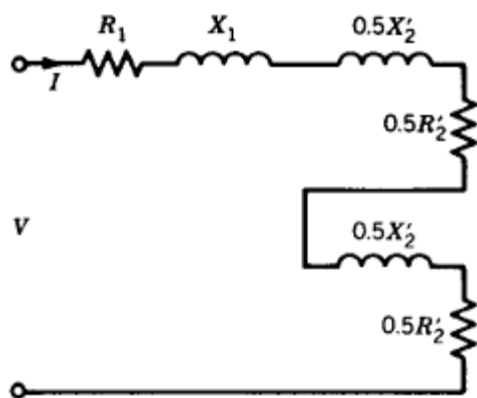
$$V = 120 \text{ V} , I = 3.5 = 5 \text{ A} , P = 125 \text{ W}$$

آزمایش بی باری:

الف - مدار معادل راست گرد و چپ گرد را به دست آورید.

آزمایش رتور قفل شده: **I**

در شرایط سکون ( $S = 1$ ) مدار معادل به شکل زیر است:



شکل ۱۲-۱- مدار معادل در حالت سکون

در آزمایش رتور قفل سیم پیچی کمکی از مدار قطع می شود در آزمایش بی باری هم سیم پیچی مزبور در مدار نیست سپس در اندازه گیری ها هر دو آزمایش فقط سیم پیچی اصلی مدنظر قرار می گیرد.

$$j 0.5 X'_2 + 0.5 R'_2 \ll 0.5 X_{mag}$$

$$R_1 = 2.9 \Omega$$

$$P_{BL} = (R_1 + R'_2)I^2 = (2.9 + R'_2) \times 5^2 = 140 \text{ W} \Rightarrow R'_2 = 2.7 \Omega$$

$$Z_{BL} = \frac{V}{I} = \frac{43}{5} = 8.6 \Omega$$

$$Z_{BL}^2 = (R_1 + R'_2) + (X_1 + X'_2)^2 \Rightarrow 8.6^2 = (2.9 + 2.7)^2 + (X_1 + X'_2)^2$$

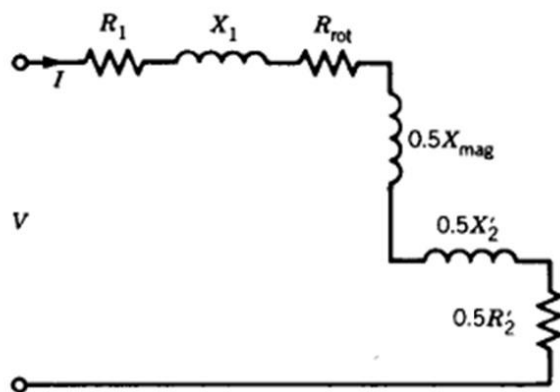
$$\Rightarrow X_1 + X'_2 = 6.53 \Omega$$

با فرض برابر بودن  $X_1$  و  $X'_2$  داریم:

$$X_1 = X'_2 = 3.26 \Omega$$

آزمایش بی باری: (II)

در بی باری لغزش بسیار کوچک است و مدار معادل مطابق شکل ۱۳-۱ می گردد:



شکل ۱-۱۳- مدار معادل در حالت بی باری

$$j 0.5 X_2' + 0.5 \frac{R_2'}{s} \gg 0.5 X_{mag}$$

با توجه به مدار معادل موتور القایی در شکل ۱-۱۱، انتظار می شود ضریب مقاومت رتور در شکل بالا 0.25 باشد در حالیکه 0.5 انتخاب شده است. توجیه این مطلب از روابط زیر امکان پذیر است:

$$\begin{aligned} \frac{0.5R_2'}{s} &= 0.5R_2' + 0.5R_2' \left( \frac{1-s}{s} \right) \\ &= R_{cu}(f) + R_{mech}(f) \\ \frac{0.5R_2'}{(2-s)} &= 0.5R_2' + 0.5R_2' \left( \frac{1-(2-s)}{2-s} \right) \\ &= R_{cu}(b) + R_{mech}(b) \end{aligned}$$

از آنجائیکه جریان رتور بخاطر شار راست گرد کوچک است، از تلفات مسی مربوطه که در  $R_{cu}(f)$  مدل شده است، صرف نظر می شود. توان تلف شده در مقاومت های  $R_{mech}(f)$  و  $R_{mech}(b)$ ، توان خروجی در بی باری (تلفات چرخشی شامل اصطکاک و بادزنی) را نتیجه می دهند که مجموعاً توسط  $R_{rot}$  در شکل ۱-۱۳ مدل شده اند.

مقاومت مدل کننده تلفات چرخشی

$$P_{NL} = \underbrace{(R_1 + R_{rot} + 0.5 R_2')}_{R_{NL}} I^2$$

$$\Rightarrow 125 = R_{NL} \times 3.5^2$$

$$\Rightarrow R_{NL} = 10.2 \Omega$$

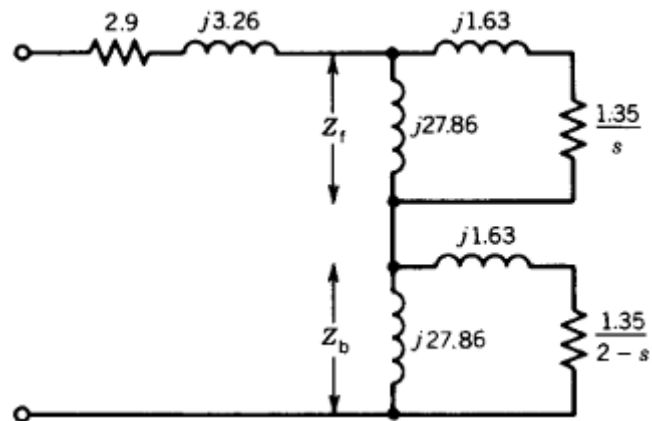
$$Z_{NL} = \frac{V}{I} = \frac{120}{3.5} = [R_{NL}^2 + (0.5 X_{mag} + X_1 + 0.5 X_2')^2]^{1/2}$$

$$\Rightarrow 34.3 = [10.2^2 + (0.5 X_{mag} + 3.26 + 1.63)^2]^{1/2} \Rightarrow X_{mag} = 55.7 \Omega$$

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

$$125 = P_{rot} + (2.9 + 1.35) 3.5^2 \Rightarrow P_{rot} = 72.9 \text{ W}$$

ب- اگر ولتاژ تغذیه موتور  $120 \text{ V}$  و سرعت آن معادل سرعت اسمی باشد، موتور را تحلیل کرده، جریان ورودی، توان ورودی، ضریب توان، گشتاور حاصله، توان خروجی، بازده، توان عبوری از فاصله هوایی و تلفات اهمی رتور را به دست آورید. سرعت سنکرون  $1800 \text{ rpm}$  است.



شکل ۱-۱۴- مدار معادل موتور

$$S = \frac{n_{syn} - n_m}{n_{syn}} = \frac{1800 - 1730}{1800} = 0.039$$

در سرعت اسمی:

$$Z_f = R_f + j X_f = (j 27.86) \parallel \left( \frac{1.35}{0.039} + j 1.63 \right) = 13 + j 16.79$$



$$Z_b = R_b + j X_b = (j 27.86) \parallel \left( \frac{1.35}{Z - 0.039} + j 1.63 \right) = 0.61 + j 1.55$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{input}} &= (R_1 + R_f + R_b) + j (X_1 + X_f + X_b) \\ &= (2.9 + 13 + 0.61) + j (3.26 + 16.79 + 1.55) = 16.51 + j 21.6 \\ &= 27.19 \angle 52.6^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$I_{\text{input}} = \frac{V}{Z_{\text{input}}} = \frac{120}{27.19 \angle 52.6} = 4.41 \angle -52.6^\circ \text{ A}$$

پس فاز :  $\text{PF} = \cos 52.6 = 0.61$  ضریب توان

توان ورودی :  $P_{\text{in}} = V I \cos \theta = 120 \times 4.41 \times 0.61 = 322.8 \text{ W}$

گشتاور :  $T = \frac{I^2}{\omega_{\text{syn}}} (R_f - R_b) = \frac{4.41^2}{188.5} (13 - 0.61) = 1.28 \text{ N.m}$

توان مکانیکی :  $P_{\text{mech}} = T \omega_{\text{syn}} (1 - S) = 1.28 \times 188.5 (1 - 0.039)$

توان خروجی :  $P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} = 231.87 - 72.94 = 158.9 \text{ W}$

بهره یا راندمان یا بازده :  $E_{\text{ff}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{158.9}{322.8} = 49.2 \%$

توان عبوری از فاصله هوایی :  $P_g = P_{gf} + P_{gb} = R_f I^2 + R_b I^2$

$$= 13 \times 4.41^2 + 0.61 \times 4.41^2$$

$$= 252.8 + 11.86 = 264.7 \Rightarrow P_g = 264.7 \text{ W}$$

$$P_2 = S P_{gf} + (2 - S)P_{gb} = 0.039 \times 252.8 + (2 - 0.039)11.86$$

$$\Rightarrow P_2 = 33.12 \text{ W}$$

### ۱-۶- راه اندازی موتور القایی تک فاز

همان طور که بحث شد، این موتور مشکل راه اندازی دارد. در عمل با استفاده از سیم پیچی کمکی که در فضا  $90^\circ$  نسبت به سیم پیچی اصلی جابجایی دارد مشکل راه اندازی حل می شود. امپدانس های سیم پیچی اصلی و کمکی به گونه ای اند که بین جریان های آنها اختلاف فاز ایجاد می شود و به این ترتیب شرایط برای تولید میدان گردان در حالت سکون فراهم می شود. با شتاب گرفتن موتور وقتی سرعت به 75% سرعت نامی رسید، سیم پیچی کمکی توسط کلید گریز از مرکز از مدار خارج می شود.

میدان گردان ایده آل وقتی است که هر دو اختلاف فاز  $90^\circ$  باشد. (دو فاز متعادل مثال بعد)

مثال: فرض کنید جریان های سیم پیچی های اصلی و کمکی موتور القایی تک فاز به قرار زیر اند:

$$i_m = \sqrt{2} I_m \cos \omega t$$

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos (\omega t + \theta_a)$$

سیم پیچی ها در شیارهای استاتور طوری جاسازی شده اند که محورهای مغناطیسی آنها برهم عمودند.

الف: رابطه ای برای موج mmf دوار استاتور به دست آورید.

ب: چه عملی انجام دهیم تا موتور دو فاز متعادل شود.

با فرض  $\theta = 0$  امتداد محور سیم پیچی اصلی باشد، mmf استاتور حاوی دو سیم پیچی اصلی و کمکی در

امتداد زاویه  $\theta$  به قرار زیر است:

$$F(\theta, t) = F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t)$$

$$\begin{aligned}
&= N_m i_m \cos \theta + N_a i_a \cos (\theta + 90^\circ) \\
&= N_m \sqrt{2} I_m \cos \omega t \cos \theta + N_a \sqrt{2} I_a \cos (\omega t + \theta_a) \cos (\theta + 90^\circ) \\
&= \sqrt{2} N_m I_m \cos \omega t \cos \theta - \sqrt{2} N_a I_a \sin \theta \cos (\omega t + \theta_a) \\
&= \sqrt{2} N_m I_m \cos \omega t \cos \theta - \sqrt{2} N_a I_a \sin \theta [\cos \omega t \cos \theta_a - \sin \omega t \sin \theta_a] \\
&= \sqrt{2} N_m I_m \cos \omega t \cos \theta - \sqrt{2} N_a I_a \cos \theta_a \cos \omega t \sin \theta \\
&\quad + \sqrt{2} N_a I_a \sin \theta_a \sin \omega t \sin \theta \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} N_m I_m [\cos (\omega t + \theta) + \cos (\omega t - \theta)] \\
&\quad - \frac{1}{\sqrt{2}} N_a I_a \cos \theta_a [\sin (\omega t + \theta) - \sin (\omega t - \theta)] \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{2}} N_a I_a \sin \theta_a [-\cos (\omega t + \theta) + \cos (\omega t - \theta)] \\
F(\theta, t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m - N_a I_a \sin \theta_a) \cos (\omega t + \theta) \\
&\quad - (N_a I_a \cos \theta_a) \sin (\omega t + \theta)] \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m + N_a I_a \sin \theta_a) \cos (\omega t - \theta) \\
&\quad + (N_a I_a \cos \theta_a) \sin (\omega t - \theta)]
\end{aligned}$$

جملات  $\cos (\omega t - \theta)$  و  $\sin (\omega t - \theta)$  میدان راست گرد را مشخص می سازند.

جملات  $\cos (\omega t + \theta)$  و  $\sin (\omega t + \theta)$  میدان چپ گرد را مشخص می سازند.

$$N_m I_m = N_a I_a \quad \text{ب: اگر}$$

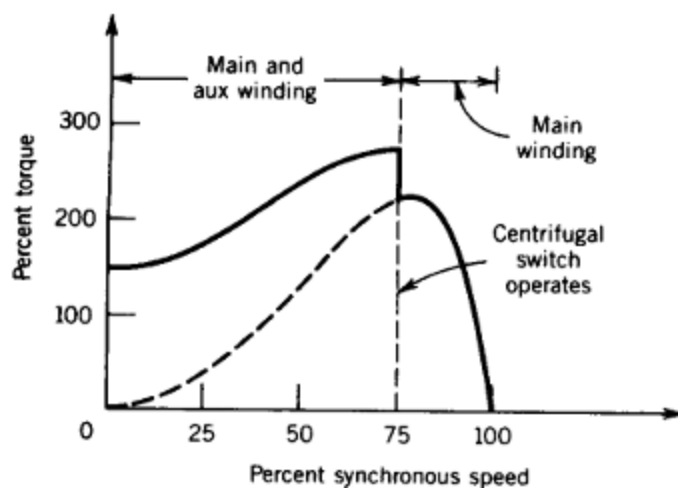
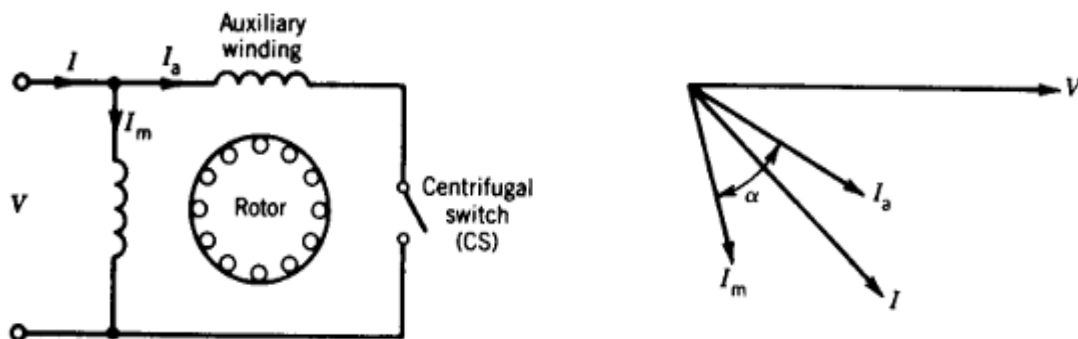
$\theta_a = 90^\circ$  (اختلاف فاز  $I_m$  و  $I_a$ )

$$F(\theta, t) = \sqrt{2} N_m I_m \cos(\omega t - \theta)$$

با این کار میدان چپ گرد کاملاً حذف می شود.

۷-۱- طبقه بندی موتورهای القایی تک فاز

موتورهای فاز شکسته (A)



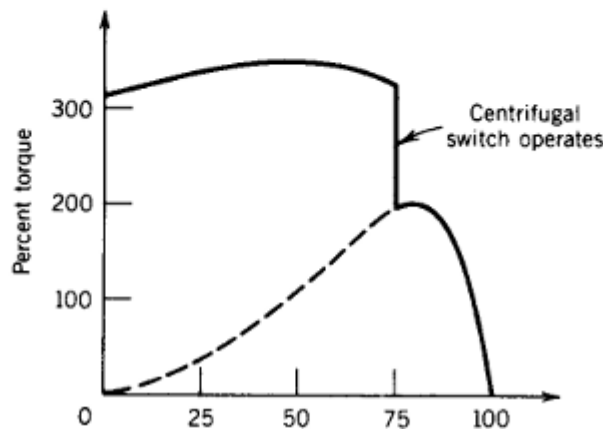
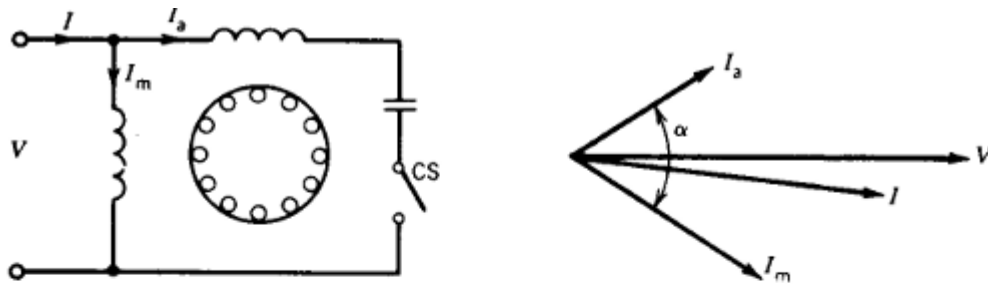
شکل ۱-۱۵- شماتیک موتور القایی تک فاز شکسته

$\frac{R_a}{X_a} > \frac{R_m}{X_m}$   
 (سیم پیچی کمکی نازکتر گرفته می شود.)  
 جریان های اصلی دو سیم پیچی هم فاز نیستند.

$R_a$  : مقاومت سیم پیچی کمکی  
 $R_m$  : مقاومت سیم پیچی اصلی  
 $X_a$  : راکتانس سیم پیچی کمکی  
 $X_m$  : راکتانس سیم پیچی اصلی

موتور القایی تک فاز با خازن راه انداز (خازن موقت)

B



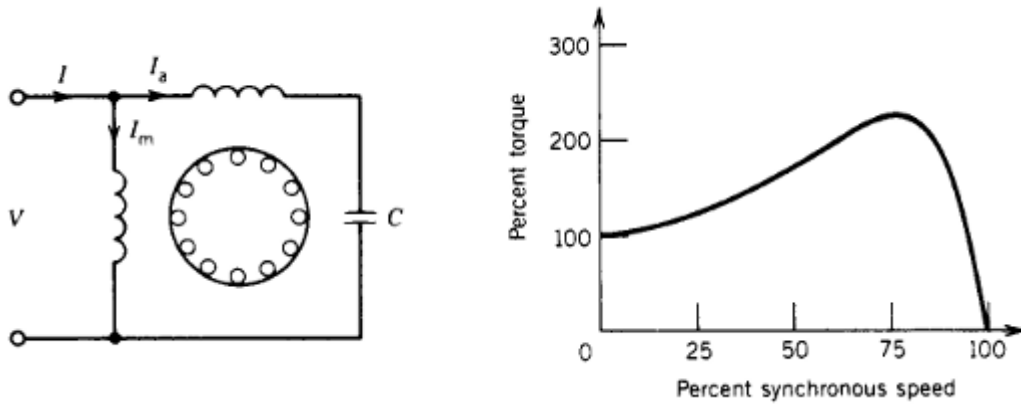
شکل ۱-۱۶- شماتیک موتور القایی با خازن راه انداز

یک خازن با سیم پیچی کمکی سری می شود و گشتاور راه اندازی قابل ملاحظه ای پدید می آید.

$$T_S = K I_m I_a \sin \alpha$$

به خاطر وجود خازن گران هستند. (خازن الکتریکی)

C) موتور القایی تک فاز با خازن دائمی



شکل ۱-۱۷- شماتیک موتور القایی با خازن دائم

به خاطر حذف کلید گریز از مرکز ارزان تر است.

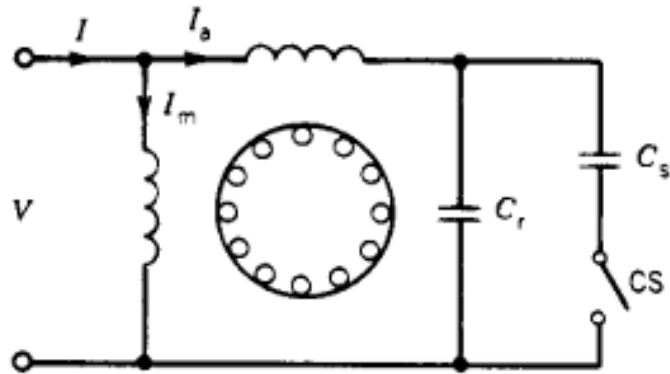
معمولاً تا توان های نامی حدود ۵۰ وات ساخته می شوند.

گشتاور راه اندازی نسبت به حالتی که خازن توسط کلید گریز از مرکز خارج می شود کمتر است. خازن طوری طراحی می شود که مصالحه ای بین شرایط راه اندازی و حالت کار عادی ایجاد شود.

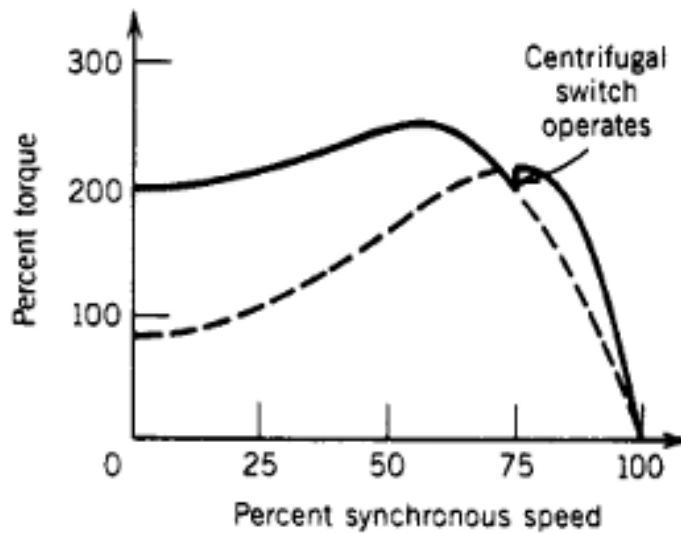
برای مثال این موتور در خمیر مخلوط کن نانوبی کاربرد دارد.

D) موتور القایی تک فاز با خازن راه انداز (موقت) و خازن دائم

به موتورهای دوخازنی معروف اند.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۱۸- موتور القایی تک فاز با خازن موقت و خازن دائم: (الف) شماتیک موتور، (ب) مشخصه گشتاور-سرعت

$C_s$  : خازنی که در مرحله راه اندازی در مدار قرار می گیرد.

$$C_s > C_r$$

$C_r$  : خازن دائمی

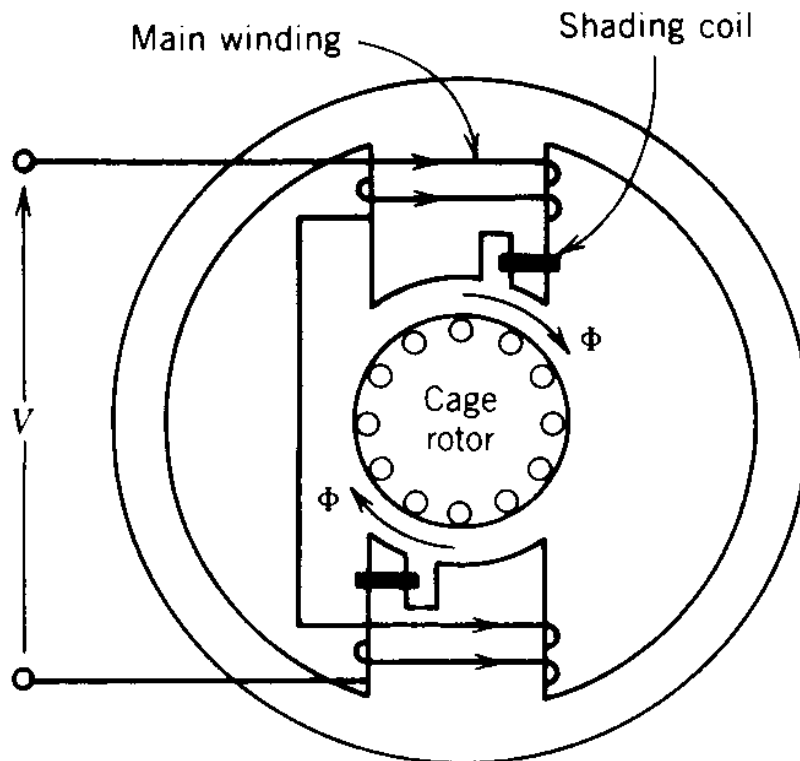
$C_s$  : خازن الکترولیتی

$C_r$ : خازن از نوع کاغذ آغشته به روغن

برای مثال از این موتور در لباسشویی و یخچال که توانی بین 0.5 تا 1 اسب بخار دارند استفاده می شود. این موتورها گرانترا اند (چون دو خازن دارند) ولی عملکرد بسیار بهتری دارند (گشتاور راه انداز خوب و شرایط بهتر برای کار عادی).

### E) موتورهای القایی تک فاز قطب چاک دار

مطابق شکل ۱-۱۹، استاتور حاوی قطب برجسته است. در حلقه اتصال شده روی قطب چاک دار جریان القاء می شود و این جریان القایی باعث می شود شار این ناحیه نسبت به ناحیه بدون چاک پس فاز شود. به عبارت دیگر شار دیرتر به مقدار ماکزیمم خود می رسد (میدان گردان)  $\Leftarrow$  وجود گشتاور راه انداز

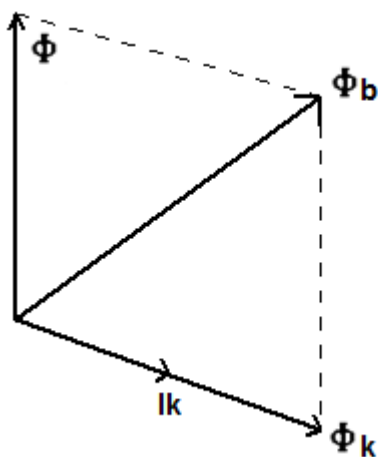


شکل ۱-۱۹- برش عرضی موتور القایی تک فاز قطب چاکدار

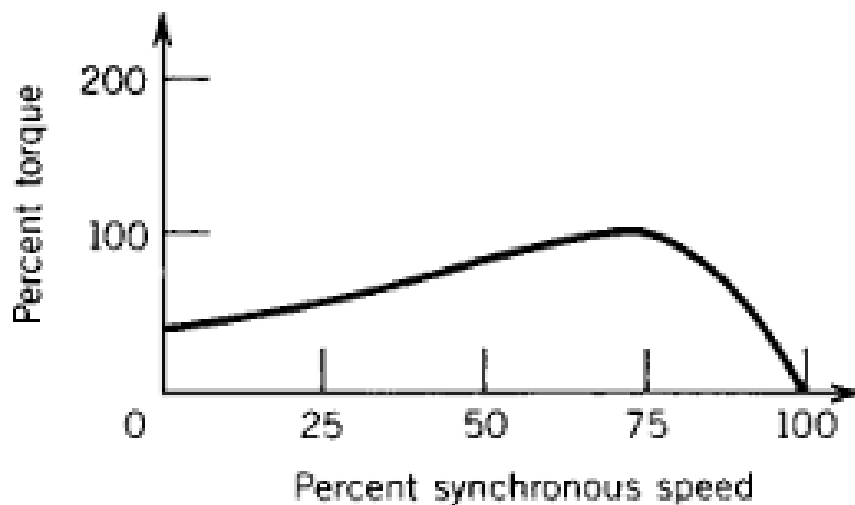


توصیف شار گردان با استفاده از دیاگرام فازوری:

شار اصلی قطب ( $\phi$ ) در حلقه جریان  $I_K$  را القاء می کند که شار نظیر آن  $\phi_K$  است. در نتیجه، زیر قسمتی از قطب مقابل حلقه شار برآیند  $\phi_b = \phi + \phi_K$  است که نسبت به شار اصلی قطب اختلاف فاز زمانی دارد. بدین ترتیب میدان گردان ضعیفی تولید می گردد و از آن گشتاور راه اندازی تأمین می گردد.



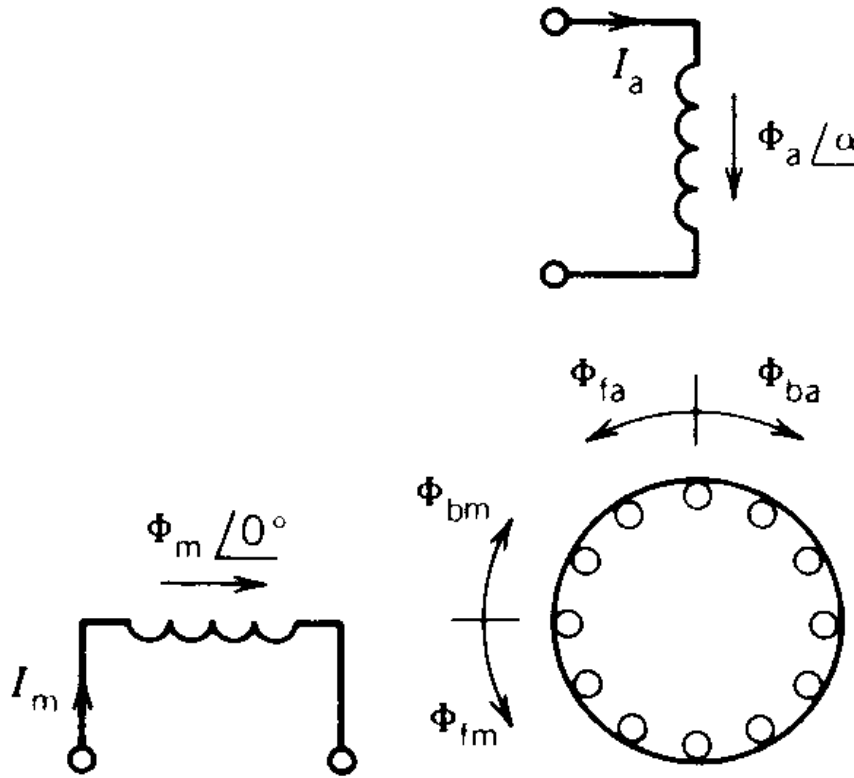
شکل ۱-۲۰- دیاگرام فازوری مربوط



شکل ۱-۲۱- مشخصه گشتاور-سرعت

### ۸-۱- مدار معادل موتور القایی تک فاز با خازن دائمی

استفاده از تئوری دو میدان گردان در بدست آوردن مدار معادل با خازن دائمی:



شکل ۱-۲۲- میدان ایجاد شده در موتور القایی تک فاز با خازن دائم

$$\text{جریان سیم پیچی اصلی : } i_m \Rightarrow \varphi_m \rightarrow \begin{cases} \varphi_{fm} & \text{شار راست گرد} \\ \varphi_{bm} & \text{شار چپ گرد} \end{cases}$$

$$\text{جریان سیم پیچی کمکی : } i_a \Rightarrow \varphi_a \rightarrow \begin{cases} \varphi_{fa} & \text{شار راست گرد} \\ \varphi_{ba} & \text{شار چپ گرد} \end{cases}$$

چهار شار مزبور در دو سیم پیچی ولتاژ القاء می کنند.

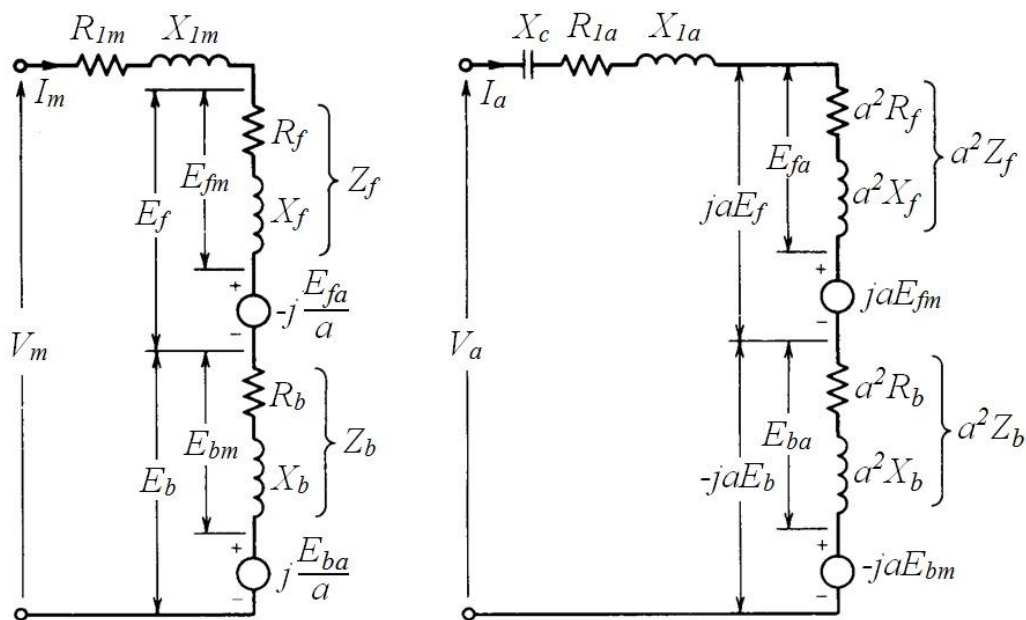
$E_{fm}$  : ولتاژ القایی در سیم پیچ اصلی به خاطر شار راست گرد سیم پیچ اصلی

$E_{bm}$  : ولتاژ القایی در سیم پیچ اصلی به خاطر شار چپ گرد سیم پیچ اصلی

$-j \frac{E_{fa}}{a}$  : ولتاژ القایی در سیم پیچ اصلی به خاطر شار راست گرد سیم پیچ کمکی

$j \frac{E_{ba}}{a}$  : ولتاژ القایی در سیم پیچ اصلی به خاطر شار چپ گرد سیم پیچ کمکی

نسبت تبدیل  $a = \frac{N_a}{N_m}$



شکل ۱-۲۳- مدار معادل موتور القایی با خازن دائم

شار راست گرد سیم پیچ کمکی ولتاژی در سیم پیچ کمکی القاء می کند که با  $E_{fa}$  نشان داده ایم. همین شار

در سیم پیچ اصلی ولتاژی القاء می کند که ماکزیمم آن  $\frac{\pi}{2}$  رادیان دیرتر اتفاق می افتد پس با  $-j \frac{E_{fa}}{a}$  مدل

شده است.

شار چپ گرد سیم پیچ کمکی ولتاژی در سیم پیچ کمکی القاء می کند که با  $E_{ba}$  نشان داده شده است. همین شار در سیم پیچ اصلی ولتاژی القاء می کند که ماکزیمم آن  $\frac{\pi}{2}$  رادیان زودتر اتفاق می افتد پس با  $j \frac{E_{ba}}{a}$  مدل شده است.

به طریق مشابه ولتاژهای القایی در سیم پیچی کمکی عبارتند از:

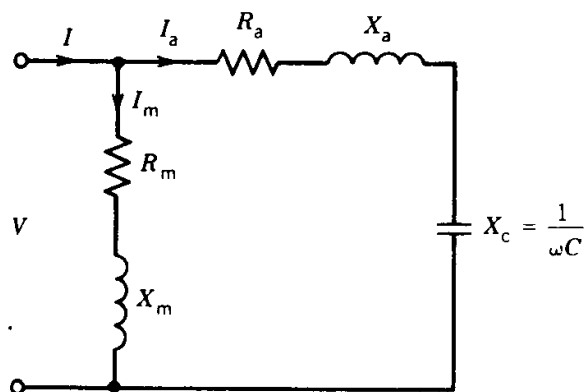
$E_{fa}$ : ولتاژ القایی در سیم پیچ کمکی به خاطر شار راست گرد سیم پیچ کمکی

$E_{ba}$ : ولتاژ القایی در سیم پیچ کمکی به خاطر شار چپ گرد سیم پیچ کمکی

$j a E_{fm}$ : ولتاژ القایی در سیم پیچ کمکی به خاطر شار راست گرد سیم پیچ اصلی

$-j a E_{bm}$ : ولتاژ القایی در سیم پیچ کمکی به خاطر شار چپ گرد سیم پیچ اصلی

در مدار مربوط به سیم پیچی کمکی نشان داده شده در شکل بالا،  $j a E_f$  و  $-j a E_b$  به ترتیب ناشی از شارهای راست گرد و چپ گرد منتهی در فاصله هوایی است که در سیم پیچی اصلی ولتاژهای  $E_f$  و  $E_b$  را القاء کرده اند و به اندازه  $90^\circ$  تقدم و تأخر فاز دارند تا در سیم پیچی کمکی نیز به همان اندازه ولتاژ القاء کند. (البته با ملحوظ کردن نسبت تبدیل  $a$ )



شکل ۱-۲۴- شماتیک موتور القایی تک فاز با خازن دائم

از مدار معادل های نشان داده شده در شکل ۱-۲۳ داریم:

$$\begin{cases} V_m = (Z_{1m} + Z_f + Z_b)I_m - j \frac{E_{fa}}{a} + j \frac{E_{ba}}{a} \\ V_a = (Z_c + Z_{1a} + a^2 Z_f + a^2 Z_b)I_a + j a E_{fm} - j a E_{bm} \end{cases}$$

ضرایب  $a^2$  در امپدانس ها به خاطر ارجاع مدار سیم پیچ کمکی به طرف سیم پیچ اصلی است.

$$\begin{cases} V_m = V_a = V \\ I = I_m + I_a \end{cases}$$

در روابط بالا:

$$\begin{aligned} Z_{1a} &= R_{1a} + j X_{1a} & , & & Z_{1m} &= R_{1m} + j X_{1m} \\ Z_c &= -j X_c & E_{fa} &= a^2 Z_f I_a & E_{ba} &= a^2 Z_b I_a \\ & & E_{fm} &= Z_f I_m & E_{bm} &= Z_b I_m \end{aligned}$$

با جایگذاری روابط مزبور در معادلات اصلی داریم:

$$V_m = (Z_{1m} + Z_f + Z_b)I_m - j a(Z_f - Z_b)I_a$$

$$V_a = j a (Z_f - Z_b)I_m + (Z_c + Z_{1a} + a^2 Z_f + a^2 Z_b)I_a$$

از این روابط جریان های  $I_m$  و  $I_a$  قابل محاسبه اند.

محاسبه گشتاور:

$$T = T_f - T_b = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_s}$$

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

$$P_{gb} = \text{Re} \{E_b I_m^* - j a E_b I_a^*\}$$

$$P_{gf} - P_{gb} = \text{Re} \{(E_f - E_b) I_m^* + j a (E_f + E_b) I_a^*\}$$

با جایگذاری  $E_b$  و  $E_f$  و  $I_m = |I_m| \angle \theta_m$  و  $I_a = |I_a| \angle \theta_a$  داریم:

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

در لحظه راه اندازی  $s = 1$  و  $R_f = R_b$ . بنابراین، گشتاور راه انداز برابر است با:

$$T_{st} = \frac{2 a |I_a| |I_m| (R_f + R_b)}{\omega_s} \sin(\theta_a - \theta_m) = K I_a I_m \sin \alpha$$

مثال ۱-۲: موتور القایی ۴ قطبی،  $120V$  و  $60^{Hz}$  مفروض است و خازن دائمی درون مدار سیم پیچی

کمکی قرار دارد. در این موتور داریم:

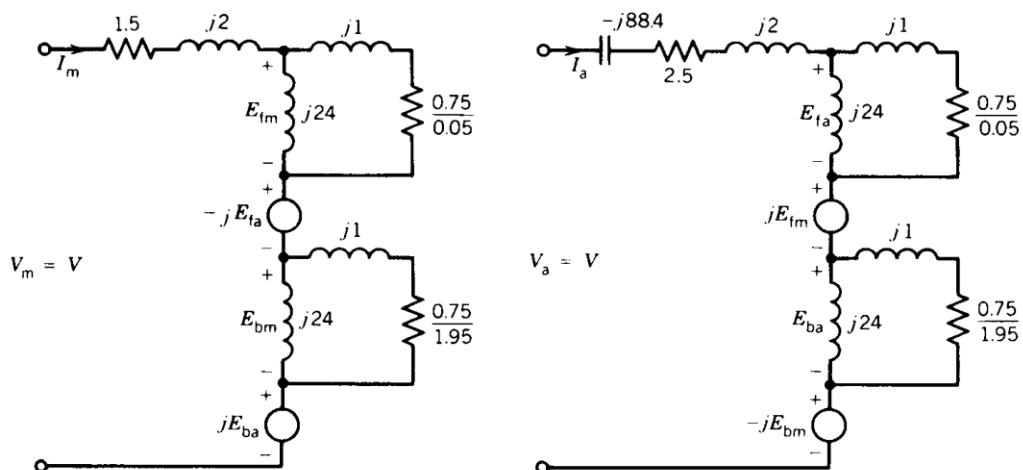
$$X_{1m} = 2 \Omega \quad R_{1m} = 1.5 \Omega \quad R'_2 = 1.5 \Omega$$

$$X_{1a} = 2 \Omega \quad R_{1a} = 2.5 \Omega \quad X'_2 = 2 \Omega \quad X_{mag} = 48 \Omega \quad C = 30 \mu F$$

$$a = \frac{N_a}{N_m} = 1 \quad \text{نسبت تبدیل}$$

الف: مدار معادل را تحت لغزش ۵ درصد رسم کنید.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = 88.4 \Omega$$



شکل ۱-۲۵- مدار معادل در لغزش ۵ درصد

ب: در ولتاژ اسمی، گشتاور و جریان راه انداز را حساب کنید.

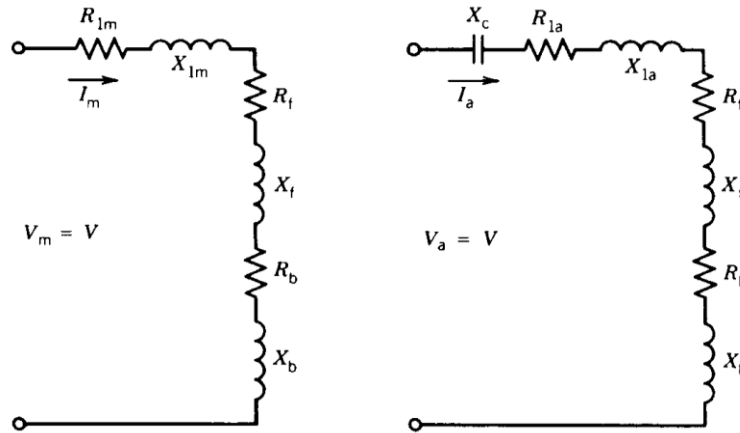
در لغزش  $S = 1$  داریم:

$$Z_f = Z_b = j24 \parallel (0.75 + 1) = 1.2 \angle 54.85^\circ$$

$$E_{fm} = E_{bm} \quad , \quad E_{fa} = E_{ba} \quad \text{همچنین داریم:}$$

با توجه به این تساوی‌ها و اینکه در این مثال  $a=1$  است، مدار معادل نشان داده شده در شکل ۱-۲۳ به

صورت زیر ساده می شود:



شکل ۱-۲۶- مدار معادل در لحظه راه اندازی

$$I_m = \frac{V}{Z_{1m} + Z_f + Z_b} = \frac{120 \angle 0}{1.5 + j2 + 2(0.69 + j0.98)} = 24.5 \angle -54^\circ \text{ A}$$

$$I_a = \frac{V}{Z_{1a} - jX_c + a^2(Z_f + Z_b)} = \frac{120 \angle 0}{2.5 + j2 - j88.4 + 2(0.69 + j0.98)} = 1.42 \angle -88.4^\circ \text{ A}$$

$$I_s = I_m + I_a = 24.5 \angle -54^\circ + 1.42 \angle -88.4^\circ = 234 \angle -51.82^\circ \text{ A}$$

$$T_s = \frac{2 |I_m| |I_a| (R_f + R_b) \sin(\theta_a - \theta_m)}{\omega_s} = \frac{2(24.5)(1.42) 2 \times 0.69 \sin(87.4 + 54)}{\frac{2\pi}{60} \times 1800} \Rightarrow T_s = 0.318 \text{ N.m}$$

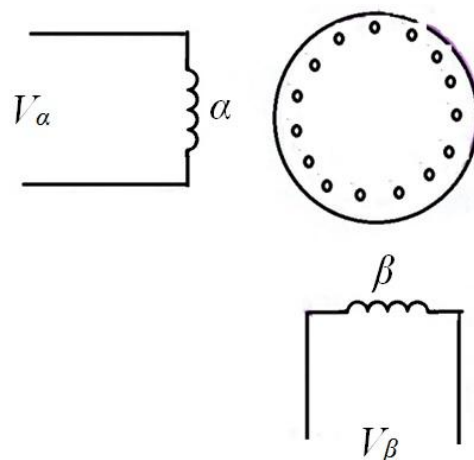


## فصل دوم:

### موتور القایی دو فاز

#### ۲-۱- عملکرد نامتعادل ماشین های دو فاز متقارن

موتور القایی دارای دو سیم پیچی استاتور متعامد فضایی اند که ولتاژهای اعمالی به آن ها در حالت کلی هم دامنه و برهم متعامد نیستند.



شکل ۲-۱ - شماتیک موتور القایی دو فاز

ابتدا عملکرد ولتاژهای دو فاز (ولتاژها  $90^\circ$  اختلاف فاز دارند) به پایانه های استاتور یک ماشین دو فاز که دارای دو سیم پیچ استاتور یکسان  $\alpha$  و  $\beta$  دارای تعامد فضایی هستند را بررسی می کنیم.

← شرایط لازم برای تولید میدان گردان ایده آل

در این حالت جریان های استاتور هم اندازه اند و با هم  $90^\circ$  اختلاف فاز دارند.

وقتی جریان سیم پیچی  $\alpha$  ماکزیمم مقدار لحظه ای خود را دارد جریان سیم پیچ  $\beta$  صفر است و بنابراین موج mmf استاتور حول محور سیم پیچ  $\alpha$  قرار دارد.

به طور مشابه:

وقتی جریان سیم پیچی  $\beta$  ماکزیمم مقدار لحظه ای خود را دارد، جریان سیم پیچ  $\alpha$  صفر است و بنابراین موج mmf استاتور حول محور سیم پیچ  $\beta$  قرار دارد.

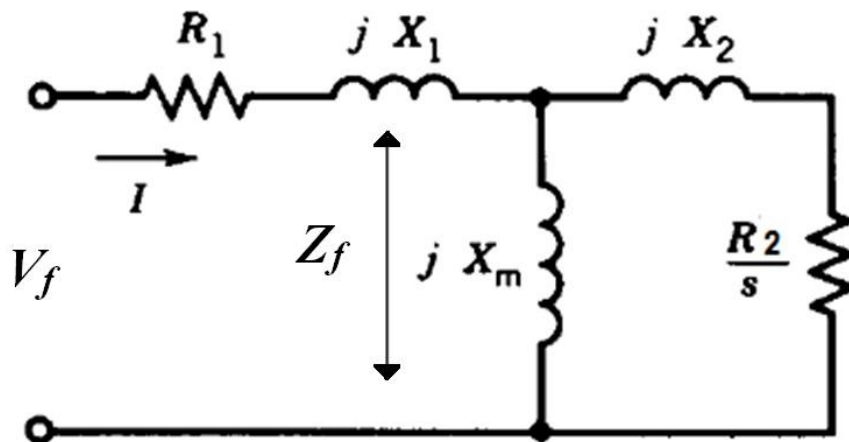
← mmf استاتور در فاصله زمانی متناظر با تغییر  $90^\circ$  ولتاژ اعمالی،  $90^\circ$  الکتریکی در فضا چرخیده است و جهت این چرخش به توالی فاز جریان ها بستگی دارد.

برای مثال اگر جریان سیم پیچ  $\beta$  به اندازه  $90^\circ$  از جریان سیم پیچ  $\alpha$  پس فاز باشد میدان راست گرد و در صورت پیش فاز بودن میدان چپ گرد داریم.

فرض کنید رتور با لغزش  $S$  در جهت سیم پیچ  $\alpha$  به سیم پیچ  $\beta$  در شکل ۱-۲ حرکت کند.

الف: اگر  $V_\beta$  نسبت به  $V_\alpha$  به اندازه  $90^\circ$  پس فاز باشد، مدار معادل برای تحلیل مطابق شکل زیر است.

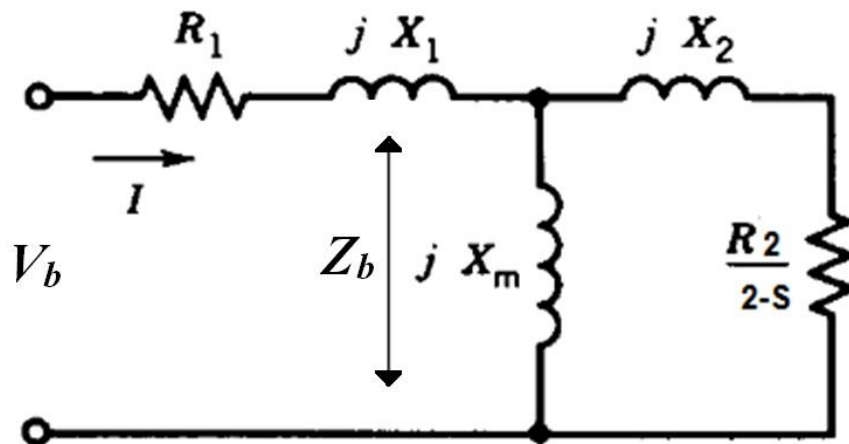
(امپدانس پایانه ای بر فاز از مدار معادل شکل زیر به دست می آید)



شکل ۲-۲- مدار معادل توالی فاز مثبت

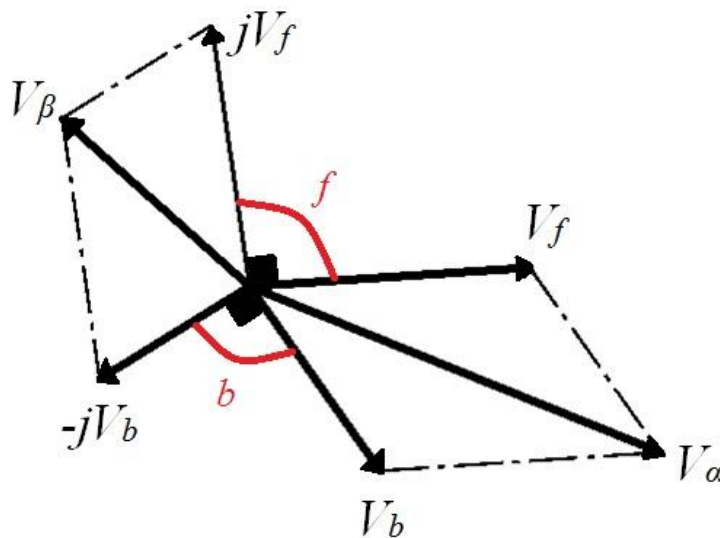
این توالی فاز را توالی فاز مثبت می نامیم و با  $f$  نشان می دهیم.

ب: اگر  $V_\beta$  نسبت به  $V_\alpha$  به اندازه  $90^\circ$  پیش فاز باشد، مدار معادل زیر بایستی برای تحلیل در نظر گرفته شود. این توالی فاز را توالی فاز منفی می نامیم و با  $b$  نمایش می دهیم.



شکل ۲-۲ - مدار معادل توالی فاز منفی

جریان با توالی فاز مثبت، میدان راست گرد را به وجود می آورد و جریان با توالی فاز منفی، میدان چپ گرد را پدید می آورد. در حالت کلی دو ولتاژ  $V_\alpha$  و  $V_\beta$  را که هم دامنه و بر هم عمود نیستند را می توان مجموع دو سیستم متعادل (هم دامنه و متعامد) دارای توالی فازهای مخالف در نظر گرفت.

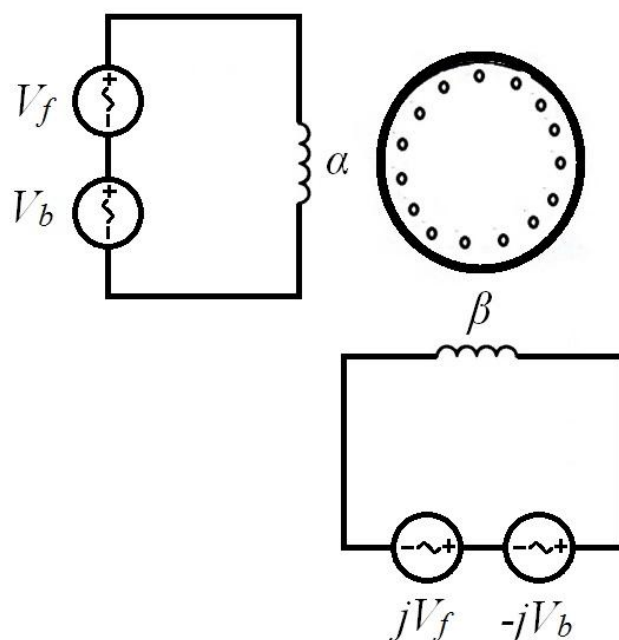


شکل ۳-۲ - دیاگرام فاز مربوط

از دیاگرام فاز نشان داده شده در شکل ۳-۲ واضح است که:

$$\begin{cases} V_{\alpha} = V_f + V_b \\ V_{\beta} = j V_f - j V_b \end{cases}$$

بنابراین می توان ولتاژهای  $V_{\alpha}$  و  $V_{\beta}$  اعمالی به دو فاز را مطابق شکل زیر تجزیه کرد:



شکل ۳-۲-۴- روند مدل سازی یک سیستم نامتعادل

کار با سیستم های متعادل  $(V_f, jV_f)$  و  $(V_b, jV_b)$  بسیار ساده تر از سیستم نامتعادل  $(V_{\alpha}, V_{\beta})$  است. جریان ناشی از هر یک از این سیستم ها را محاسبه می کنیم و از جمع آثار نهایی را به دست می آوریم.

$$\begin{aligned} (V_f, jV_f) &\rightarrow I_f \\ (V_b, jV_b) &\rightarrow I_b \end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} I_{\alpha} = I_f + I_b \\ I_{\beta} = j I_f - j I_b \end{cases}$$

با توجه به شکل ۲-۳، طریقه به دست آوردن مؤلفه های متقارن به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} V_{\alpha} = V_f + V_b \\ V_{\beta} = j V_f - j V_b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_f = \frac{1}{2} (V_{\alpha} - j V_{\beta}) \\ V_b = \frac{1}{2} (V_{\alpha} + j V_{\beta}) \end{cases}$$

مثال ۱-۲- پارامترهای موتور القایی دو فاز چهار قطبی قفس سنجایی 60 Hz و 220 V و 5 hp بر حسب

اهم برفاز عبارتند از:

$$R_1 = 0.534 \quad X_1 = 2.45 \quad X_m = 70.1$$

$$R_2 = 0.956 \quad X_2 = 2.96$$

این موتور با یک منبع دو فاز 60 Hz نامتعادل کار می کند که ولتاژهای فاز آن به ترتیب 230 و 210 ولت

هستند و ولتاژ کوچکتر نسبت به دیگری  $80^\circ$  پیش فاز است به ازای لغزش 0.05.

الف: مؤلفه های متقارن ولتاژ اعمالی:

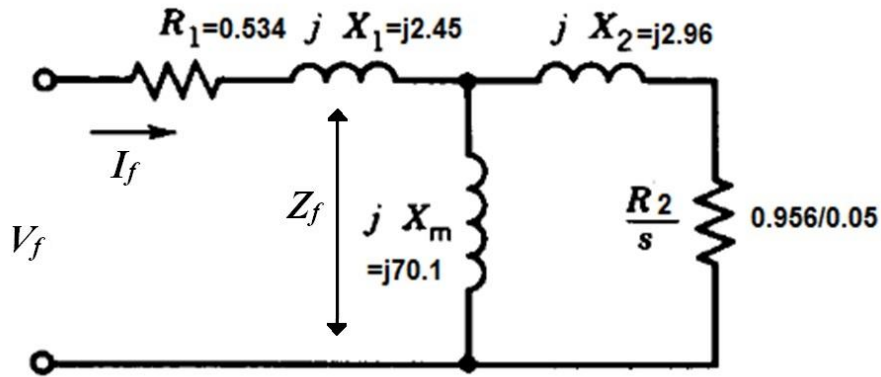
$$V_{\alpha} = 230 \angle 0 = 230 + j 0 \text{ V}$$

$$V_{\beta} = 210 \angle 80^\circ = 36.4 + j 207 \text{ V}$$

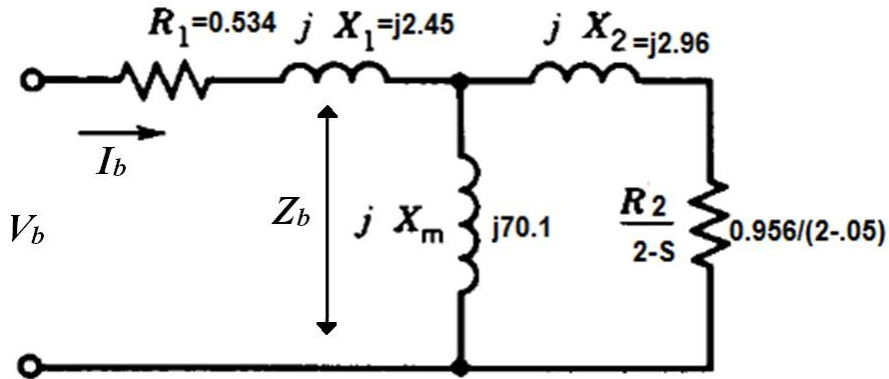
$$V_f = \frac{1}{2} (V_{\alpha} - j V_{\beta}) = 218.4 - j 18.2 = 219.2 \angle -4.8^\circ \text{ V}$$

$$V_b = \frac{1}{2} (V_{\alpha} + j V_{\beta}) = 11.6 + j 18.2 = 21.6 \angle 57.5^\circ \text{ V}$$

ب: مؤلفه های توالی مثبت و توالی منفی جریان های استاتور:



شکل ۲-۶- مولفه ی مثبت



شکل ۲-۷- مولفه ی منفی

$$\Rightarrow I_f = \frac{V_f}{R_1 + jX_1 + Z_f} = \dots = 9.3 - j6.3 = 11.2 \angle -34.2^\circ \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{V_b}{R_1 + jX_1 + Z_b} = \dots = 3.7 - j1.5 = 4 \angle -21.9^\circ \text{ A}$$

ج: مقادیر مؤثر جریان های فاز:

$$\begin{cases} I_\alpha = I_f + I_b = 13 - j7.8 = 15.2 \angle -31^\circ \text{ A} \\ I_\beta = jI_f - jI_b = 4.8 + j5.6 = 7.4 \angle 49.1^\circ \text{ A} \end{cases}$$

د: توان مکانیکی داخلی موتور:

$$P_{gf} = 2(\operatorname{Re}[V_f I_f^*] - R_1 I_f^2) = \dots = 414.9 \text{ W}$$

میدان راست گرد

ضریب ۲ به خاطر دو فاز بودن است.

$$P_{gb} = 2(\operatorname{Re}[V_b I_b^*] - R_1 I_b^2) = \dots = 14.5 \text{ W}$$

میدان چپ گرد

محاسبه توان مکانیکی داخلی:

$$P_{\text{mech}} = (1 - S) (P_{gf} - P_{gb}) = 3927 \text{ W}$$

## فصل سوم :

### موتور یونیورسال

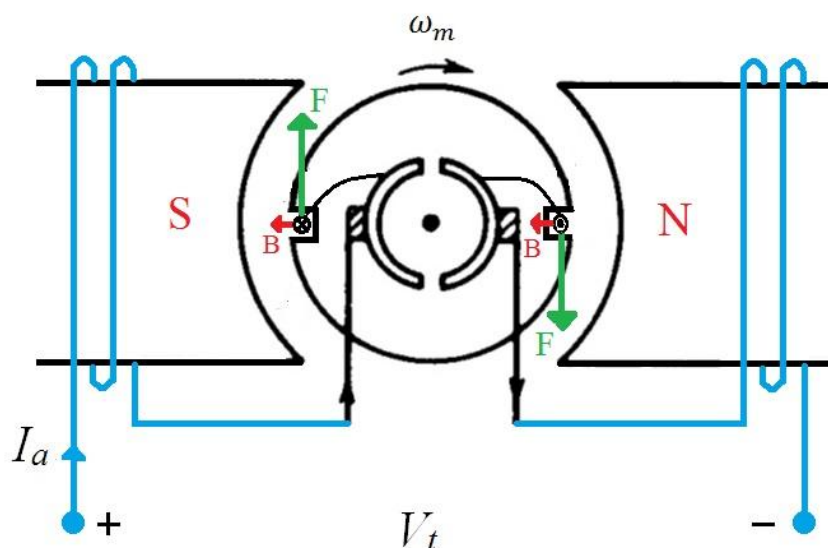
#### ۳-۱- کلیات

- ✓ موتور تک فاز سری یا یونیورسال (Universal motor)
- ✓ تغذیه AC و DC  $\Leftrightarrow$  لفظ یونیورسال
- ✓ کاربرد به وفور در لوازم خانگی: سبک و سرعت زیاد ( $1500 - 10000^{rpm}$ )
- ✓ عمدتاً به برق AC وصل می شود.
- ✓ موتورهای یونیورسال در گروه موتورهای با توان کمتر از یک اسب بخار بیشترین نسبت توان بر قیمت را دارد ولی نوپز آن بیشتر و عمر آن نسبتاً کمتر است.
- ✓ موتورهای AC سری بزرگ در سیستم حمل و نقل استفاده می شوند.
- ✓ هسته مورق است به خاطر کاهش تلفات فوکو (برق AC)
- ✓ جریان آرمیچر از سیم پیچی میدان سری می گذرد و  $\varphi_d$  را در امتداد محور d به وجود می آورد.
- ✓ جریان آرمیچر از خود سیم پیچ آرمیچر هم می گذرد و شار  $\varphi_q$  را در امتداد محور q تولید می کند
- ✓  $\varphi_d$  و  $\varphi_q$  هر دو با  $i_a$  هم فازاند.

#### ۳-۲- موتور سری

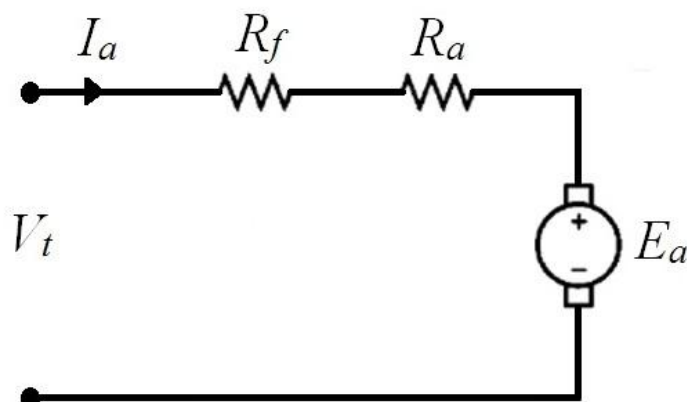


موتور سری تنها نوع موتوری است که در صورت تغییر جهت جریان، جهت نیروی تولیدی ثابت می ماند. همانطور که از شکل زیر مشاهده می شود، با توجه به رابطه محاسبه نیرو  $F=i(l \times B)$ ، جهت نیرو با تغییر جهت جریان (پلاریته ولتاژ ورودی) تغییر نمی کند و همواره باعث چرخش رتور در جهت ساعت گرد می شود.



شکل ۳-۱- نحوه تولید نیرو (گشتاور) در موتور سری

الف: عملکرد موتور سری برای تحریک DC (بحث ماشین ۱):



شکل ۳-۲- مدار معادل موتور سری هنگام اتصال به منبع DC

$$T = K_a \phi_d I_a$$

$$E_a = K_a \phi_d \omega_m$$

برای سیستم خطی هسته به اشباع نمی رود و داریم:

$$T = K_{sr} I_a^2$$

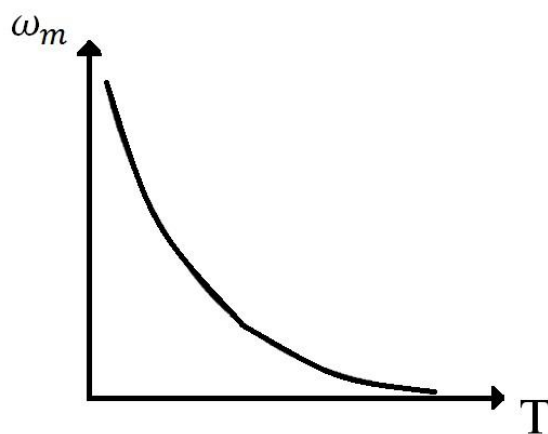
$$E_a = K_{sr} I_a \omega_m$$

مزیت: گشتاور زیاد در سرعت کم (گشتاور راه انداز)

$$V_t = E_a + (R_f + R_a) I_a$$

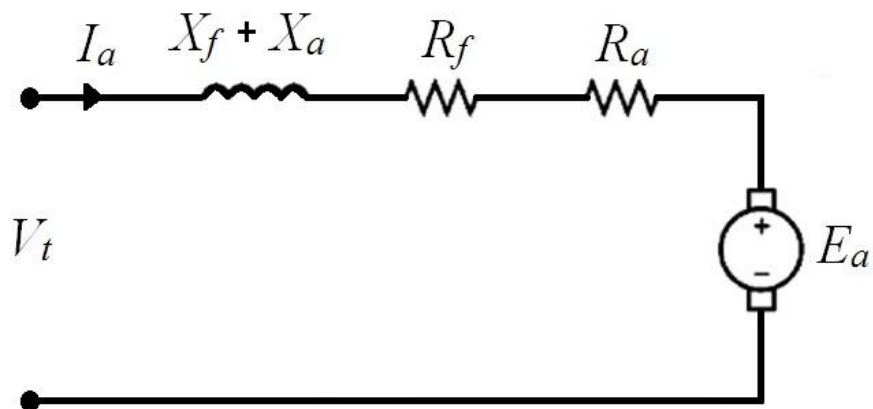
$$E_a = K_{sr} \omega_m I_a \quad \rightarrow \quad \omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_{sr} T}} - \frac{R_f + R_a}{K_{sr}}$$

$$T = K_{sr} I_a^2$$



شکل ۳-۳- مشخصه گشتاور-سرعت موتور DC

ب - روابط ریاضی برای ولتاژ AC



شکل ۳-۴- مدار معادل موتور DC سری در حالت اتصال به ولتاژ AC

$$NI = R\phi \rightarrow \phi \propto I_a$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m = K_a K' I_a \omega_m$$

$$\rightarrow E_a \angle -\alpha = K_{sr} \omega_m I_a \angle -\alpha$$

✓ هم فاز بودن  $I_a$  و  $E_a$

$$V_t \angle 0 = E_a \angle -\alpha + (R + jX) I_a \angle -\alpha$$

که در آن  $X = X_f + X_a$  و  $R = R_f + R_a$  می باشد.

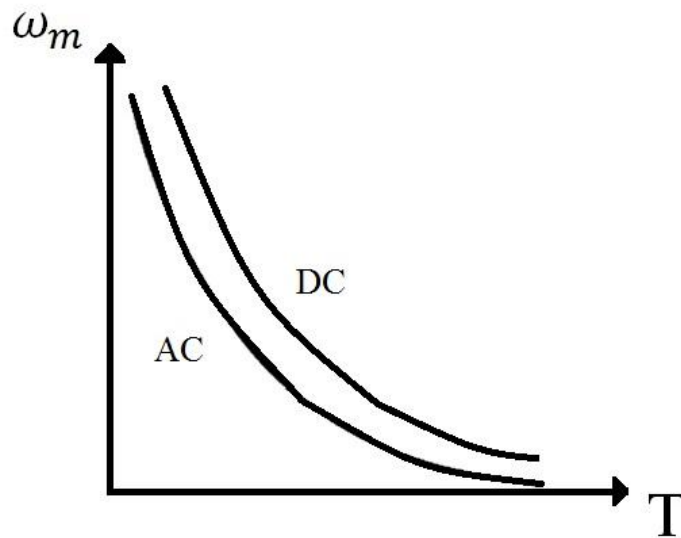
$$V_t = K_{sr} \omega_m I_a \angle -\alpha + (R + jX) I_a \angle -\alpha$$

$$\rightarrow I_a \angle -\alpha = \frac{V_t}{(K_{sr} \omega_m + R) + jX}$$

$$\rightarrow I_a \angle -\alpha = \frac{V_t}{\sqrt{(K_{sr} \omega_m + R)^2 + X^2}} \angle -\tan^{-1} \frac{X}{K_{sr} \omega_m + R}$$

$$T_e = K_{sr} I_a^2 \rightarrow I_a = \frac{T_e}{\sqrt{K_{sr}}}$$

$$\Rightarrow |I_a| = \frac{V_t}{\sqrt{(K_{sr} \omega_m + R)^2 + X^2}} = \frac{T_e}{\sqrt{K_{sr}}} \rightarrow \omega_m = \sqrt{\frac{V_t^2}{K_{sr} T_e} - \left(\frac{X}{K_{sr}}\right)^2} - \frac{R}{K_{sr}}$$



شکل ۳-۵- مشخصه گشتاور-سرعت موتور DC سری

وقتی  $f = 0 \leftarrow X = 0 \leftarrow$  به رابطه مشابه تحریک DC می‌رسیم.

به خاطر وجود  $X_f + X_a = X$ ، ترم اول در رابطه فوق مقدارش کمتر است و در نتیجه سرعت در حالت AC کمتر از DC است.

### ۳-۳- روابط اساسی مربوط به تحریک AC

$$i_a = I_{am} \cos \omega t$$

$$\varphi_d = \varphi_{dm} \cos \omega t$$

✓ جریان  $i_a$  با  $\varphi_d$  هم فاز است.

$$e_a = K_a \varphi_d \omega_m = K_a \omega_m \varphi_{dm} \cos \omega t$$

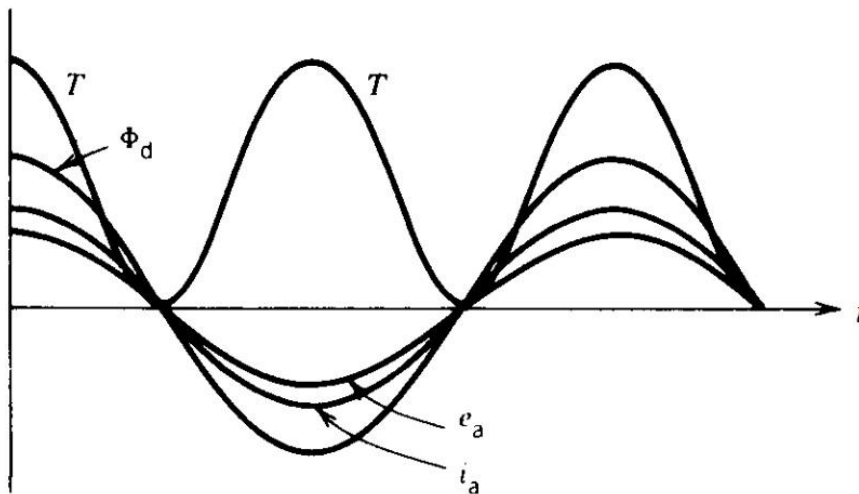
$$E_a = K_a \frac{\varphi_{dm}}{\sqrt{2}} \omega_m = K_a \Phi_d \omega_m$$

که در آن  $\Phi_d$  مقدار مؤثر شار محور  $d$  است.

$$T = K_a \varphi_d i_a = K_a \varphi_{dm} I_{am} \cos^2 \omega t = K_a \varphi_{dm} I_{am} \times \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$$

اگرچه جریان در هر نیم سیکل وارونه می شود، گشتاور لحظه ای یکسویه است  $\Leftarrow$  چرخش موتور

توجه شود فرکانس گشتاور لحظه ای دو برابر فرکانس منبع تغذیه است  $\Leftarrow$  نویز و سروصدا



شکل ۳-۶- شکل موج های ولتاژ، جریان، شار و گشتاور

و گشتاور متوسط برابر است با:

$$T = K_a \frac{\varphi_{dm} I_{am}}{2} = K_a \frac{\varphi_{dm}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{am}}{\sqrt{2}} = K_a \Phi_d I_a$$

اگر سیستم مغناطیسی خطی باشد:

$$\begin{cases} T = K_{sr} I_a^2 \\ E_a = K_{sr} I_a \omega_m \end{cases}$$

$$P_{mech} = E_a I_a$$

توان مکانیکی حاصله:

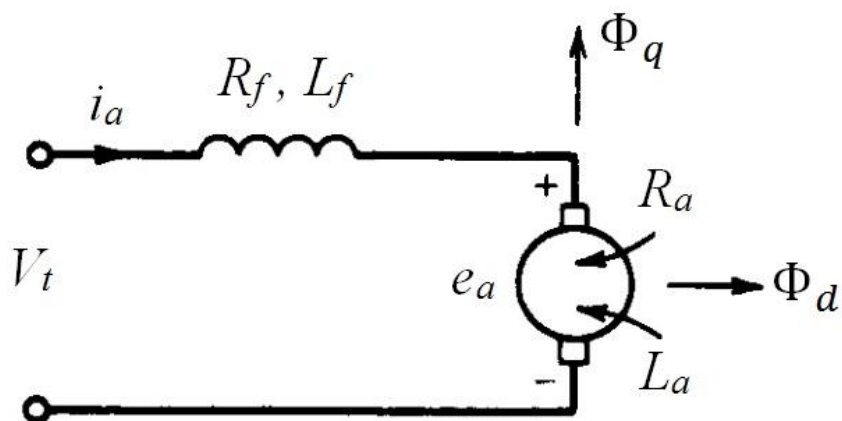
$$T = \frac{E_a I_a}{\omega_m}$$

گشتاور حاصله:

معادله ولتاژ در تحریک AC :

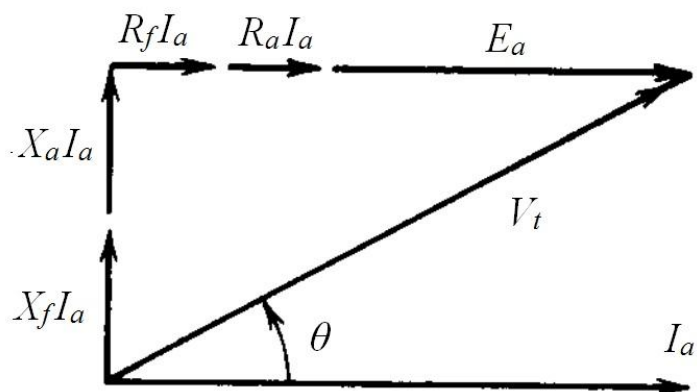
با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل ۷-۳، داریم:

$$V_t = (R_f + R_a) I_a + j(X_f + X_a)I_a + E_a$$



شکل ۷-۳- مدار معادل موتور یونیورسال در حالت تحریک AC

دیاگرام فازوری مربوطه در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- نمودار فازوری مربوطه

همانطور که در بالا نیز بحث شد،  $E_a$  با  $I_a$  هم فاز است چون  $\phi_d$  هم فاز است با  $I_a$  و همچنین  $e_a$  با  $\phi_d$  هم فاز است.

### ۳-۴- مقایسه تحریک DC و تحریک AC

اگر جریان آرمیچر در تحریک DC با مقدار مؤثر جریان آرمیچر در تحریک AC برابر باشد، داریم:

$$\phi_d(ac) = \phi_d(dc)$$

توجه شود مدار مغناطیسی ممکن است به ازای جریان ac دارای مقدار rms برابر با جریان dc در قله‌های جریان اشباع شود. با صرفنظر از این اثر:

$$\frac{E_a(ac)}{E_a(dc)} = \frac{K_a \phi_d(dc) \omega_m(dc)}{K_a \phi_d(ac) \omega_m(ac)} = \frac{\omega_m(dc)}{\omega_m(ac)}$$

با توجه به دیاگرام فازوری نشان داده شده در شکل ۳-۶، داریم:

$$\frac{E_a(\text{dc})}{E_a(\text{ac})} = \frac{V_t - (R_f + R_a) I_a}{V_t \cos \theta - (R_a + R_f) I_a} = \frac{1 - (I_a/V_t)(R_a + R_f)}{\cos \theta - (I_a/V_t)(R_f + R_a)}$$

از آنجایی که  $\frac{I_a(R_a+R_f)}{V_t} \ll 1$  داریم:

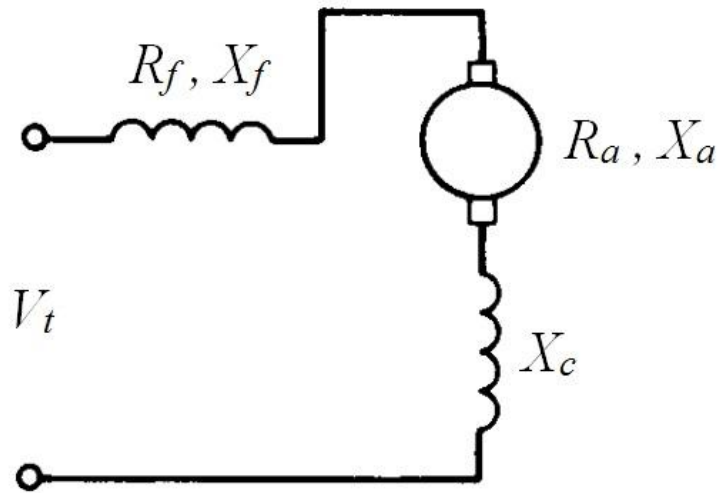
$$\frac{E_a(\text{dc})}{E_a(\text{ac})} \approx \frac{1}{\cos \theta} > 1$$

بنابراین اگر ولتاژ پایانه و جریان آرمیچر در دو شرایط DC و AC یکسان باشند (گشتاور یکسان)، سرعت در تحریک AC کمتر از تحریک DC است و این نکته از شکل ۳-۵ نیز قابل مشاهده است. در تحریک AC ضریب توان میدان خیلی جالب نیست.

### ۳-۵- موتورهای جبران شده

می توان سیم پیچی جبران گر را با آرمیچر سری کرد تا شاری در جهت مخالف  $\varphi_q$  تولید کند. (قبلاً اشاره شده که  $\varphi_q$  در اثر عبور جریان  $I_a$  حاصل می شود)





شکل ۳-۹- موتور سری جبران شده

اندوکتانس خالص آرمیچر و سیم پیچی جبران گر برابر است با:

$$L_{\text{eff}} = L_a + L_c - 2 M$$

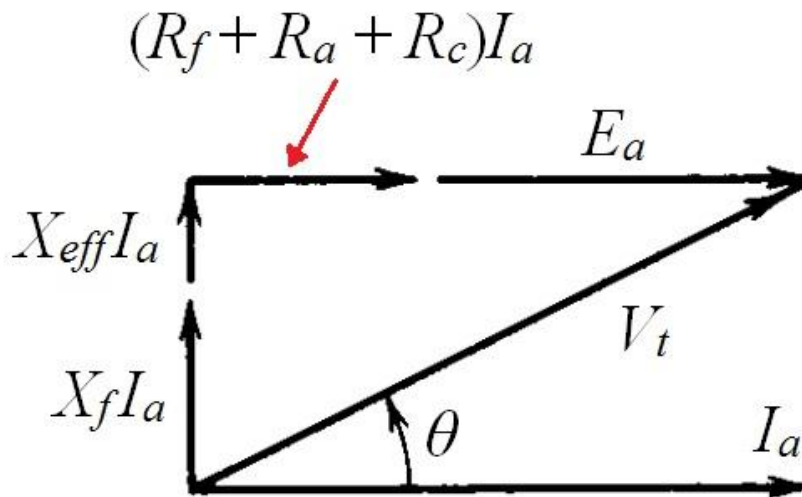
$M$  : اندوکتانس متقابل

$L_a$  : اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر

$L_c$  : اندوکتانس سیم پیچی جبران گر

این امکان وجود دارد که  $L_{\text{eff}} \ll L_a$  گردد.

در این صورت نمودار فازوری نشان داده شده در شکل ۳-۸ مطابق شکل زیر تغییر می کند:



شکل ۳-۱۰- دیاگرام فازوری برای موتور سری جبران شده

ضریب توان بهبود می یابد  $\Rightarrow \theta$  کم می شود

← سیم پیچی جبران گر بهره را بیشتر می کند

سیم پیچی جبران گر مقاومت  $R_c$  را به مدار می افزاید.

← اثر راکتانس آرمیچر ( $X_a$ ) توسط سیم پیچی جبران گر کاهش می یابد.

سیم پیچی جبران گر  $E_a$  و در نتیجه سرعت را زیاد می کند.

از بحث ماشین DC به یاد داریم، کاهش شار در امتداد محور  $q$  به خاطر عمل جبران سازی، کموتاسیون جریان را بهبود می بخشد.

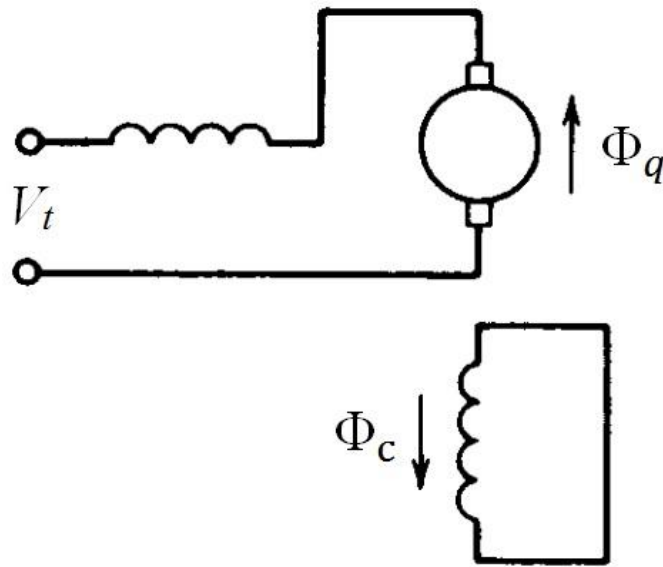
طرح دیگری از سیم پیچی جبران گر:

در این طرح مطابق شکل ۳-۱۱، سیم پیچی جبران گر که یک سیم پیچی اتصال کوتاه شده است، به مدار آرمیچر متصل نیست.

جریان القاء شده در این سیم پیچی شاری را به وجود می آورد ( $\Phi_c$ ) که با  $\Phi_q$  مخالف می کند.

توجه شود در این طرح سیم پیچی جبران گر بسیار اندکتیو است. ( $\frac{R}{L}$  بسیار کم)

این نوع جبران گر فقط در سیستم AC کاربرد دارد.



شکل ۳-۱۱- جبران سازی به روش القاء

مثال ۳-۱: موتور یونیورسال 60 Hz ، 120 V ، 0.25 hp مفروض است. اگر موتور به منبع 120 V DC

وصل شود، سرعت آن 2000 rpm است و 0.6 A از شبکه جریان می کشد. اگر به برق AC با همین ولتاژ

و فرکانس 60 Hz متصل شود، سرعت، گشتاور و ضریب قدرت موتور را محاسبه نمایید، مشروط به آن که

در این حالت جریان مؤثر موتور 0.6 A باشد.

مقاومت و اندوکتانس در پایانه ماشین را به ترتیب ۲۰ اهم و ۰/۲۵ هنری بگیرید.

تحریک DC :

با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳-۲ داریم:

$$E_{a|dc} = V_t - (R_a + R_f) I_a = 120 - 20 \times 0.6 = 108 \text{ V}$$

تحریک AC :

با توجه به دیاگرام فازوری نشان داده شده در شکل ۳-۸ در حالت تحریک AC داریم:

$$X = 2 \pi f L = 2\pi \times 60 \times 0.25 = 94.25$$

$$E_{a|ac} + R I_a = \sqrt{V_t^2 - (X I_a)^2}$$

در معادلات فوق  $R$  و  $X$  مقاومت و راکتانس در پایانه ماشین می باشند.

$$\Rightarrow E_{a|ac} = -20 \times 0.6 + \sqrt{120^2 - (94.25 \times 0.6)^2}$$

$$\Rightarrow E_{a|ac} = 93.84 \text{ V}$$

با فرض آنکه برای جریان های یکسان در حالت های dc و ac شارها نیز یکسان شود (از اشباع صرفنظر

شود)، داریم:

$$\frac{E_{a|dc}}{E_{a|ac}} = \frac{n_{dc}}{n_{ac}} \Rightarrow n_{ac} = 2000 \times \frac{93.84}{120} = 1737.8 \text{ rpm}$$

توجه شود اگر در تحریک ac اشباع رخ دهد،  $\phi_d(ac)$  کمتر از  $\phi_d(dc)$  خواهد بود. با توجه به دیاگرام

فازوری:

$$\text{پس فاز } \cos \theta = \frac{E_a + R I_a}{V_t} = \frac{93.84 + 12}{120} = 0.88$$

$$P_{\text{mech}} = E_a I_a = 93.84 \times 0.6 = 56.3 \text{ W}$$

$$T = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_m} = \frac{56.3}{1737.8 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.309 \text{ N.m}$$

مثال ۳-۲: (اثر سیم پیچ جبران گر روی عملکرد موتور یونیورسال)

موتور یونیورسال  $P_{\text{rot}} = 30 \text{ W}$  ،  $60 \text{ Hz}$  ،  $120 \text{ V}$  تلفات چرخشی

(سیم پیچ جبران گر نباشد)  $Z_1 = 5 + j 25$  : امپدانس ورودی

(سیم پیچ جبران گر باشد)  $Z_2 = 5.5 + j 3.5$

الف- بدون جبران گر  $1.6 \text{ A}$  ،  $1800 \text{ rpm}$  ←  $\eta = ?$  ،  $P_{\text{out}} = ?$  ،  $\text{Cos}\phi = ?$

ب- با سیم پیچی جبران گر آنقدر به موتور بار می دهیم که جریان همان  $1.6 \text{ A}$  گردد.

$\eta = ?$  ،  $P_{\text{out}} = ?$  ،  $\text{Cos}\phi = ?$  ،  $\omega_r = ?$

حل قسمت الف:

با توجه به معادلات داده شده در قسمت ب از زیر بخش ۳-۲ داریم:

$$1.6 = I_a = \frac{V_t}{\sqrt{(K_{\text{sr}} \omega_r + R)^2 + X^2}} = \frac{120}{\sqrt{(K_{\text{sr}} \omega_r + 5)^2 + 25^2}} \rightarrow K_{\text{sr}} \omega_r = 65.7$$

$$\rightarrow K_{\text{sr}} = \frac{657}{1800 \times \pi/30} = 0.348$$

پارامتر  $K_{\text{sr}}$  برای هر دو قسمت الف و ب یکسان است.

$$\text{tg } \phi = \frac{X}{K_{\text{sr}} \omega_r + R} = \frac{25}{65.7 + 5} \rightarrow \phi = 19.47^\circ \rightarrow \text{Cos}\phi = 0.943$$

$$P_{\text{out}} = K_{\text{sr}} I_a^2 \times \omega_r - P_{\text{rot}} = 0.348 \times 1.6^2 \times 1800 \times \pi/30 - 30 = 138.2 \text{ W}$$

$$P_{\text{in}} = V I \cos \varphi = 120 \times 1.6 \times 0.943 = 181 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 = \frac{138}{181} \times 100 = 76 \%$$

حل قسمت ب:

$$1.6 = \frac{120}{\sqrt{(K_{\text{sr}} \omega_r + 50.5)^2 + 3.5^2}} \rightarrow K_{\text{sr}} \omega_r = 69.42$$

$$\rightarrow \omega_r = \frac{69.42}{0.348} = 199.13 \text{ rad/S}$$

$$n_r = 199.13 \times \frac{30}{\pi} = 1901 \text{ rpm}$$

با سیم پیچ جبران گر به سرعت بالاتری می توان رسید.

$$\text{tg } \varphi = \frac{3.5}{69.42 + 5.5} \rightarrow \varphi = 2.67^\circ \rightarrow \cos \varphi = 0.9989 \text{ (بهبود ضریب توان)}$$

$$P_{\text{out}} = K_{\text{sr}} \omega_r I_a^2 - P_{\text{rot}} = 0.348 \times 199.13 \times 1.6^2 - 30 = 147.7 \text{ W}$$

$$P_{\text{in}} = 120 \times 1.6 \times 0.9989 = 191.78 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{147}{191.78} = 0.77 \%$$

## فصل چهارم:

### موتورهای سنکرون تک فاز

موتورهای سنکرون تک فاز دو نوع اصلی دارند که در این فصل با آنها آشنا می شویم:

الف: موتور رلوکتانسی سنکرون تکفاز Single-phase Synchronous Reluctance Motor

ب: موتور هیستریزیس Hysteresis Motor

✓ موتورهای با سرعت ثابت و توانی به مراتب کمتر از موتورهای سه فاز سنکرون

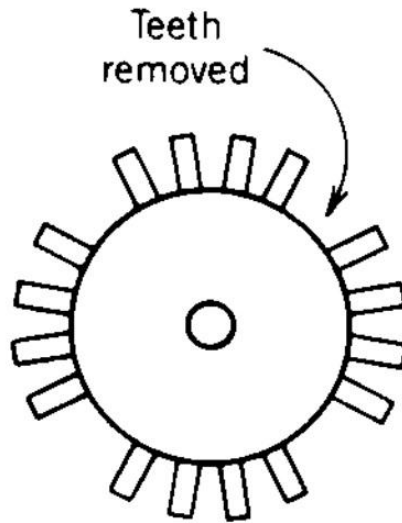
#### ۴-۱- موتور رلوکتانسی تکفاز

✓ استاتور آن شبیه موتورهای القایی تک فاز است (استاتور حاوی سیم پیچ اصلی و کمکی است).

✓ در ساختمان رتور برجستگی وجود دارد (برداشتن چند دندانه در رتور)

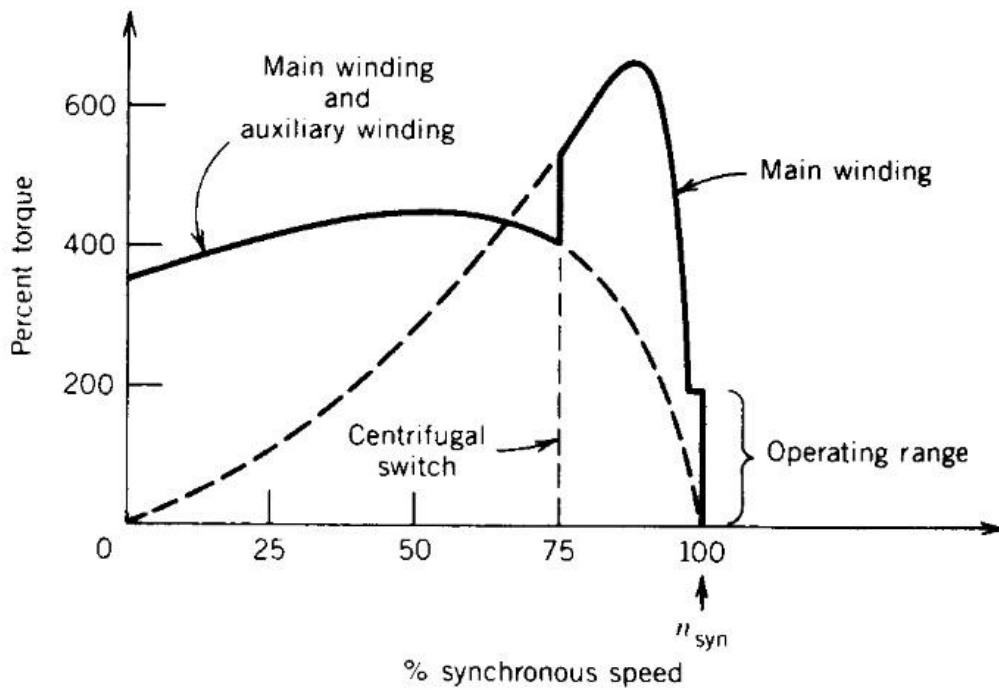
✓ در برداشتن دندانه ها، تعداد قطب های مطلوب بایستی حاصل شود. برای مثال رتور چهارقطبی برای

موتور رلوکتانسی سنکرون تک فاز در شکل زیر مشاهده می شود.



شکل ۴-۱- رتور یک موتور رلوکتانسی چهار قطبی

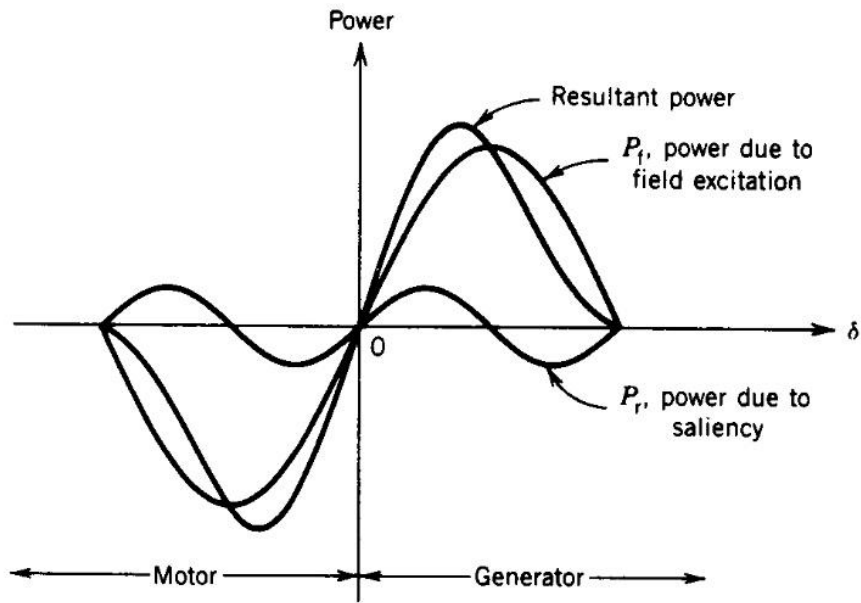
میله های رتور قفس سنجابی و حلقه های انتهایی برای حل مشکل راه اندازی به قوت خود باقی اند. در سرعتی حدود 75% سرعت نامی کلید گریز از مرکز عمل می کند.



شکل ۴-۲- مشخصه گشتاور-سرعت موتور رلوکتانسی







شکل ۴-۴- مشخصه توان- زاویه ماشین سنکرون قطب برجسته

$E_f$ : ولتاژ القایی در سیم پیچی استاتور ناشی از  $\phi_f$

ممف آرمیچر ( $F_a$ ) می تواند به دو مؤلفه تجزیه شود یکی روی محور  $d$  که همان  $F_d$  و یکی در امتداد محور  $q$  که همان  $F_q$  است.

$F_d$  و  $F_q$  شارهای  $\phi_{ad}$  و  $\phi_{aq}$  را به وجود می آورند. ( $F = R \phi$ )

توجه شود رلوکتانس فاصله هوایی در امتداد محور  $q$  بیشتر از محور  $d$  است.

$\phi_{ad}$ : شار عکس العمل آرمیچر در امتداد محور  $d$  که با راکتانس  $X_{ad}$  مدل می شود.

$\phi_{aq}$ : شار عکس العمل آرمیچر در امتداد محور  $q$  که با راکتانس  $X_{aq}$  مدل می شود.

اگر  $X_{al}$  راکتانس نشتی استاتور باشد داریم:

$$\begin{cases} X_d = X_{ad} + X_{al} & \text{راکتانس سنکرون- محور } d \\ X_q = X_{aq} + X_{al} & \text{راکتانس سنکرون- محور } q \end{cases}$$

چون رلوکتانس فاصله هوایی در امتداد محور  $q$  بزرگتر از محور  $d$  است  $X_d > X_q$  معمولاً:

$$X_q = (0.5 - 0.8)X_d$$

#### ۴-۱-۱- تحلیل عملکرد موتور رلوکتانسی تک فاز

در سرعت سنکرون:

✓ به خاطر فاصله هوایی بزرگ رلوکتانس ( $R$ ) بزرگ است و در نتیجه جریان مغناطیس‌کنندگی زیاد است.

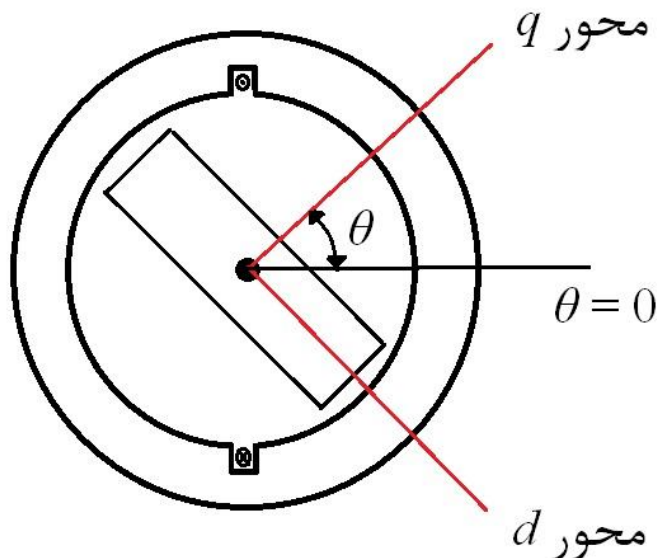
$$Ni_m = R \phi$$

به عبارت دیگر برای تحریک به جریان راکتیو زیادی نیاز داریم. در نتیجه ضریب توان این موتورها کم است،

به علاوه چون تحریک DC نداریم، گشتاور ماکزیمم کاهش می‌یابد. (منحنی نشان داده شده در شکل ۴-۳)

لذا موتور رلوکتانسی تحت توان یکسان حجیم‌تر از موتور سنکرون با تحریک DC است.

مزایا: سادگی ساختار، هزینه کم تعمیر و نگهداری ...



شکل ۴-۵- برش عرضی کامل یک موتور رلوکتانسی با دو قطب روی رتور

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

میدان طپشی ناشی از استاتور به دو میدان گردش راست گرد و چپ گرد تجزیه می شود.

اگر رتور در اثر عاملی در جهت یکی از این میدان ها به چرخش درآید، می تواند به حرکت خود در آن جهت ادامه دهد.

$$V_{(t)} = V_m \cos \omega t$$

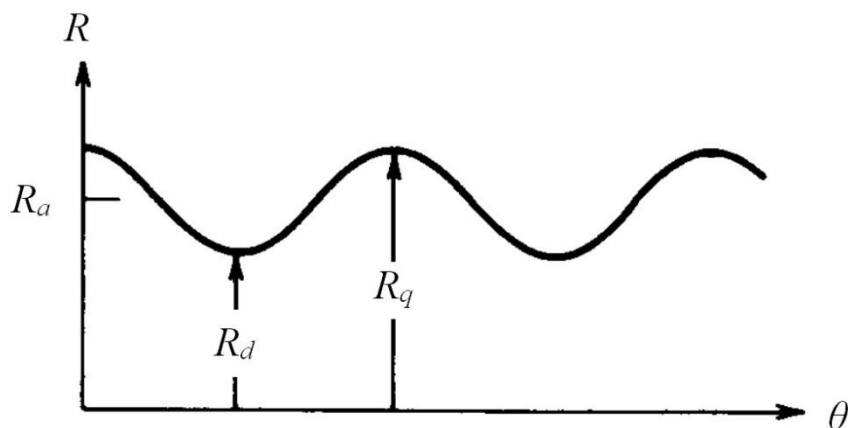
$$V_{(t)} = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \xrightarrow{\text{از افت ولتاژ مقاومتی صرف نظر می شود}} \lambda = \int V dt = \frac{V_m}{\omega} \sin \omega t$$

$$\frac{N_s}{\lambda = N_s \phi} \xrightarrow{\text{تعداد دور مؤثر}} V_{(\phi)} = \left( \frac{V_m}{N_s \omega} \right) \sin \omega t = \phi_m \sin \omega t$$

$$\begin{cases} Ni = R \phi \\ d\lambda = N d\phi \end{cases} \Rightarrow i = \frac{R \phi}{N} \Rightarrow W_f = \int i d\lambda = \int R \phi d\phi = \frac{1}{2} R \phi^2$$

$$T_e = - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \Big|_{\phi=\text{const.}} \Rightarrow T_e = - \frac{1}{2} [\phi_m \sin \omega t]^2 \frac{dR}{d\theta}$$

فاصله هوایی طوری طراحی می شود که تغییرات رلوکتانس سینوسی باشد.



شکل ۴-۶- تغییرات رلوکتانس در موتور سنکرون

$$R = \frac{g}{\mu_0 A} = R_a + R_b \cos 2\theta$$

$$\theta = 0 \rightarrow R_{\max}$$

$$\theta = 180 \rightarrow R_{\max}$$

$$\theta = 360 \rightarrow R_{\max}$$

$$\theta = 90 \rightarrow R_{\min}$$

$$\theta = 27 \rightarrow R_{\min} \quad \begin{cases} R_q = R_{\max} = R_a + R_b \\ R_d = R_{\min} = R_a - R_b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_a = \frac{R_d + R_q}{2} \\ R_b = \frac{R_q - R_d}{2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow R = \frac{R_d + R_q}{2} + \frac{R_q - R_d}{2} \cos 2\theta$$

$$T_e = -\frac{1}{2} \varphi_m^2 \sin^2 \omega t (-2 R_b \sin 2\theta) = \varphi_m^2 R_b \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \sin 2\theta$$

$$T_e = \frac{1}{2} \varphi_m^2 R_b \sin 2\theta - \frac{1}{2} \varphi_m^2 R_b \cos 2\omega t \sin 2\theta$$

$$= \frac{1}{2} \varphi_m^2 R_b \sin 2\theta - \frac{1}{4} \varphi_m^2 R_b [\sin(2\theta + 2\omega t) + \sin(2\theta - 2\omega t)]$$

$$\xrightarrow{\theta = \omega_m t + \delta} \begin{cases} T_{e1} = \frac{1}{2} \varphi_m^2 R_b \sin(2\omega t + 2\delta) \rightarrow \omega_m = 0, \quad \delta \neq 0 \\ T_{e2} = -\frac{1}{4} \varphi_m^2 R_b \sin(2\omega_m t + 2\omega t + 2\delta) \rightarrow \omega_m = -\omega, \quad \delta \neq 0 \\ T_{e3} = -\frac{1}{4} \varphi_m^2 R_b \sin(2\omega_m t - 2\omega t + 2\delta) \rightarrow \omega_m = \omega, \quad \delta \neq 0 \end{cases}$$

شرط تبدیل انرژی آن است که  $T_{\text{avg}} \neq 0$

$$\omega_m = \pm \omega \Rightarrow T_{e,\text{avg}} = -\frac{1}{4} \varphi_m^2 R_b \sin 2\delta$$

نکات:

۱- میانگین گشتاور تابعی از  $2\delta$  است.

۲- علامت منفی نشان دهنده آن است که گشتاور سعی در هم جهت کردن رتور و استاتور دارد. (کاهش

رلوکتانس)

۳- با  $R_b = \frac{R_q - R_d}{2}$  رابطه دارد.

هرچه  $R_b$  بزرگتر باشد گشتاور بیشتر است. در رتور استوانه ای  $R_q = R_d$  سپس  $R_b = 0$

$$T_e = 0 \quad \Leftarrow$$

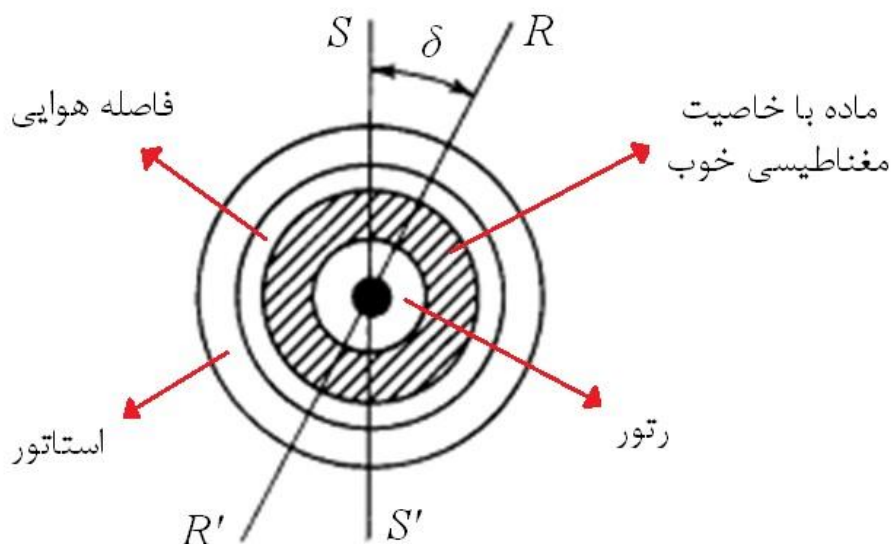
۴- با مجذور شار رابطه دارد یعنی جهت شار مهم نیست  $\Leftarrow$  جهت ولتاژ اگر تغییر کند جهت گشتاور

تغییر نمی کند.

۵- می توان در جهت مثلثاتی یا خلاف آن حرکت کند و گشتاور یکسانی را به وجود آورد.

#### ۴-۲- موتور هیستریزیس

استاتور این موتورها شبیه موتور القایی تک فاز با خازن راه انداز است  $\Leftarrow$  تولید میدان گردان رتور، استوانه ای از جنس یک ماده غیر مغناطیسی (آلومینیوم) که روی آن مطابق شکل ۴-۷ یک ماده با خاصیت مغناطیسی بسیار خوب (آهن متوسط) به ضخامتی در حدود چند میلی متر وجود دارد.



شکل ۴-۷- برش عرضی موتور هیستریزیس

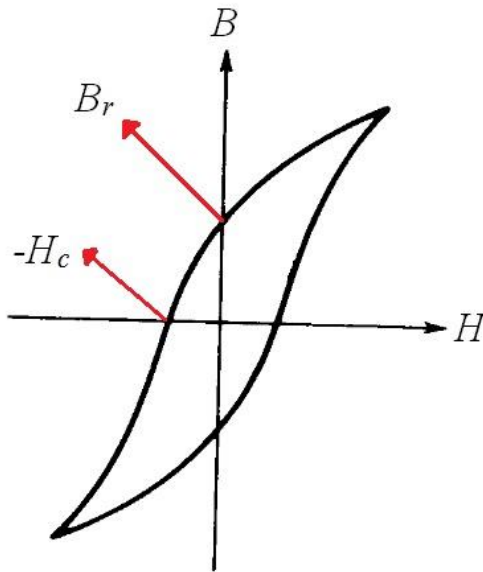
محور میدان استاتور :  $S S'$

محور میدان رتور :  $R R'$

حلقه هیستریزیس آهن متوسط نه خیلی باریک است (مثل آهن معمولی که در ساخت ماشین های الکتریکی به وفور استفاده می شود) و نه خیلی پهن است (مثل آهنربای دائم که در ساخت ماشین های مغناطیس دائم کاربرد دارند). آهن متوسط نیروی ضد محرکه مخالف ( $H_c$ ) کمتری در مقایسه با مواد آهنربای دائم دارند:

$$H_c = 4.50 \text{ KA/m}$$

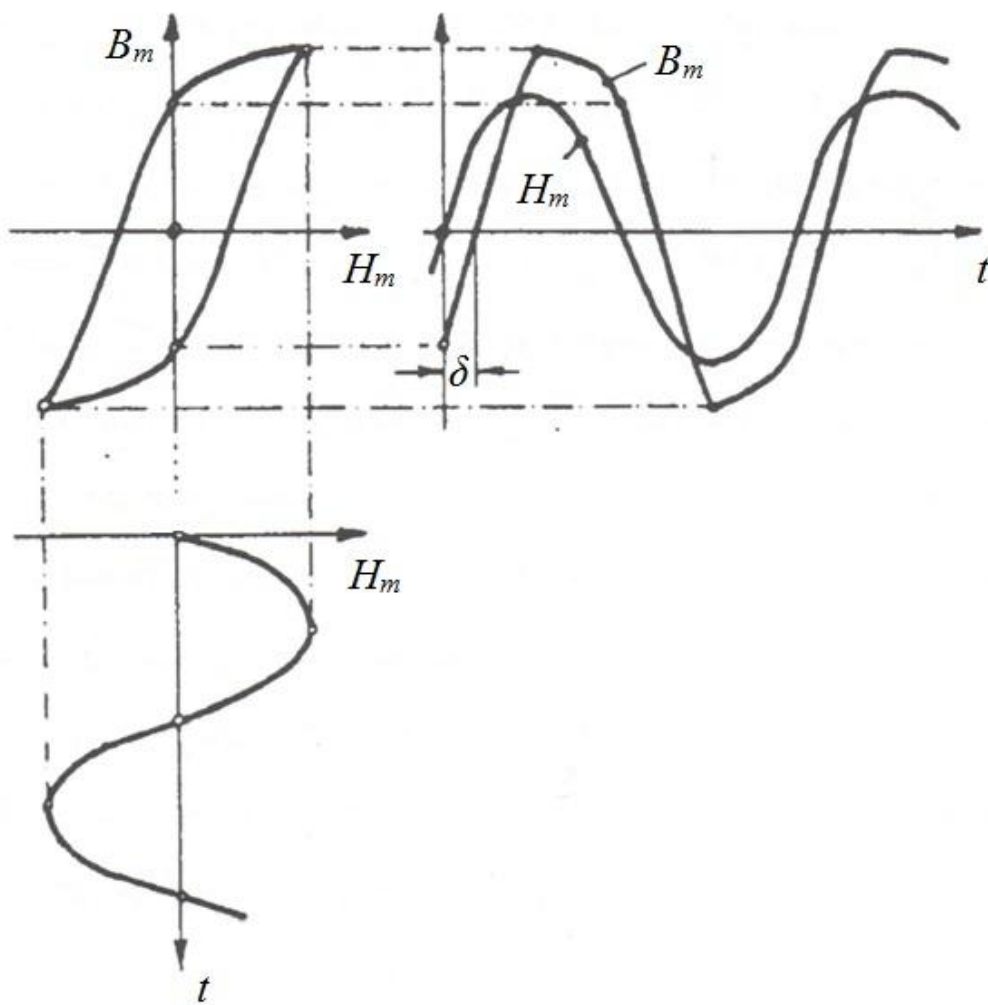
بعنوان مثال برای Alnico این مقدار  $50 \text{ kA/m}$  است. به این علت به این مواد در مقایسه با آهن نرم و مواد مغناطیسی سخت، مواد هیستریزیس یا آهن متوسط (ماده با خاصیت مغناطیسی خوب) گفته می شود. پارامتر مزبور (نیروی ضد محرکه مخالف) در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- یک حلقه هیستریزیس نمونه

میدان گردان ناشی از استاتور که با سرعت سنکرون می چرخد درون ماده آهن متوسط (که روی سطح خارجی رتور قرار دارد) تولید میدان با شدت  $H_m$  می کند که می توان توزیع آن را سینوسی فرض کرد. با داشتن منحنی تغییرات زمانی شدت میدان مغناطیسی درون ماده هیستریزیس به کمک حلقه هیستریزیس  $(B_m - H_m)$  ، می توان تغییرات زمانی چگالی شار در آهن متوسط را مطابق شکل زیر به دست آورد. شکل ۴-۹ تأیید می کند که به خاطر پدیده هیستریزیس (پسماند) میدان رتور نهایتاً به اندازه زاویه  $\delta$  (که به زاویه هیستریزیس معروف است) از میدان استاتور عقب تر است. این مسئله در برش عرضی موتور نشان داده شده در شکل ۴-۷ نیز مشاهده می شود.





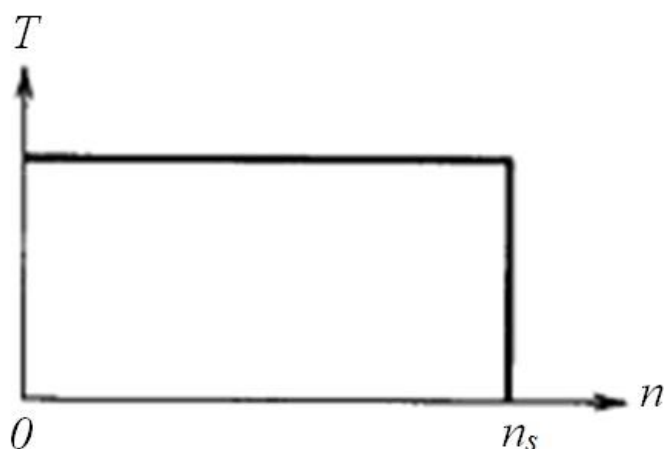
شکل ۴-۹- چگونگی ایجاد اختلاف فاز بین میدان‌ها

وجود همین اختلاف فاز بین دو میدان مربوط به استاتور  $B_S$  و رتور  $B_R$ ، باعث تولید گشتاور ثابت تا سرعت سنکرون می‌شود:

$$T_h = K B_S B_R \sin \delta$$

زاویه  $\delta$  به حلقه هیستریزیس بستگی دارد (نه فرکانس) و تا سرعت سنکرون مقدار آن ثابت است و در نتیجه گشتاور در این بازه سرعت مطابق شکل ۴-۱۰ ثابت می‌ماند. در یک بیان دقیقتر، گشتاور تا سرعت سنکرون از دو بخش تشکیل شده است: یکی گشتاور هیستریزیس که در بالا اشاره شده و یکی گشتاور ناشی از جریان‌های گردابی القایی در رتور. همانطور که از شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، نوع اول گشتاور یعنی

گشتاور هیستریزیسی همواره وجود دارد (از لحظه راه‌اندازی تا خود سرعت سنکرون). در سرعت سنکرون، سرعت نسبی بین رتور و میدان استاتور صفر است و در نتیجه هیچ جریان گردابی در رتور القاء نمی‌شود. بنابراین، نوع دوم گشتاور (گشتاور فوکو) از لحظه راه‌اندازی تا قبل از سرعت سنکرون ایجاد می‌شود. لازم به توضیح است که سیکل هیستریزیس تحت فرکانس لغزش در رتور تا سرعت سنکرون تکرار می‌شود. مشخصه گشتاور ثابت برای یک بازه گسترده سرعت از ویژگی‌های بارز این گونه موتورهاست.

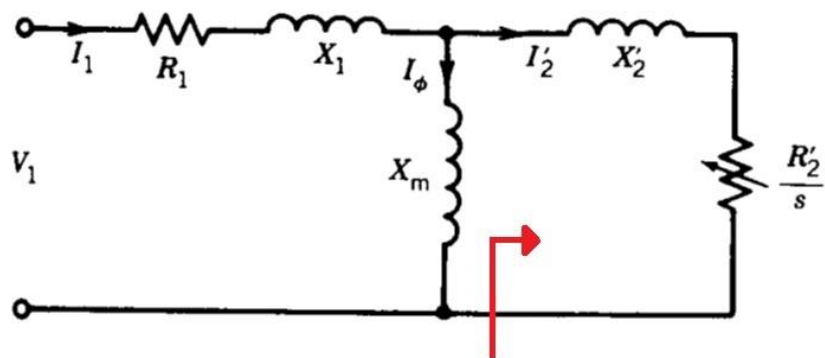


شکل ۴-۱۰- مشخصه گشتاور-سرعت موتور هیستریزیس

بحث تولید گشتاور از یک دیدگاه دیگر:

در موتور القایی سه فاز که مدار معادل آن در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است، رتور معادل یک مقاومت در نظر گرفته می‌شود که از توان تلف‌شده در آن (تلفات اهمی رتور) می‌توان گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی را بدست آورد:

$$T = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{R'_2 I_2'^2}{s \omega_s} = \frac{P_{cu,rotor}}{s \omega_s}$$



$P_{ag}$  : توان عبوری از فاصله هوایی

شکل ۴-۱۱- مدار معادل موتور القایی سه فاز

با الهام گرفتن از رابطه فوق و به طریق مشابه، می توان در موتور هیستریزیس چنین فرض کرد که گشتاور تولیدی دارای دو مؤلفه یکی در اثر جریان گردابی و دیگری به خاطر افت هیستریزیس است.

از رابطه مرسوم اشتین متز در محاسبه تلفات هسته داریم:

$$P_c = P_e + P_h = K_e f^2 B^2 + K_h f B^2$$

که در آن  $K_e$  و  $K_h$  ثوابت اشتین متز هستند. ترم مربوط به تلفات جریان گردابی را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P_e = K_e f_2^2 B^2 = K_e s^2 f_1^2 B^2$$

(فرکانس استاتور)  $f_2 = s f_1$  : فرکانس جریان گردابی

بنابراین:

$$T_e = \frac{P_e}{s \omega_s} = K s \quad , \quad K = \frac{K_e f_1^2 B^2}{\omega_s} = \text{Const}$$

↑  
سرعت سنکرون

در مورد تلفات هیستریزیس در رتور هنگام چرخش داریم:

$$P_h = K_h f_2 B^2 = K_h s f_1 B^2$$

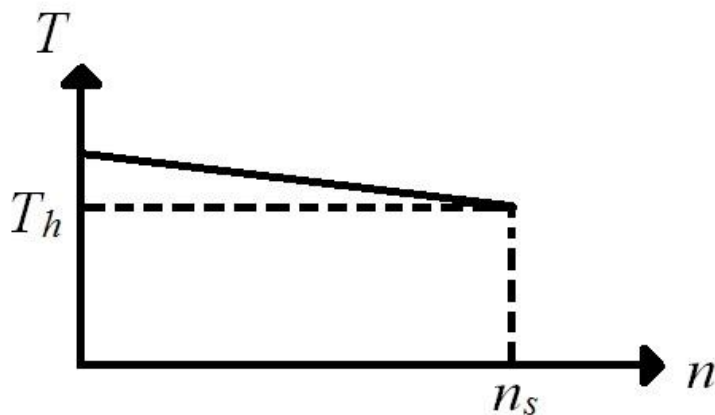
و در نتیجه:

$$T_h = \frac{P_h}{S \omega_s} = K' \quad , \quad K' = \frac{K_h f_1 B^2}{\omega_s} = \text{Const}$$

بنابراین در واقعیت علاوه بر مؤلفه گشتاور هیستریزیس ( $T_h$ ) ، مؤلفه دیگری از گشتاور نیز داریم ( $T_e$ ) که تا قبل از سرعت سنکرون وجود دارد. همانطور که در بالا اشاره شد، در سرعت سنکرون رتور هم سرعت با میدان گردان می شود و القاء جریان نداریم. ( $T_e = 0$ )

به عبارت دیگر  $T_e$  در اثر تلف فوکو متناسب با لغزش است و در سرعت سنکرون ( $S = 0$ ) مقدارش صفر است. این مؤلفه در راه اندازی موتور نقش دارد.

اما  $T_h$  در تمام سرعت ها ثابت می ماند و تنها گشتاور موتور در سرعت سنکرون است. از نظر فیزیکی گشتاور هیستریزیس باعث می شود که محور مغناطیسی رتور عقب تر از محور مغناطیسی استاتور باشد. مشخصه گشتاور-سرعت واقعی موتور هیستریزیس در شکل ۴-۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۲- منحنی گشتاور-سرعت واقعی موتور هیستریزیس

چند نکته مهم اضافی در مورد موتور هیستریزیس:

✓ اگر بخواهیم قدرت موتور را افزایش دهیم بایستی حجم ماده مغناطیسی را بیشتر کنیم. اما این کار باعث می‌شود وزن رتور افزایش یابد، پس اینرسی زیاد می‌شود  $\Leftarrow$  با گشتاور راه انداز کم نمی‌تواند راه اندازی شود. اگر بخواهیم اینرسی کم شود (سریع راه اندازی شود و سریع بیاستد) از آلومینیوم به جای آهن نرم استفاده می‌کنیم.

✓ ماده مغناطیسی ضریب نفوذپذیری کمتری نسبت به آهن نرم دارد. بنابراین مثل فاصله هوایی عمل می‌کند و جریان مغناطیس‌کنندگی زیاد می‌شود ( $Ni = R\phi$ ). در نتیجه  $\cos \phi$  کاهش می‌یابد و راندمان پایین می‌آید.

✓ کاربرد این موتور در جایی است که نوسان و لغزش نداریم و سرعت دقیق نیاز داریم (سیستم‌های کنترل موشک و هواپیما).

✓ توان این گونه موتورها بسیار پایین است، در حدود  $200\text{ W}$ . از طرف دیگر سرعت آن‌ها بسیار زیاد است حدود  $6000\text{ rpm}$

$\Leftarrow$  گشتاور تولیدی آن‌ها در سرعت سنکرون خیلی کم است حدود  $0.2\text{ Nm}$

✓ معمولاً گشتاور بار برابر گشتاور نامی تولیدی موتور در سرعت سنکرون انتخاب می‌شود تا موتور که یک موتور سنکرون است به صورت نرمال به عملکرد خود ادامه دهد. اگر گشتاور بار کمتر از گشتاور ماکزیمم تولیدی در سرعت سنکرون بود  $\delta$  کاهش می‌یابد (با کوچک شدن حلقه) و نتیجتاً گشتاور تولیدی موتور کاسته می‌شود. کاهش  $\delta$  به این علت است که رتور دور می‌گیرد و زاویه بین میدان‌های رتور و استاتور کم می‌شود.

✓ ضخامت آهن متوسط خیلی کم است (در حدود چند میلیمتر) در صورتی که این ضخامت افزایش یابد گشتاور تولیدی می تواند افزایش یابد. اما این افزایش تا یک حدی است. بعد از آن به خاطر پدیده های فیزیکی خاصی با بیشتر شدن ضخامت، گشتاور تولیدی کاهش می یابد.

✓ ماده آهن متوسط نمی تواند با آهن ربای دائم جایگزین شود. در موتورهای مغناطیس دائم که در ساختمان رتور مغناطیس دائم وجود دارد (Permanent Magnet (PM) Motors)، مشکل راه اندازی داریم. به عبارت دیگر موتورهای مغناطیس دائم گشتاور راه انداز ندارند. در این موتورها، مغناطیس دائم باعث شکل گرفتن میدان رتور می گردد در حالی که در موتور هیستریزیس میدان رتور نشأت گرفته از میدان استاتور است. در مورد میدان القاء شده درون آهن متوسط یک موتور هیستریزیس ( $B_r$ )، چون منشأ آن میدان گردان استاتور است (با در نظر گرفتن حلقه هیستریزیس) به اندازه زاویه  $\delta$  عقب تر از میدان استاتور ( $B_s$ ) می گردد و این زاویه تا سرعت سنکرون ثابت است و به حلقه بستگی دارد. بر خلاف رتور آهنربای دائم، رتور هیستریزیس خاصیت مغناطیسی خود را پس از روشن شدن موتور از استاتور کسب می کند. بنابراین دقت شود در موتورهای PM زاویه  $\delta$  ای که برای موتورهای هیستریزیس مطرح است، دیگر مفهومی ندارد.

✓ مسئله تولید گشتاور به خاطر پدیده هیستریزیس ( $T_h$ ) را می توان از یک دیدگاه بسیار ساده نیز بررسی کرد. به خاطر وجود میدان گردان استاتور، پدیده هیستریزیس در هسته رتور اتفاق می افتد. رتور به منظور جذب انرژی مورد نیاز برای طی حلقه ی هیستریزیس، در صدد ترمز کردن میدان گردان می گردد. به عبارت دیگر از طرف رتور گشتاور به میدان گردان در خلاف جهت چرخش اعمال می شود. عکس العمل همین گشتاور بر خود رتور وارد می شود و نهایتاً گشتاور روی رتور ظاهر می شود در جهت چرخش میدان. هرچه انرژی جذب شده بیشتر باشد (حلقه پهن تر) گشتاور تولیدی بزرگ تر است.

## فصل پنجم:

### سروموتورها و سنکروها (سلزین‌ها)

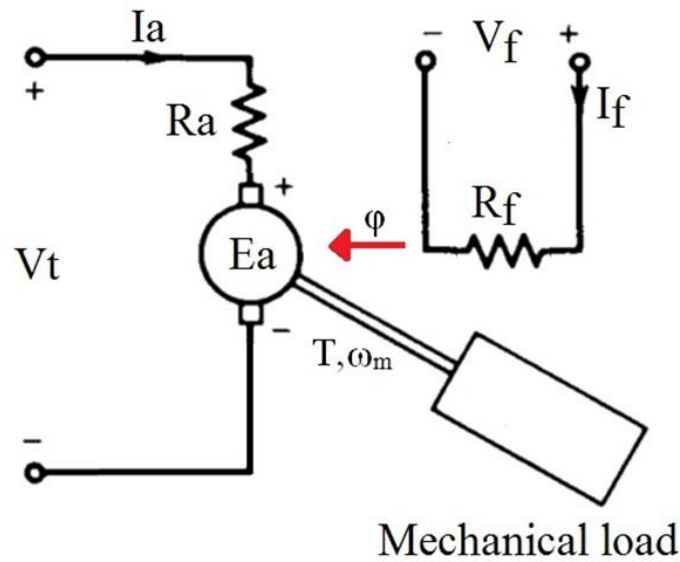
#### ۵-۱- سروموتورها (Servomotor)

مقدمه:

- ✓ کاربرد موتورهاى كنترلى در سيستم هاى كنترل فيدبك (رادار، ماشين افزار، . . .)
- ✓ توان اسمى بين چند ده وات تا چند صد وات
- ✓ پاسخ سرعت زياد  $\Leftarrow$  اينرسى كم (قطر كم طول زياد)
- ✓ سرو موتور DC
- ✓ سرو موتور AC

#### ۵-۱-۱- سرو موتور DC

موتور DC تحريك جداگانه:



شکل ۵-۱- موتور DC تحریک جداگانه

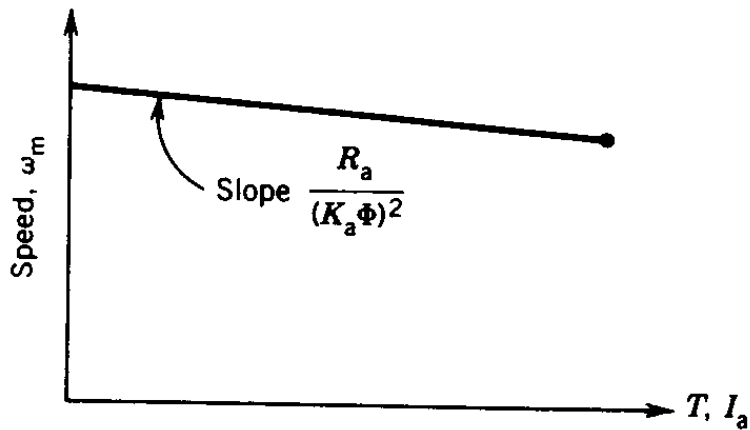
$$E_a = K_a \phi \omega_m = V_t - R_a I_a \quad \Rightarrow \quad \omega_m = \frac{V_t - R_a I_a}{K_a \phi}$$

$$T = K_a \phi I_a$$

$$\Rightarrow \quad \omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a}{(K_a \phi)^2} T$$

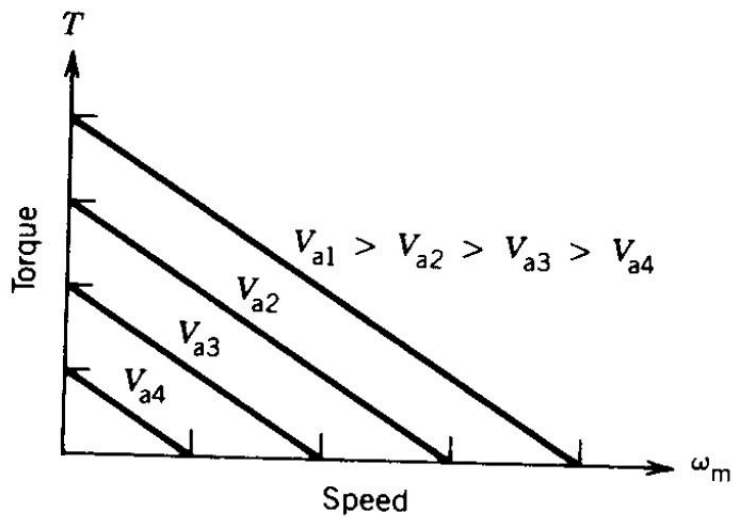
مشخصه گشتاور-سرعت موتور DC تحریک مستقل که برای کاربرد تبدیل انرژی استفاده شود (بحث ماشین ۱)، در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود شیب کاهش سرعت کوچک است.





شکل ۲-۵- مشخصه گشتاور-سرعت در موتور DC تحریک مستقل

در سرو موتورهای DC مقدار  $R_a$  بسیار بزرگ انتخاب می شود  $\Leftarrow$  شیب منفی مشخصه بزرگ می شود. در شکل ۳-۵ مشخصه های مختلف یک سروموتور DC که با روش کنترل توسط ولتاژ آرمیچر بدست آمده اند، مشاهده می شود. بازه وسیع تغییرات سرعت و گشتاور در این مشخصه ها و همچنین رابطه خطی بین گشتاور و سرعت، امکان استفاده از آن به منظور کاربرد کنترلی را مهیا می سازد.



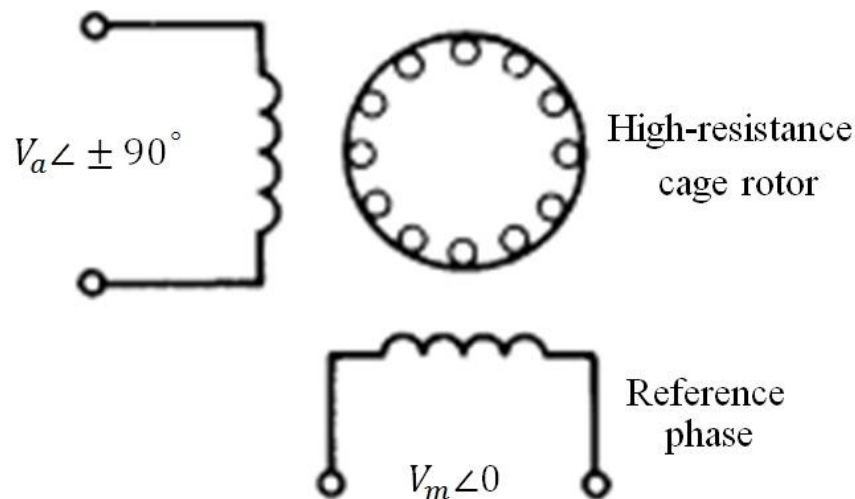
شکل ۳-۵- کنترل توسط ولتاژ آرمیچر

## ۵-۱-۲- سرو موتورهای AC

در توان های کم به جای سرو موتور DC، از سرو موتور AC استفاده می شود. سرو موتورهای AC غیرخطی اند و مشخصه گشتاور-سرعت به خوبی نیست. اکثراً موتور القایی دو فاز با رتور قفس سنجایی اند.

سیم پیچی مرجع ولتاژ ثابت ( $V_a$ ) و سیم پیچی کنترل به ولتاژ متغیر وصل می شود. ( $V_a$ )

Control phase



شکل ۵-۴- سروموتور AC دو فاز

عمدتاً ولتاژ  $V_a$  خروجی یک تقویت کننده سرو (Servo Amplifier) است.

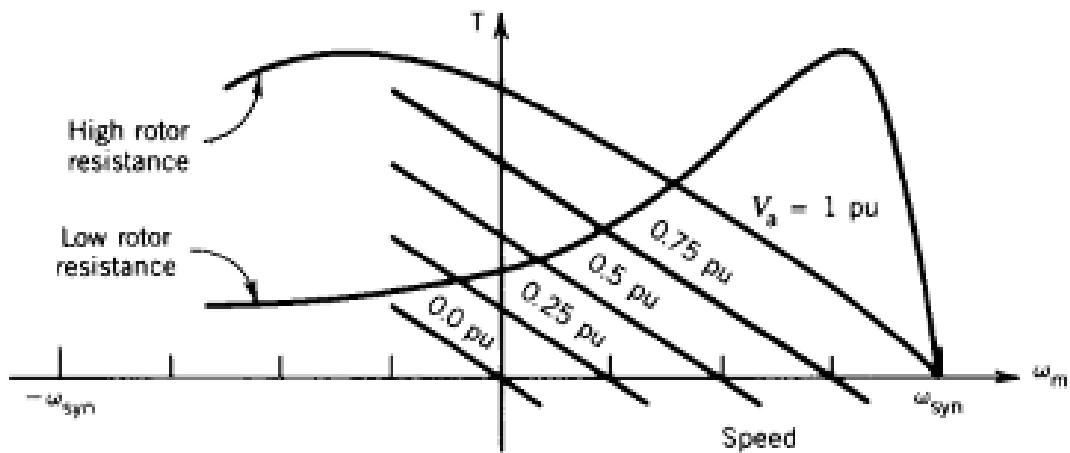
جهت چرخش موتور به اختلاف فاز  $V_m$  و  $V_a$  بستگی دارد.

وقتی مقاومت رتور کم است موتور جایگاهی در سیستم های کنترل ندارد.

زمانی که مقاومت رتور زیاد می شود، مشخصه گشتاور-سرعت همانطور که در شکل ۵-۵ مشاهده می شود

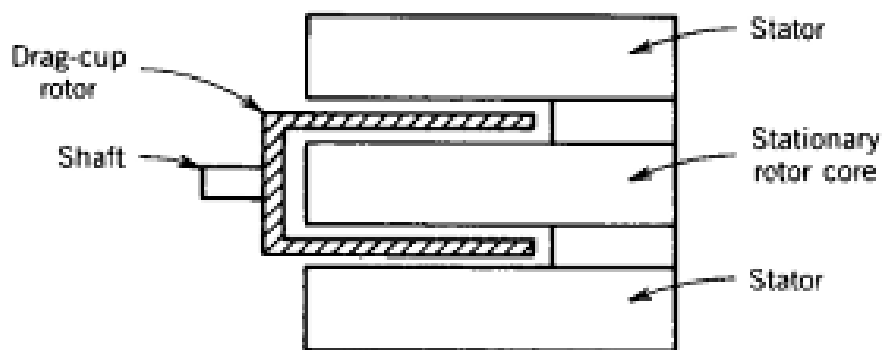
در محدوده وسیعی از تغییرات سرعت خطی است و موتور می تواند به منظور کنترلی مورد استفاده قرار گیرد.

در این حالت با تغییر  $V_a$  مشخصه های خطی مختلفی قابل حصول است.



شکل ۵-۵- مشخصه گشتاور-سرعت سرو موتور AC

مطابق شکل ۵-۶، رتور در کاربرد توان پائین رتور به گونه ای طراحی می شود که اینرسی کم داشته باشد.



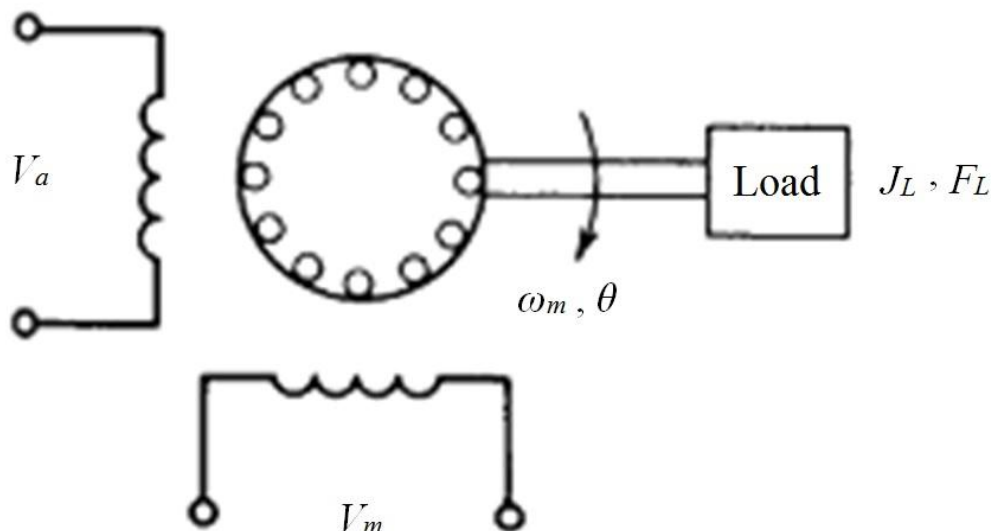
شکل ۵-۶- ساختار رتور فنجان‌جانی

در رتور فنجان‌جانی، قسمت دوار از یک هادی غیر مغناطیس‌سنجایی نازک (افزایش شدید مقاومت رتور) ساخته شده است.  
 ↓  
 گشتاور راه انداز مناسب

برای تکمیل مدار مغناطیسی، قسمت ثابت هسته آهنی رتور در وسط قسمت سنجایی قرار داده می شود.

### ۵-۱-۳- تحلیل و تابع تبدیل

در این زیربخش معادله حرکت سرو موتور AC که در شکل ۷-۵ نشان داده شده است، بدست می آید.



شکل ۷-۵- سیستم سرو با استفاده از موتور دو فاز

از مشخصه گشتاور- سرعت سروموتور نشان داده شده در شکل ۵-۵، داریم:

$$T = K_m V_a - F_m \omega_m \quad (1-5)$$

از طرف دیگر، در خروجی رابطه بین گشتاور و سرعت به صورت معادله زیر است:

$$T = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m}{dt} + F_L \omega_m \quad (2-5)$$

که در آن  $J_m$  و  $J_L$  به ترتیب اینرسی (لختی) مربوط به موتور و بار است و  $F_L$  ضریب اصطکاک بار است.

از روابط (۱-۵) و (۲-۵) داریم:

$$K_m V_a - F_m \frac{d\theta}{dt} = (J_m + J_L) \frac{d^2\theta}{dt^2} + F_L \frac{d\theta}{dt}$$

$$\begin{cases} K_m V_a = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m}{dt} + (F_m + F_L) \omega_m \\ K_m V_a = (J_m + J_L) \frac{d^2\theta}{dt^2} + (F_m + F_L) \frac{d\theta}{dt} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m/F}{1 + S \zeta_m}$$

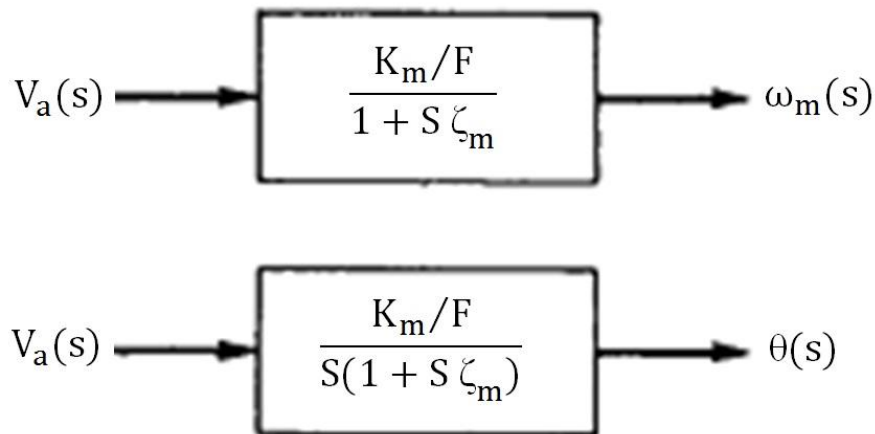
$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m/F}{S(1 + S \zeta_m)}$$

که در آن:

$$J = J_L + J_m \quad , \quad F = F_L + F_m$$

$$\zeta_m = \frac{J}{F} \text{ : ثابت زمانی مکانیکی سیستم}$$

توابع تبدیل به صورت شکل ۸-۵ می باشند.



شکل ۸-۵- توابع تبدیل

پاسخ زمانی برای تغییرات پله‌ای ولتاژ ( $V_a$ ) در سیستم کنترل حلقه باز:

برای افزایش پله ای ولتاژ  $V_a$  داریم:

$$V_a(s) = \frac{V}{s}$$

$$\omega_m(s) = \frac{K_m/F}{1 + s \zeta_m} \frac{V}{s} = \frac{K_m V}{F} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\zeta_m}} \right)$$

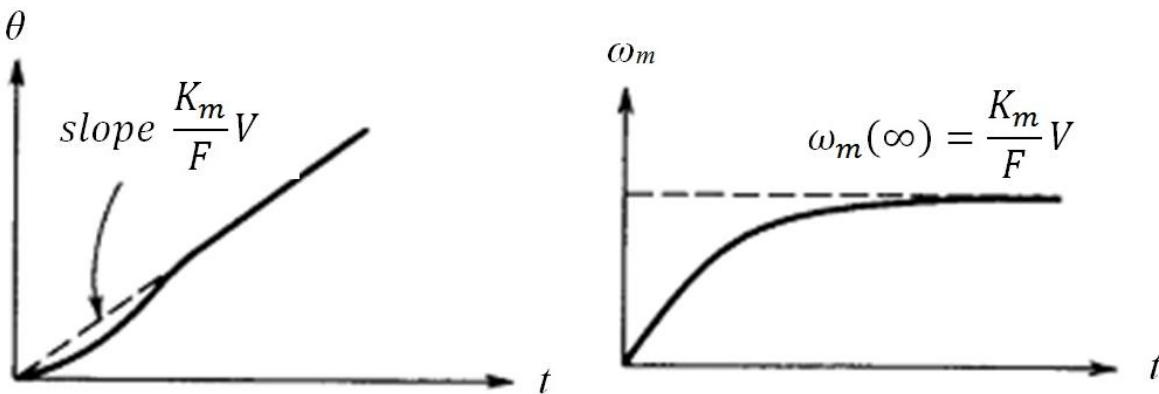
$$\Rightarrow \omega_m(t) = \frac{K_m V}{F} (1 - e^{-t/\zeta_m})$$

$$\omega_m(\infty) = \frac{K_m V}{F}$$

$$\theta(s) = \frac{K_m/F}{s(1 + s \zeta_m)} \frac{V}{s} = \frac{K_m V}{F s^2} - \frac{K_m V \zeta_m}{F s} + \frac{K_m V \zeta_m}{F (s + \frac{1}{\zeta_m})}$$

$$\Rightarrow \theta(t) = \frac{K_m V}{F} t - \frac{K_m V \zeta_m}{F} + \frac{K_m V \zeta_m}{F} e^{-t/\zeta_m}$$

پاسخ سرعت و وضعیت برای تغییرات پله در شکل ۹-۵ نمایش داده شده اند.

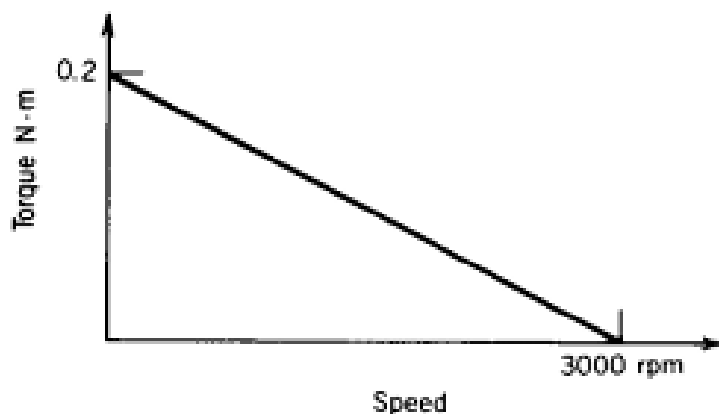


(ب)

(الف)

شکل ۹-۵- پاسخ زمانی به تغییرات پله: (الف) سرعت، (ب) وضعیت

مثال ۵-۱- در موتوری دو فاز AC مشخصه گشتاور- سرعت تحت ولتاژ  $V_a = 115^V$  و  $f = 50^{Hz}$  مطابق شکل زیر است:



شکل ۵-۱۰- مشخصه گشتاور-سرعت مثال ۵-۱

برای این موتور داریم:

$$J = J_L + J_m = 0.00001 \text{ Kg. m}^2$$

$$F_L = \text{ناچیز}$$

الف. تابع تبدیل  $\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = ?$

$$K_m = \frac{T}{V_a} \Big|_{\omega_m = \text{const}} = \frac{0.2}{115} \Big|_{\omega_m = 0} = 0.00174 \text{ N.m/V}$$

$$F_m = \frac{T}{\omega_m} \Big|_{V_a = \text{const}} = \frac{0.2}{3000 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.0006366 \text{ N.m/rad/Sec}$$

$$F = F_m + F_L = F_m + 0 = F_m$$

$$J = 10^{-5} \text{ Kg. m}^2$$

$$\zeta_m = \frac{J}{F} = \frac{10^{-5}}{0.0006366} = 15.71 \times 10^{-3} \text{ Sec}$$

$$\frac{K_m}{F} = \frac{0.00174}{0.0006366} = 2.733$$

ثابت کردیم:

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m/F}{S(1 + S\zeta_m)} = \frac{2.733}{S(1 + 0.01571S)}$$

ب: اگر ولتاژ به صورت پله ای  $115^V$  تغییر کند،  $\theta(t) = ?$

$$V_a(s) = \frac{115}{S}$$

$$\frac{K_m V}{F} = 2.733 \times 115 = 314.3$$

$$\frac{K_m V}{F} \zeta_m = 314.3 \times 0.01571S = 4.94$$

ثابت کردیم:

$$\theta(t) = \frac{K_m V}{F} t - \frac{K_m V \zeta_m}{F} + \frac{K_m V \zeta_m}{F} e^{-t/\zeta_m}$$

$$\Rightarrow \theta(t) = 314.3 t - 4.94 + 4.94 e^{-t/0.01571S} \simeq 314.3 t$$

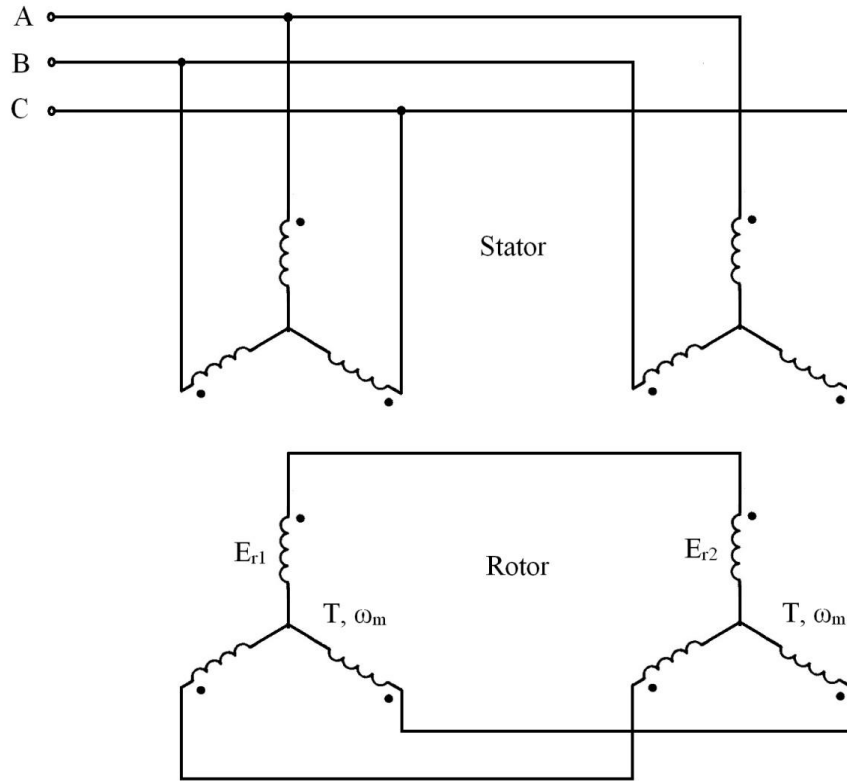
## ۵-۲- سلزین‌ها (Selsyn) و سنکروها (Synchro)

- ✓ موتورهای کنترلی قابل استفاده برای کنترل زاویه و سرعت
- ✓ سلزین‌ها ساختمانی مشابه موتور القایی سه فاز با رتور سیم‌پیچی شده دارند.
- ✓ سنکرو وسیله الکترومغناطیسی AC است که جابجایی مکانیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌سازد. معمولاً استاتور شبیه ماشین سنکرون (آسنکرون) و رتور از نوع قطب برجسته دارند. امکان تغذیه سیم پیچی رتور از طریق حلقه‌های لغزان وجود دارد.



## ۵-۲-۱- سلزین های قدرت

همانطور که در بالا اشاره شد، ساختاری مشابه موتور القایی سه فاز با رتور سیم پیچی شده دارند. با توجه به شکل ۵-۱۱، سیم پیچی های استاتور به صورت مشابه به برق سه فاز وصل می شوند.



شکل ۵-۱۱- مدارهای مربوط به سلزین قدرت به منظور کنترل سرعت

ولتاژهای القاء شده در سیم پیچی رتور عبارتند از:

$$\begin{cases} E_{r1} = 4.44 S_1 f \phi_m N_r \\ E_{r2} = 4.44 S_2 f \phi_m N_r \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_{r1} \times S_1 \\ E_{r2} \times S_2 \end{cases}$$

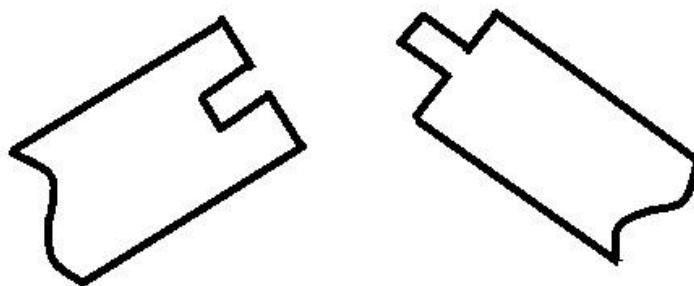
$$\text{if } \omega_{m1} > \omega_{m2} \rightarrow S_1 < S_2 \rightarrow E_{r1} < E_{r2}$$

بنابراین جریانی از  $E_{r2}$  به سمت  $E_{r1}$  می رود. این جریان باعث ایجاد گشتاور و سنکرون کردن دو موتور

می شود. (سرعت ها یکی می شود)

به عبارت دیگر، جریان ایجاد شده طبق قانون لنز با عامل به وجود آورنده خود (اختلاف سرعت ها) مخالفت می کند. وقتی  $\omega_{m1} = \omega_{m2} \Leftarrow$  جریان صفر می شود.

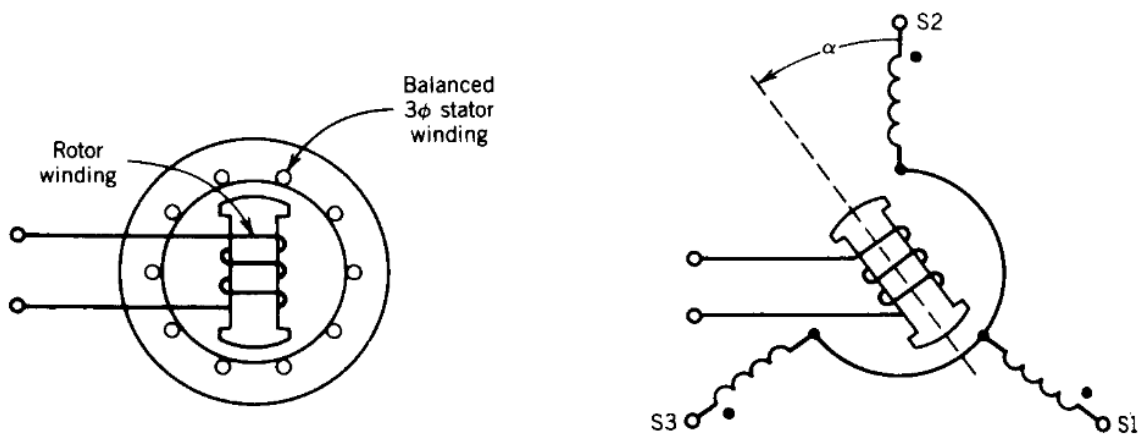
به عنوان نمونه این سیستم در پل های متحرک مطابق شکل ۵-۱۲ می تواند استفاده شود. از کاربردهای دیگر می توان به استفاده از آن در نوار نقاله های بزرگ، صنایع کاغذسازی و نخ ریزی اشاره نمود.



شکل ۵-۱۲- ساختار پایه ای یک پل متحرک

### ۵-۲-۲- روابط ولتاژ

می خواهیم ببینیم چگونه ولتاژ استاتور با تغییر مکان رتور عوض می شود.



شکل ۵-۱۳- ساختار سنکرو کنترلی

در صورتیکه در شکل ۵-۱۳، ولتاژ  $e_r = \sqrt{2} E_r \sin \omega t$  به سیم پیچی رتور اعمال شده باشد، ولتاژهای القایی در سیم پیچی های سه فاز استاتور عبارتند از:

$$\begin{cases} e_{1n} = \sqrt{2} a E_r \sin \omega t \cos (\alpha + 120^\circ) \\ e_{2n} = \sqrt{2} a E_r \sin \omega t \cos \alpha \\ e_{3n} = \sqrt{2} a E_r \sin \omega t \cos (\alpha - 120^\circ) \end{cases}$$

$$a = \frac{N_s}{N_r} \text{ که در آن}$$

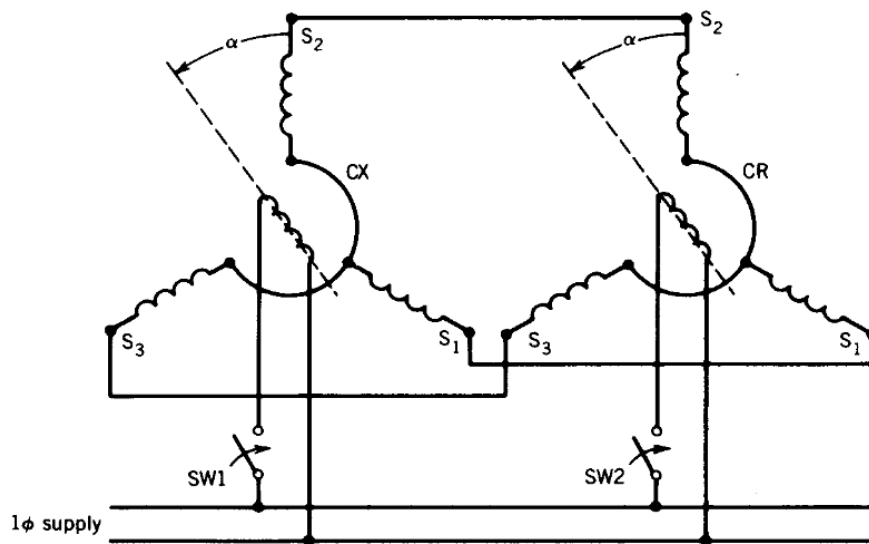
مقدار مؤثر (rms) ولتاژها:

$$\begin{cases} E_{1n} = a E_r \cos (\alpha + 120^\circ) \\ E_{2n} = a E_r \cos \alpha \\ E_{3n} = a E_r \cos (\alpha - 120^\circ) \end{cases}$$

### ۵-۲-۳- کاربردهایی از سنکروها

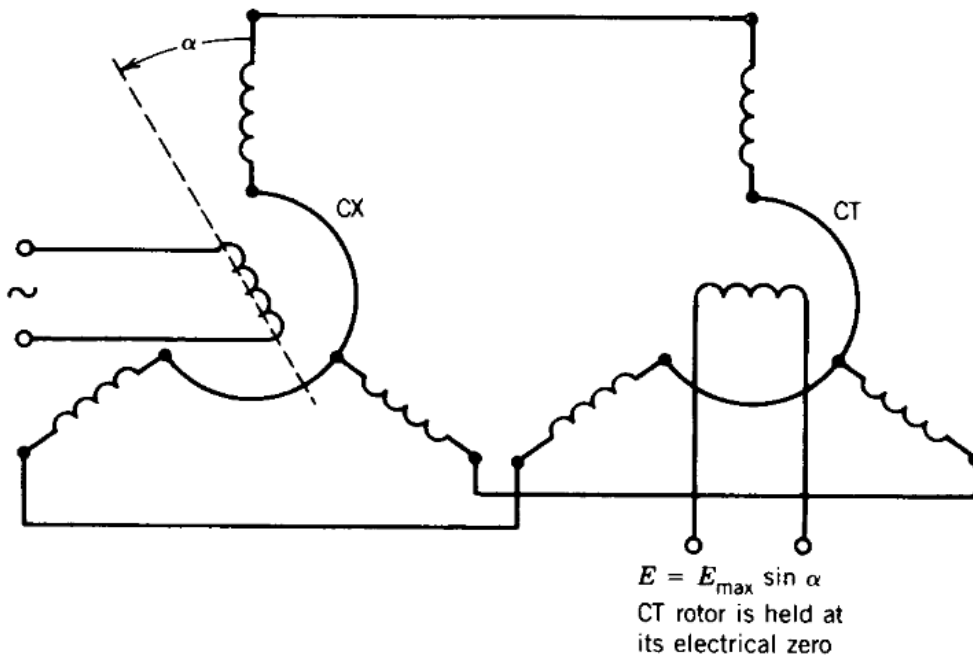
همانطور که در شکل ۵-۱۴ نمایش داده شده است، سنکروها می توانند برای همسوسازی دو محور مورد استفاده قرار گیرد. فرض کنید در این شکل کلید SW1 بسته شود و رتور سنکرو فرستنده (رتور سمت چپ) به میزان زاویه  $\alpha$  جابجا شود. در این صورت در استاتور سنکرو فرستنده ولتاژ القاء می شود و در نتیجه در سیم پیچی های سنکرو گیرنده (ساختار نشان داده شده در سمت راست شکل) ، جریان برقرار می شود. در این حالت اگر رتور سنکرو گیرنده برقرار شود (کلید SW2 بسته شود)، در اثر تداخل میدان رتور و میدان استاتور در سنکرو گیرنده گشتاور پدید می آید. این گشتاور رتور سنکرو گیرنده را به چرخش در می آورد و به وضعیت مشابه رتور در سنکرو فرستنده می برد. مادامی که زوایا نابرابر باشند، جریان جاری شده تولیدی گشتاوری می کند و طبق قانون لنز باعث همسوکردن محورها می شود. (کاربرد در ماهواره ها)

از یک دیدگاه دیگر می توان گفت که میدان AC ناشی از تحریک سیم پیچی رتور در سیم پیچی استاتور ولتاژ القاء می کند که مقدار آن بستگی به زاویه  $\alpha$  بین محورهای استاتور و رتور دارد (روابط ولتاژ). هنگام بسته بودن کلیدها مادامی که  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  باشد جریانی در سیم پیچی استاتور ایجاد می شود که باعث تولید گشتاور و برابری زوایا می شود (طبق قانون لنز).



شکل ۵-۱۴- استفاده از سنکروها برای همسوسازی دو محور

در صورتیکه رتور سنکروی سمت چپ در شکل ۵-۱۵ به اندازه زاویه  $\alpha$  جابجایی داشته باشد، از آنجائیکه محورهای صفر الکتریکی دو سنکرو ۹۰ درجه با یکدیگر زاویه دارند، در رتور سنکرو سمت راست ولتاژی به اندازه  $E_{S1} = E_{\max} \sin \alpha$  القا می شود.



شکل ۵-۱۵- پیکربندی سنکرو برای تشخیص خطا

به صورت مشابه در صورتیکه زوایای دو سنکرو در شکل ۵-۱۶ به ترتیب  $\alpha_T$  و  $\alpha_x$  باشند، مقدار ولتاژ القایی در رتور سنکرو شماره ۲ برابر است با:

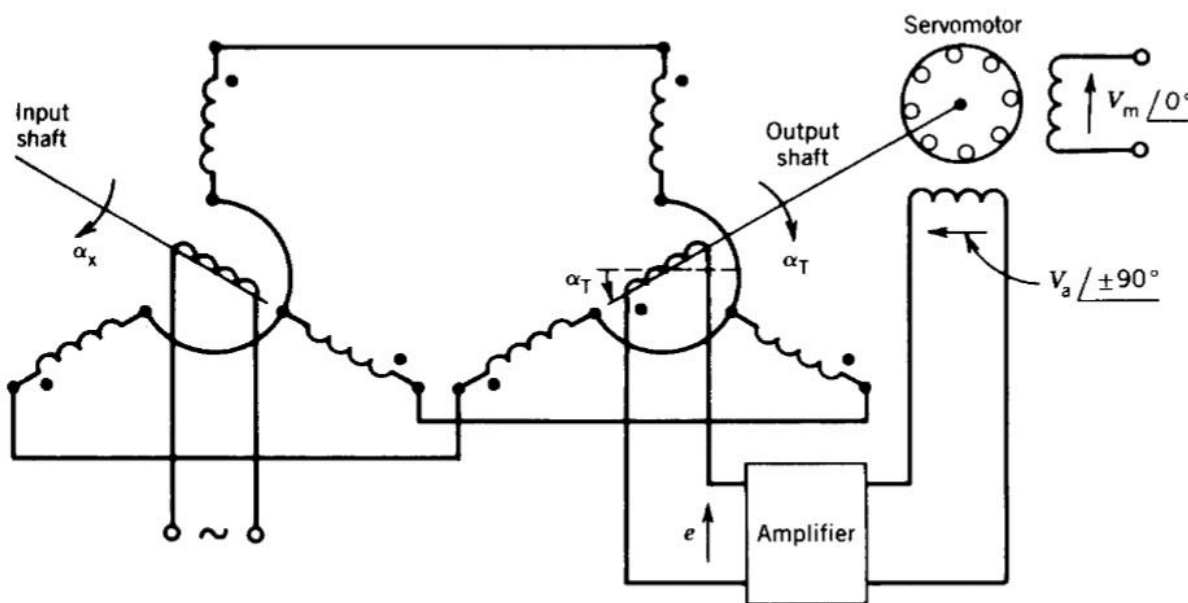
$$E_{r2} = E_{\max} \sin(\alpha_x - \alpha_T)$$

$$e_{r2} = \sqrt{2} E_{\max} \sin(\alpha_x - \alpha_T) \sin \omega t$$

مادامی که  $\alpha_x \neq \alpha_T$  باشد  $e_{r2} \neq 0$

لازم به توضیح است موقعیتهای صفر الکتریکی دو رتور در این سنکروها نیز ۹۰ درجه نسبت به هم جابجایی دارند و این به دلیل آن است که هنگام برابری زاویه ها یک ولتاژ خطای صفر موردانتظار است.

ولتاژ خطای مزبور پس از تقویت به صورت  $V_a$  باعث چرخش محور سرو موتور و در نتیجه محور سنکرو ۲ می‌گردد تا  $\alpha_x = \alpha_T$  گردد.



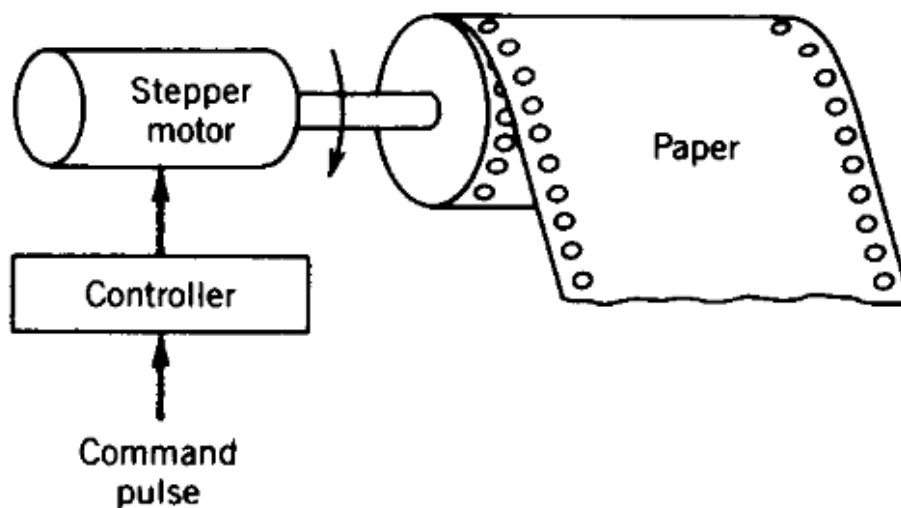
شکل ۵-۱۶- سیستم سرو با استفاده از سنکرو برای تشخیص خطا

## فصل ۶:

### موتور پله ای Stepper Motor

#### ۶-۱- مقدمه

همانطور که از شکل ۶-۱ مشاهده می شود، موتورهای پله ای موتورهای کنترلی هستند که به منظور کنترل وضعیت (چرخش بار به اندازه زاویه خاصی) در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. به عبارت دیگر، این موتورها می توانند تحت پالسهای الکتریکی ورودی چند درجه بچرخند. اندازه یک گام پله (step size) معمولاً ۲، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۵ درجه می باشد.

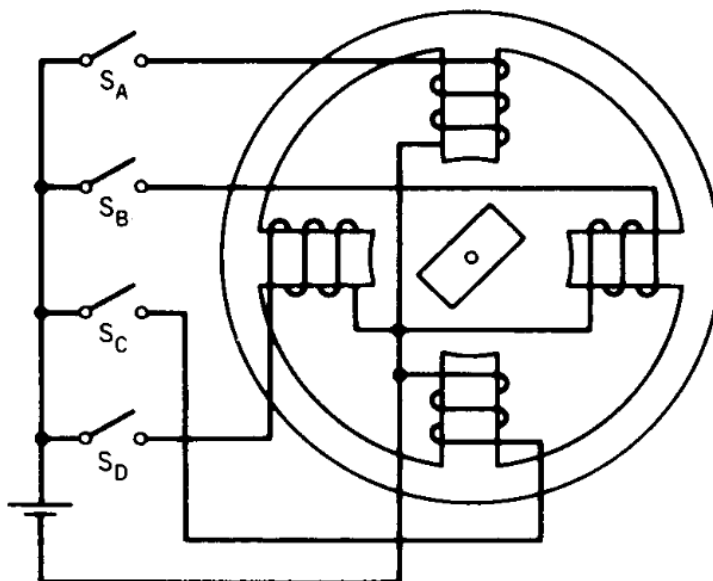


شکل ۶-۱- یک مثال برای کاربرد موتور پله ای

## ۲-۶- ساختارهای مختلف موتور پله ای

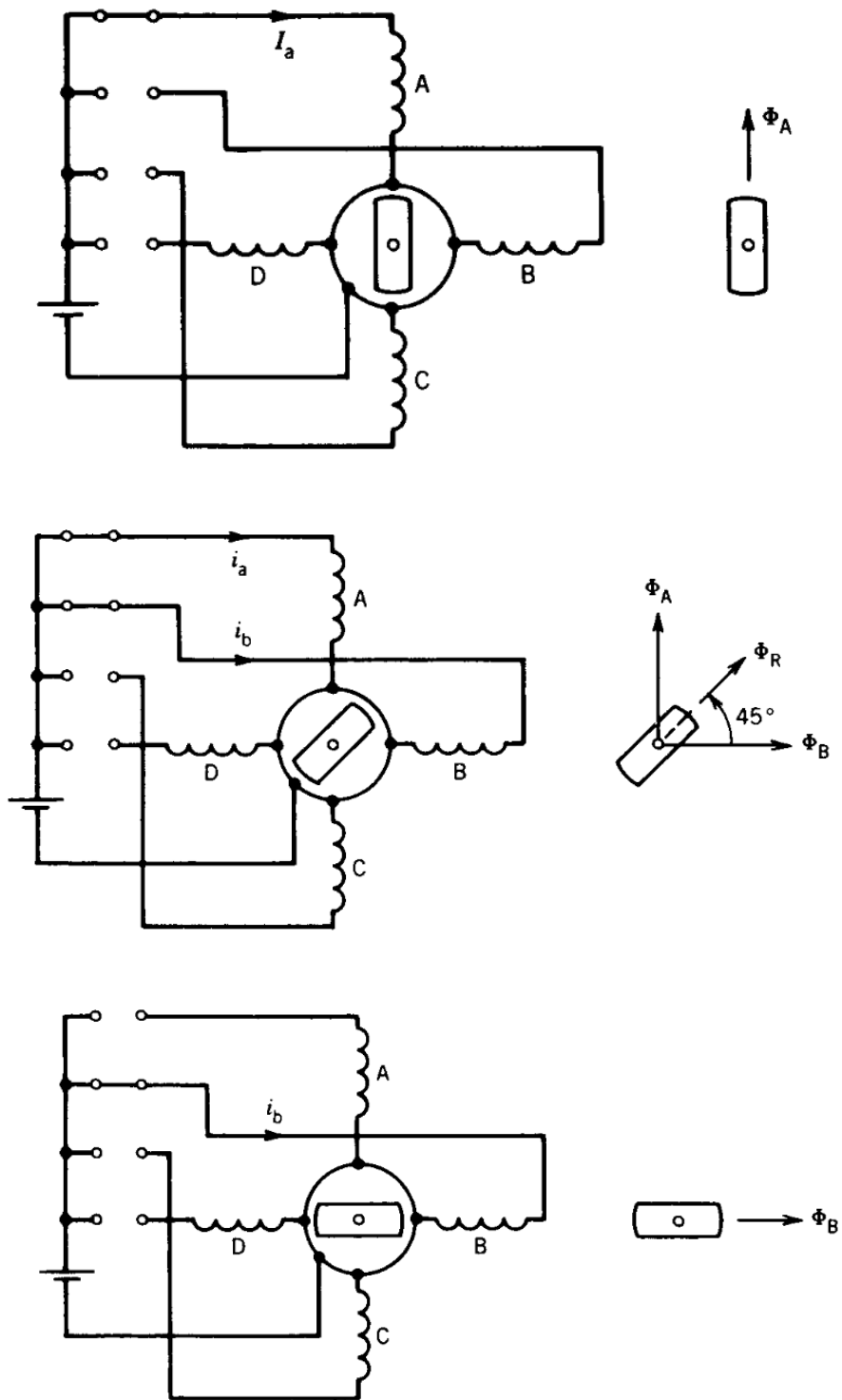
### ۱-۲-۶- ساختار یک تکه (یک لایه) یا یک پارچه (Single-Stack Stepper Motor)

برش عرضی یک موتور پله ای یک پارچه چهار فاز با دو قطب روی رتور در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- موتور پله ای دو قطبی چهار فاز

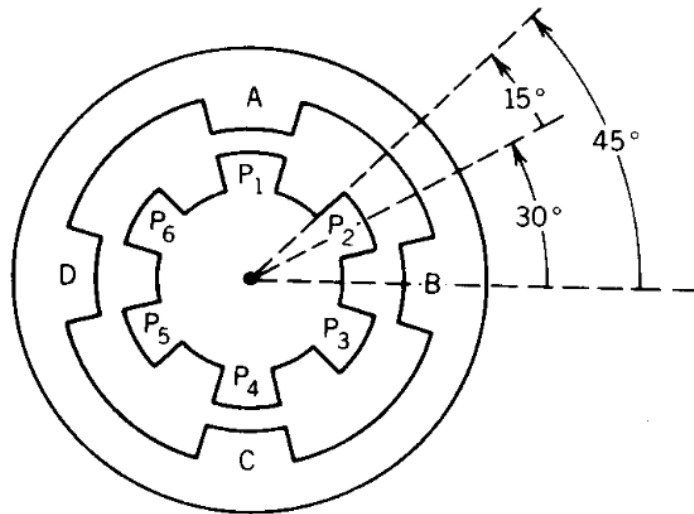
- ✓ ایجاد گشتاور رلوکتانسی در این موتورها به خاطر همسوس شدن محورهای مغناطیسی
- ✓ تحریک A, A+B, B, B+C و ... باعث چرخش در جهت عقربه های ساعت با گامهای 45°
- مطابق شکل ۳-۶ می شود.
- ✓ نحوه تحریک برای چرخش در خلاف جهت عقربه های ساعت: A, A+D, D, D+C و ...



شکل ۳-۶- حالت‌های مختلف تحریک برای گام‌های ۴۵ درجه‌ای



ساختار موتور پله ای با ۶ دندانه روی رتور در شکل ۴-۶ مشاهده می شود که با استفاده از آن امکان چرخش بار با پله های ۱۵ درجه وجود دارد.

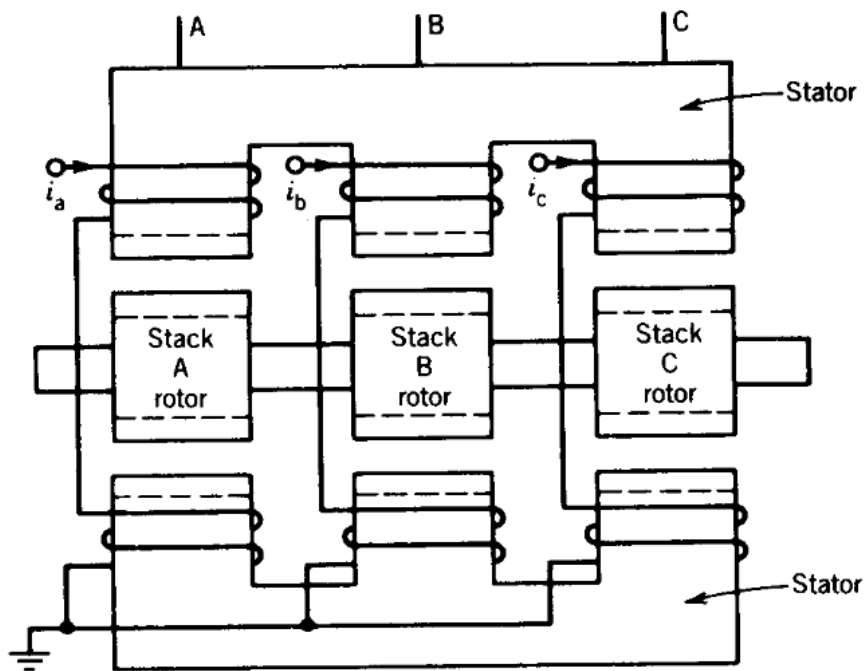


۴-۶- موتور پله ای برای داشتن گام‌های ۱۵ درجه‌ای

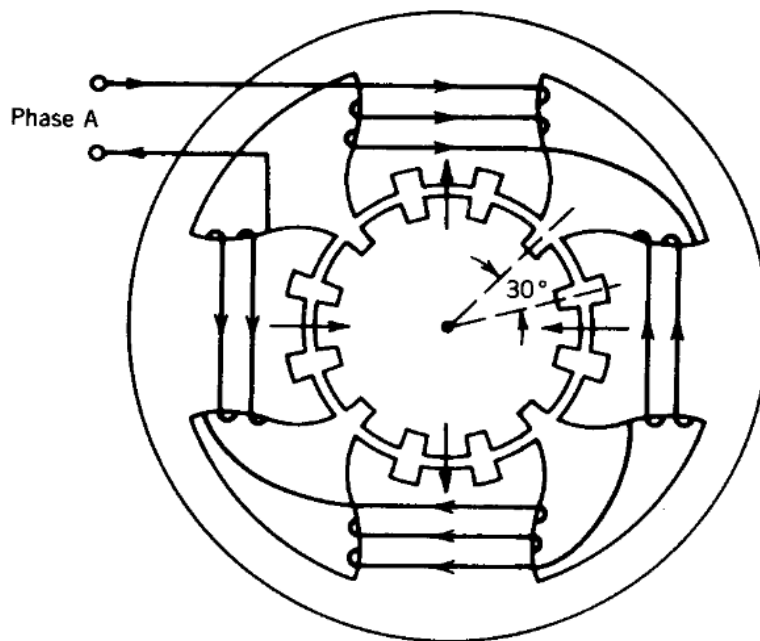
- تحریک A و B با هم ← باعث حرکت رتور در جهت خلاف عقربه های ساعت به اندازه 15 درجه
- در این لحظه اگر فاز B به تنهایی تحریک شود، رتور 15° دیگر می چرخد. دقت شود رتور قبلاً به خاطر تحریک همزمان A و B نسبت به موقعیت نشان داده شده در شکل ۴-۶ به اندازه 15° در خلاف جهت عقربه های ساعت چرخیده است. لذا امکان تحریک فاز B به تنهایی وجود دارد.
- نحوه تحریک برای چرخش در خلاف عقربه ساعت با گام‌های ۱۵ درجه: A، A+B، B و B+C و ...

### ۴-۲-۲- موتور پله ای چندتکه (چندلایه) یا چندپارچه (Multi-Stack Stepper Motor)

ساختار یک موتور پله ای سه تکه (سه لایه) در راستای محوری در شکل ۵-۶ نمایش داده شده است. هر تکه در حقیقت یک فاز موتور است و بنابراین موتور سه فاز است. برش عرضی هر لایه از روبرو در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. استاتور حاوی چهار قطب است. رتور و استاتور دارای تعداد دندانه های یکسانند.



۵-۶- ساختار موتور پله ای سه تکه (سه لایه) در راستای محوری

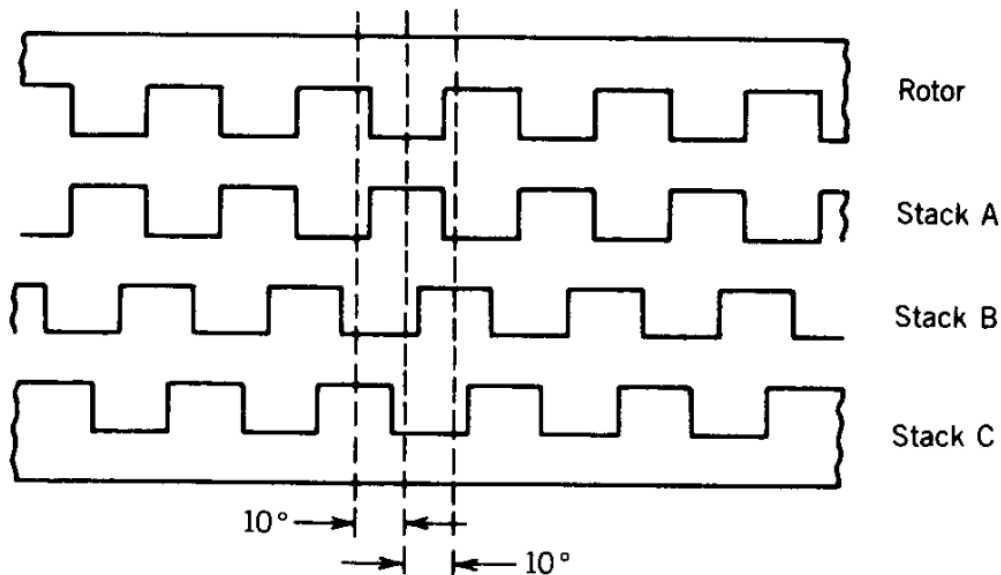


۶-۶- برش عرضی یک لایه از موتور

وقتی یک فاز در یک تکه تحریک می شود، دندانه های استاتور و رتور در آن تکه (لایه) مطابق شکل ۶-۶

همراستا می شوند.

هنگامی که فاز A تحریک شده است، وضعیت دندانه ها در سه تکه (لایه) از یک دیدگاه دیگر در شکل ۶-۷ مشاهده می شود. همانطور که از این شکل مشاهده می شود با تحریک فاز B در این لحظه رتور به سمت راست حرکت می کند (برای مثال چرخش در جهت عقربه های ساعت به اندازه گام های ۱۰ درجه) و اگر فاز C تحریک شود، حرکت رتور به سمت چپ (برای مثال چرخش در خلاف جهت عقربه های ساعت) اتفاق می افتد. همانطور که از شکل ۶-۷ نیز مشاهده می شود، دقت شود که رتور در موتور موردنظر برای همه لایه ها یکسان است و چرخش ۱۰ درجه ای بین استاتورها وجود دارد.



۶-۷- وضعیت دندانه ها در تکه های مختلف برای تحریک فاز A

همانطور که در بالا اشاره شد، اگر بعد از فاز A در موقعیت نشان داده شده در شکل ۶-۷، فاز B تحریک شود موتور به اندازه یک پله ( $10^\circ$ ) می چرخد.

$$\underbrace{A \leftarrow C \leftarrow B \leftarrow A}_{\text{حرکت به اندازه یک گام دندانه}}$$

$$\zeta_p = \frac{360}{X} \text{ : گام دندانه (Tooth pitch)}$$

X : تعداد دندانه های رتور

$$\Delta\theta = \frac{360}{XN} \text{ : اندازه پله}$$

N : تعداد تکه ها یا فازها

$$n = \frac{360}{\Delta\theta} : \text{تعداد پله در هر دور}$$

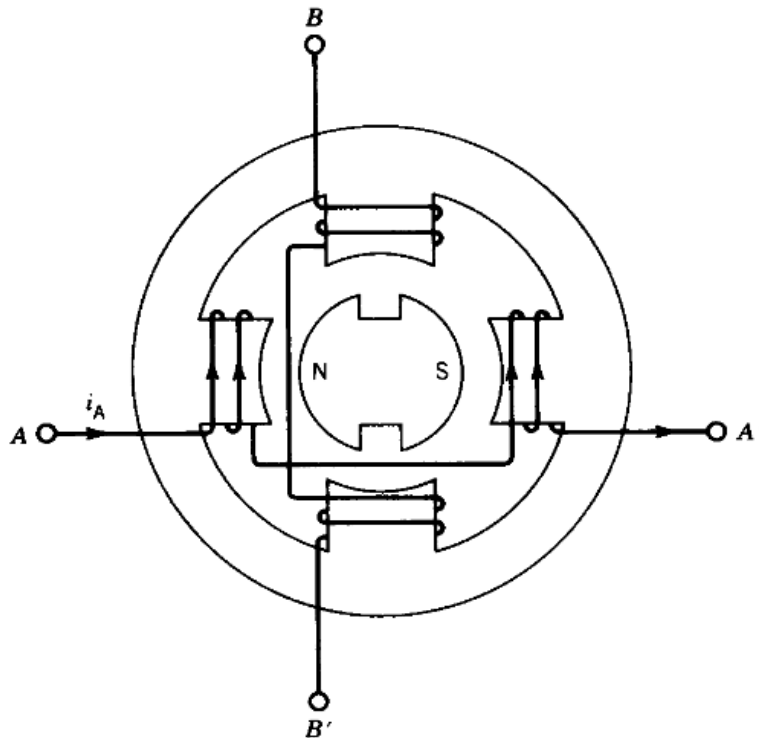
$$\zeta_p = \frac{360}{12} = 30 \text{ و } \Delta\theta = \frac{360}{12 \times 3} = 10^\circ \text{ بنابراین } N = 3 \text{ و } X = 12$$

$$n = \frac{360}{10} = 36$$

### ۶-۲-۳- موتورهای پله ای از نوع آهن ربای دائم

در این نوع موتور از آهن ربای دائم روی رتور مطابق شکل ۶-۸ استفاده می شود. موقعیت رتور بدون ابهام توسط جریان سیم پیچی ها تعیین می شود. در صورتی که در نوع مرسوم برای هر ترکیبی از جریان دو موقعیت دارای پایداری مشابه برای رتور وجود دارد.

اگر فاز B تحریک شود رتور  $90^\circ$  می چرخد. ساخت رتور با تعداد قطب های زیاد از نوع آهن ربای دائم کار مشکلی است در نتیجه گام بین  $30^\circ$  تا  $90^\circ$  است.



۶-۸- موتور پله ای مغناطیس دائم

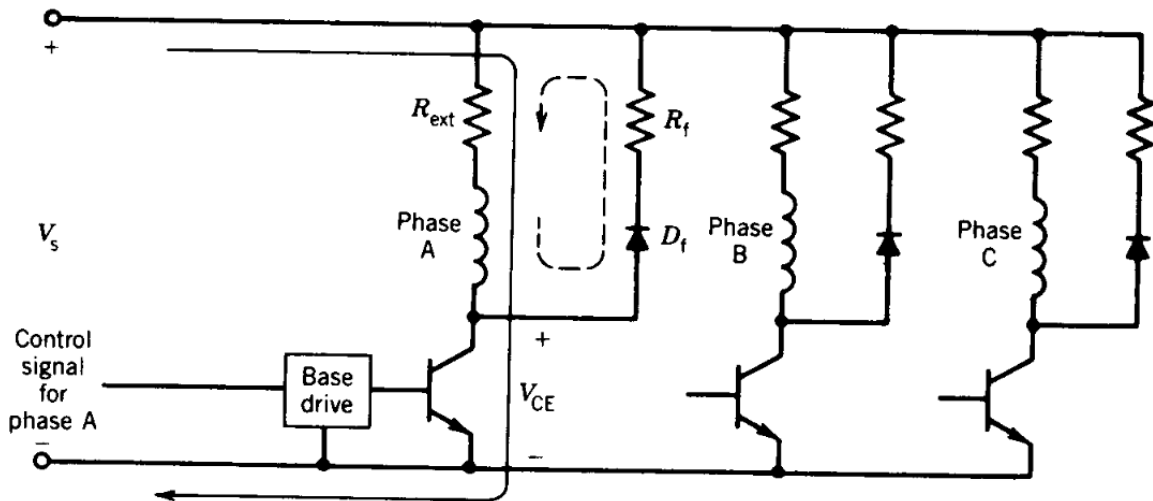
ماکزیمم گام 300 پله بر ثانیه است در حالی که برای موتورهای پله ای مرسوم 1200 پله بر ثانیه است. این نوع موتور در مقایسه با موتورهای پله ای مرسوم گشتاور بیشترین در هر آمپر جریان استاتور تولید می‌کند.

مزیت دیگر آنکه حتی در هنگام عدم حضور تحریک می تواند در موقعیت های مناسبی قرار گیرد (در بعضی کاربردها مفید است).

### ۳-۶- مدارهای محرک (درایو)

#### ۳-۶-۱- مدار محرک تک قطبی (Unipolar Drive Circuit)

مدار محرک تک قطبی برای یک موتور پله ای سه فاز در شکل ۶-۹ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود برای هر فاز یک ترانزیستور، یک دیود و دو مقاومت مورد نیاز است. برای تحریک، یک سیگنال کنترلی به پایه ترانزیستور اعمال می شود.



۶-۹- مدار محرک (درایو) تک قطبی برای موتور پله ای ۳ فاز

هنگام تحریک فاز با روشن کردن ترانزیستور داریم:

$$V_s = I(R + R_{ext})$$

R: مقاومت سیم پیچی

چون اندوکتانس سیم پیچی زیاد است، برای کاهش ثابت زمانی  $R_{ext}$  اضافه می گردد.

برای خاموش کردن، جریان بیس قطع می شود. جریان از طریق مسیر دیود هرزگرد Free Wheeling بسته می شود و انرژی در مقاومت های  $R_{ext}$  ،  $R$  و  $R_f$  تلف می شود.

مثال ۶-۱- موتور پله ای سه فاز  $R = 1\Omega$  و  $L = 30\text{mH}$  ، (جریان نامی سیم پیچی)  $I = 3\text{A}$  مفروض است. مدار محرک تک قطبی طراحی کنید که ثابت زمانی هنگام تحریک  $2\text{ms}$  و هنگام خاموش شدن  $1\text{ms}$  گردد. موتور 300 پله در ثانیه طی می کند.

$$\zeta_{on} = \frac{L}{R+R_{ext}} \Rightarrow R+R_{ext} = \frac{30}{2} = 15 \Omega$$

$$R_{ext} = 15 - 1 = 14 \Omega$$

$$V_{DC} = (R+R_{ext})I = 15 \times 3 = 45 \text{ V}$$

$$\zeta_{off} = \frac{L}{R + R_{ext} + R_f} \Rightarrow R_f = \frac{30}{1} - 15 = 15 \Omega$$

انرژی ذخیره شده در سیم پیچی به هنگام تحریک:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \times 30 \times 10^{-3} \times 9 = 0.135 \text{ J}$$

این انرژی در مقاومت های  $R_{ext}$  ،  $R_f$  و  $R$  هدر می شود.

$$R_f = R_{ext} + R = 15 \Omega$$

بنابراین انرژی هدر رفته در  $R_f$  برابر با  $0.0675 \text{ J}$  است.

$$\text{نرخ پله} = 300 \text{ Step/Sec}$$

$$100 = \text{تعداد خاموش سازی در هر فاز}$$

$$W_{R_f} = \text{متوسط توان هدر رفته در } R_f = 100 \times 0.0675 = 6.75 \text{ W}$$

ولتاژ معکوس در دو سر دیود  $D_f$  برابر  $V_s = 45 \text{ V}$  (هنگام هدایت ترانزیستور)

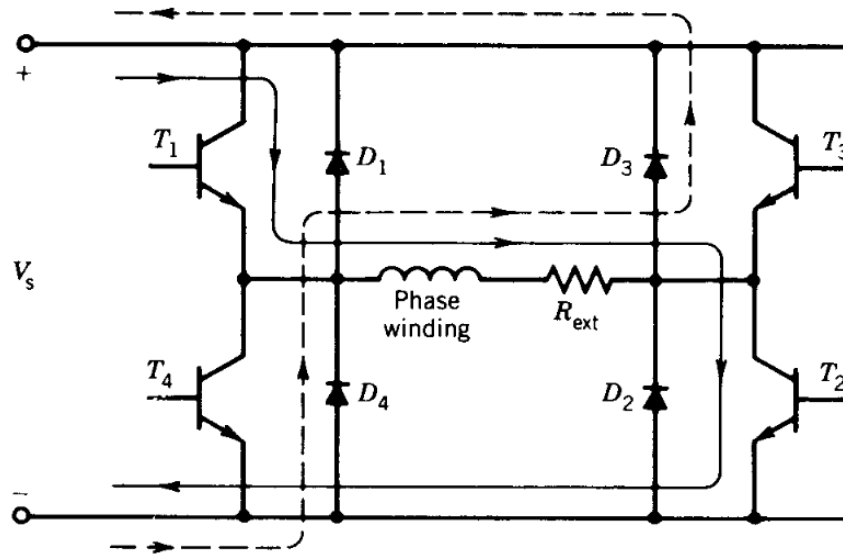
ماکزیمم جریان دیود هرزگرد  $= 3A$  (معادل جریان سیم پیچی فاز در لحظه قطع ترانزیستور)

$$V_{CE,max} = V_s + R_f I = 45 + 15 \times 3 = 90$$

جریان اسمی ترانزیستور  $= 3A$

### ۶-۳-۲- مدار محرک دوقطبی (Bipolar Drive Circuit)

مدار محرک دوقطبی برای یک فاز موتور پله‌ای در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است. در مقایسه با مدار تک‌قطبی (شکل ۶-۹)، در اینجا برای هر فاز چهار ترانزیستور، چهار دیود و یک مقاومت مطابق شکل ۶-۱۰ احتیاج می‌شود. برای موتورهای پله‌ای با آهن‌ربای دائم مناسب است زیرا جهت جریان در تولید گشتاور مؤثر است. برای تحریک فاز، کلیدهای  $T_1$  و  $T_2$  روشن می‌شوند. وقتی این کلیدها خاموش می‌شوند جریان به خاطر وجود اندوکتانس مسیر خود را از طریق  $D_3$  و  $D_4$  می‌بندد و ولتاژ منفی روی فاز می‌افتد. این مقدار بزرگ ولتاژ منفی (به اندازه ولتاژ باس DC) باعث می‌شود جریان با شدت بیشتری نسبت به مدار تک‌قطبی کاهش یابد (مزیت).



۶-۱۰- مدار تحریک دوقطبی برای یک فاز

به علاوه، در هنگام خاموش شدن فاز، انرژی به منبع باز می‌گردد  $\Leftarrow$  بازده سیستم افزایش می‌یابد. (یک مزیت دیگر در مقایسه با مدار تک‌قطبی)

دقت شود برای برعکس شدن جریان، کلیدهای  $T_3$  و  $T_4$  روشن می‌شوند.

عیب این روش نسبت به مدار تک‌قطبی: هزینه بالاتر آن به خاطر استفاده از عناصر الکترونیک قدرت (ترانزیستور و دیود) بیشتر

مثال ۶-۲- موتور پله ای با محرک دو قطبی تحریک شده و داریم:

$$L_w = 30 \text{ mH} \text{ (اندوکتانس سیم پیچی)}$$

$$3 \text{ A} = \text{جریان اسمی}$$

$$R = 15 \Omega \text{ (کل مقاومت در هر فاز)}$$

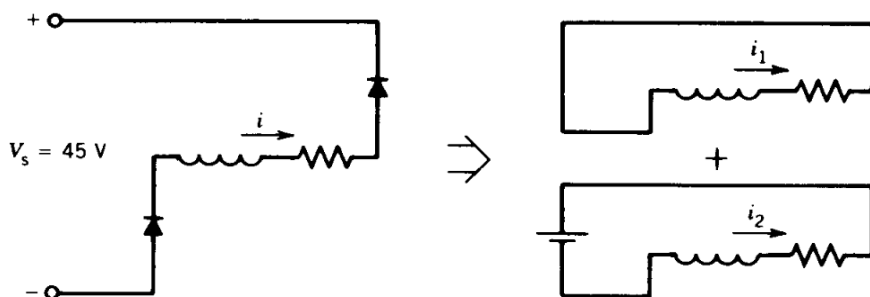
$$45 \text{ V} = \text{منبع DC}$$

هرگاه ترانزیستور خاموش شود:

الف: زمانی که طول می‌کشد تا جریان سیم پیچی فاز صفر شود چقدر است.

ب: چه مقدار انرژی ذخیره شده در سیم پیچی فاز به منبع باز می‌گردد.

الف: مدار معادل در لحظه خاموش شدن:



۶-۱۱- مدار معادل‌های موقعیت خاموشی



$$\begin{cases} i|_{t=0} = 3^A \\ i|_{t=\infty} = -3^A \\ i = A + B e^{-t/\zeta} \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{L_w}{R} = 2 \text{ ms}$$

$$\Rightarrow i = -3 + 6 e^{\frac{-t}{0.002}} \xrightarrow{i(t=t_1)=0} t_1 = 1.4 \text{ ms}$$

ب: انرژی برگشتی به منبع تغذیه:

$$\begin{aligned} W_S &= \int_0^{t_1} V_s i dt = \int_0^{t_1} 45(-3 + 6 e^{\frac{-t}{0.002}}) dt \\ &= \int_0^{t_1} -135 dt + \int_0^{t_1} 270 e^{\frac{-t}{0.002}} dt \\ &= -135 t_1 - 270(e^{\frac{-t}{0.002}} - 1) \xrightarrow{t_1=1.4 \text{ ms}} = 0.081 \text{ J} = 81 \text{ mJ} \end{aligned}$$

کل انرژی ذخیره شده در سیم پیچی فاز:

$$W = \frac{1}{2} L_w I^2 = \frac{1}{2} \times 30 \times 3^2 = 135 \text{ mJ}$$

$$\frac{W_f}{W} \times 100 = \frac{81}{135} = 60 \%$$

بنابراین 60 درصد انرژی ذخیره شده به منبع باز می گردد.

#### ۴-۶- نکات کاربردی در مورد موتور پله‌ای

همانطور که در بالا اشاره شد، طول پله (Step Size) از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{طول پله} = \frac{360}{XN}$$

که در آن N تعداد تکه (لایه) یا فاز است و X تعداد دندانه های رتور می باشد.

معمولاً طول پله  $(2 - 15)^\circ$  است که با افزایش تعداد دندانه ها کم می شود.

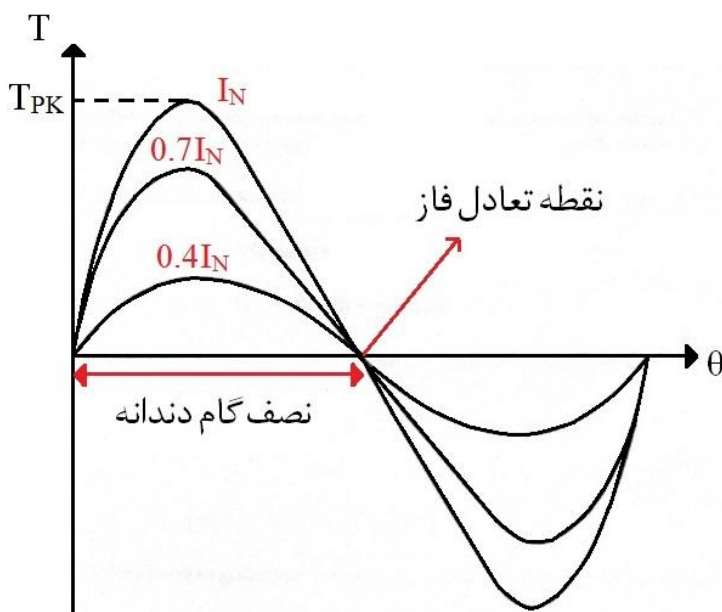
$$\left. \begin{matrix} X = 16 \\ N = 3 \end{matrix} \right\} \rightarrow \text{طول پله} = 7.5^\circ$$

$$\left. \begin{array}{l} X = 16 \\ N = 4 \end{array} \right\} \rightarrow \text{طول پله} = 5.625^\circ$$

سرعت چرخش موتورهای پله ای مرسوم تا 1200 پله بر ثانیه

۱-۴-۶- مشخصه گشتاور استاتیکی

مشخصه مزبور برای یک موتور دلخواه توسط کارخانه سازنده در کاتالوگ ها داده می شود و گشتاور استاتیکی برحسب وضعیت و جریان های مختلف را نشان می دهد. با تحریک یک فاز، گشتاور در موقعیت ها و جریان های مختلف از طریق اندازه گیری یا تحلیل اجزاء محدود بدست می آید. یک نمونه از این مشخصه در شکل ۱۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۶- مشخصه گشتاور استاتیکی

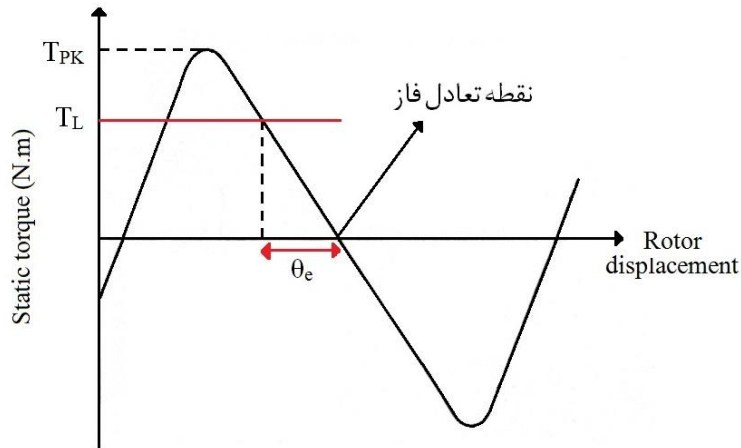
شکل این مشخصه تقریباً سینوسی است و آن را ابعاد هندسی دندانه های رتور و استاتور و جریان تحریک مشخص می کند.

۲-۴-۶- خطای وضعیت مربوط به گشتاور بار

اگر گشتاور بار  $T_L$  از گشتاور تولیدی موتور بزرگتر باشد موتور نمی تواند بار را در موقعیت مورد تقاضا قرار دهد.

همواره یک خطای وضعیت استاتیک وجود دارد که آن را می توان از روی مشخصه  $T/\theta$  استخراج کرد. شکل

۱۳-۶ چگونگی انجام اینکار را نشان می دهد.



شکل ۱۳-۶- خطای موقعیت

با تقریب مشخصه گشتاور استاتیکی یک موتور پله‌ای با  $P$  دندانه روی رتور با یک شکل موج سینوسی داریم:

$$T = -T_{PK} \sin P\theta$$

در موقعیت خطا:

$$T_L = T = -T_{PK} \sin P\theta_e$$

در نتیجه خطای موقعیت برابر است با:

$$\theta_e = \frac{\sin^{-1}\left(-\frac{T_L}{T_{PK}}\right)}{P}$$

روش های مختلف کاهش زاویه خطا ( $\theta_e$ ) عبارتند از:

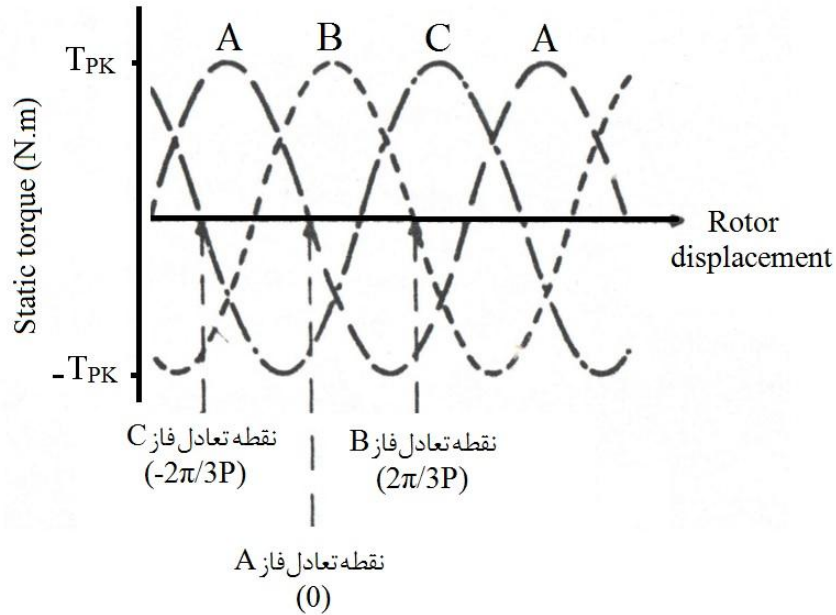
۱- افزایش  $T_{PK}$  (با تغییر نوع تحریک)

۲- بالابردن تعداد دندانه ها

$$\begin{aligned} T_{PK2} &> T_{PK1} \\ \rightarrow \theta_{e2} &< \theta_{e1} \end{aligned}$$

۳-۴-۶- تحریک همزمان چند فاز

برای یک موتور پله ای سه تکه (لایه) یا سه فاز، مشخصه  $T/\theta$  سینوسی به شکل زیر است:



شکل ۶-۱۴- مشخصه گشتاور استاتیکی یک موتور سه فاز

همانطور که از این شکل مشاهده می شود، شیفت زمانی مشخصه ها متناظر با طول یک پله است.

$$\begin{cases} T_A = -T_{pK} \sin P\theta \\ T_B = -T_{pK} \sin \left(P\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ T_C = -T_{pK} \sin \left(P\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$$T_{AB} = T_A + T_B = -T_{pK} \left[ \sin P\theta + \sin \left(P\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

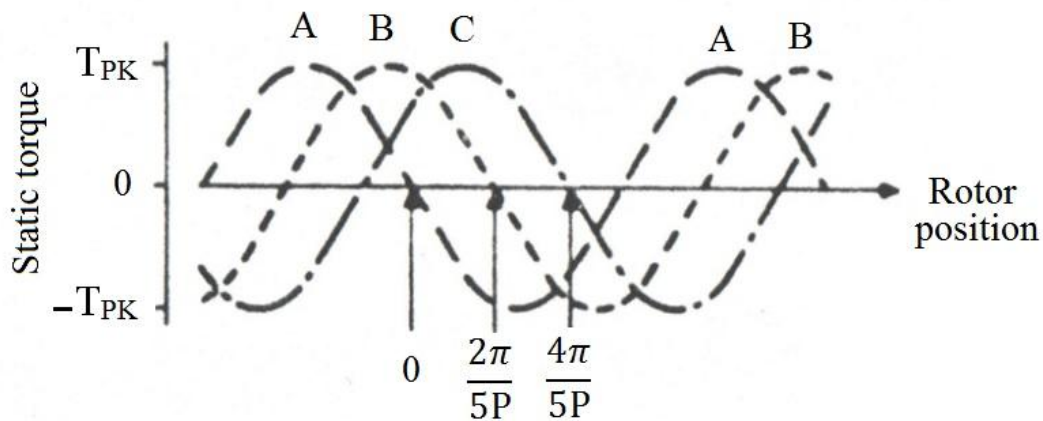
$$\rightarrow \begin{cases} T_{AB} = -T_{pK} \sin \left(P\theta - \frac{\pi}{3}\right) \\ T_{BC} = -T_{pK} \sin \left(P\theta - \pi\right) \\ T_{CA} = -T_{pK} \sin \left(P\theta - \frac{5\pi}{3}\right) \end{cases}$$

در نتیجه با تحریک همزمان دو فاز در این موتور، افزایش  $T_{PK}$  اتفاق نمی افتد و فقط جابجایی زمانی داریم. در ماشین پنج فاز مطابق روابط و شکل‌های زیر، با تحریک دو یا سه فاز به صورت همزمان،  $T_{PK}$  بزرگتری می‌تواند حاصل می‌شود.

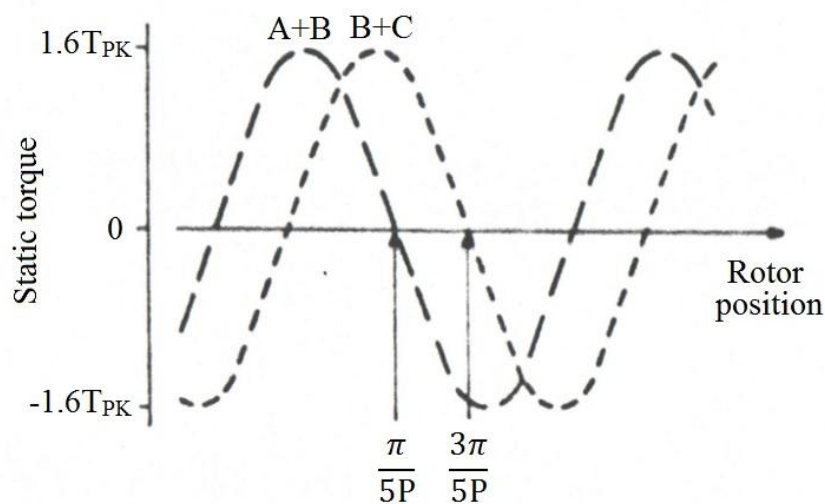
$$T_A = -T_{pK} \sin (P\theta)$$

$$T_B = -T_{pK} \sin \left( P\theta - \frac{2\pi}{5} \right) \rightarrow T_{AB} = -1.6 T_{pK} \sin \left( P\theta - \frac{\pi}{5} \right)$$

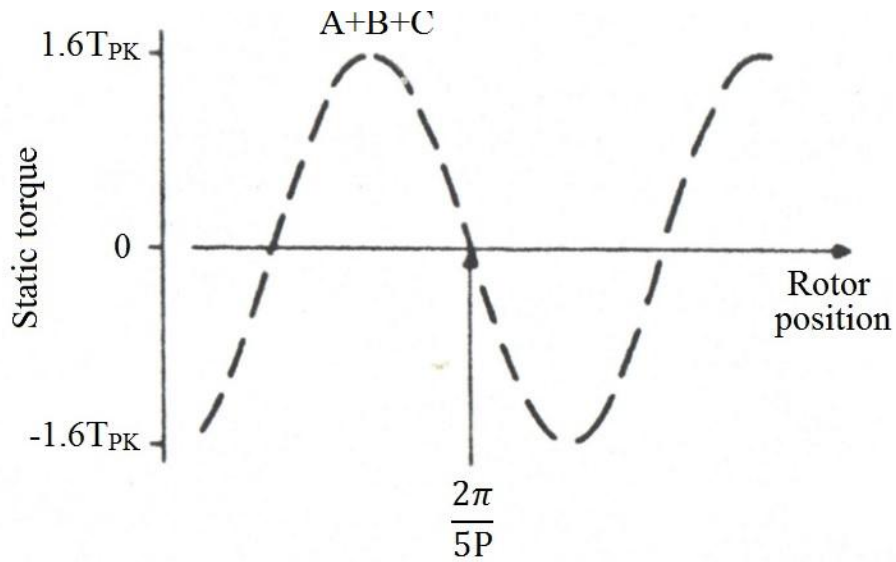
$$T_C = -T_{pK} \sin \left( P\theta - \frac{4\pi}{5} \right)$$



(الف)



(ب)



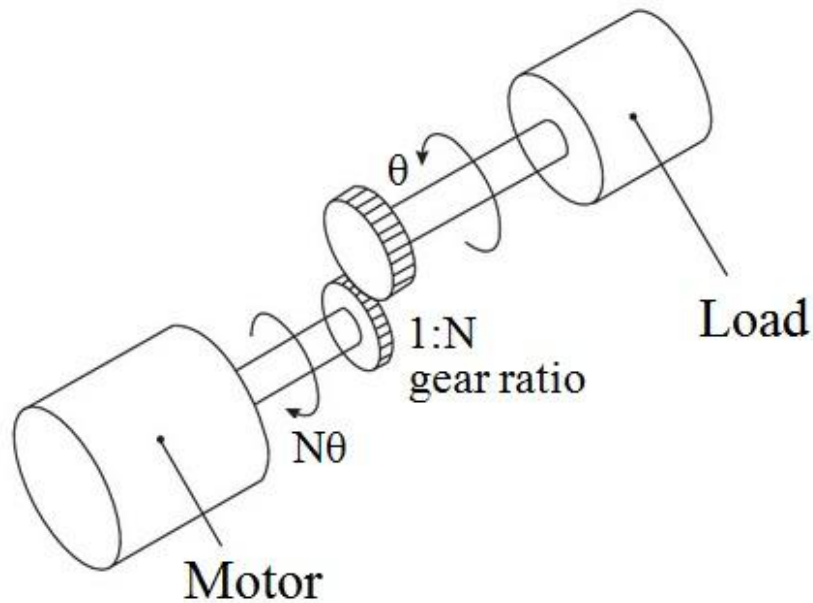
(ج)

شکل ۶-۱۵- حالت‌های مختلف تحریک یک موتور پله‌ای پنج فاز: (الف) تحریک یک فاز، (ب) تحریک همزمان دو فاز، (ج)

تحریک همزمان سه فاز

۶-۴-۴- بار متصل به موتور توسط جعبه دنده

مطابق شکل ۶-۱۶ بار می‌تواند از طریق جعبه دنده به شفت موتور وصل شود.



شکل ۶-۱۶- اتصال بار به موتور توسط جعبه دنده با نسبت ۱ به N

در صورتیکه گشتاور بار  $T_L$  باشد، گشتاور در طرف موتور  $T_L/N$  است.

بار در وضعیت حداکثر خطای استاتیک  $\theta_{eL}$  ← موتور با خطای موقعیت  $\theta_{em} = N \theta_{eL}$

$$\rightarrow \theta_{eL} = \frac{\theta_{em}}{N} \quad (\text{مزیت})$$

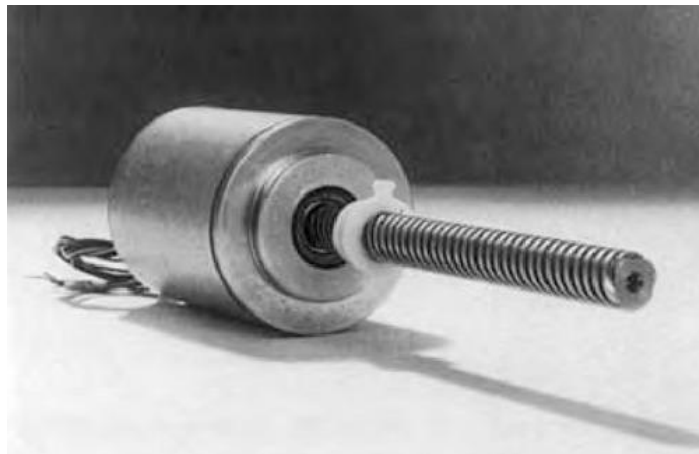
$$T_L = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \quad \begin{array}{l} T_m = \frac{T_L}{N} \\ \xrightarrow{\theta_m = N \theta_L} \end{array} \quad T_m = \frac{T_L}{N} = \frac{J_L}{N} \frac{d^2\theta_L}{dt^2}$$

$$\xrightarrow{\theta_m = N \theta_L} T_m = \frac{J_L}{N^2} \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \rightarrow J_{eL} = \frac{J_L}{N^2} \quad \text{اینرسی مؤثر در طرف موتور}$$

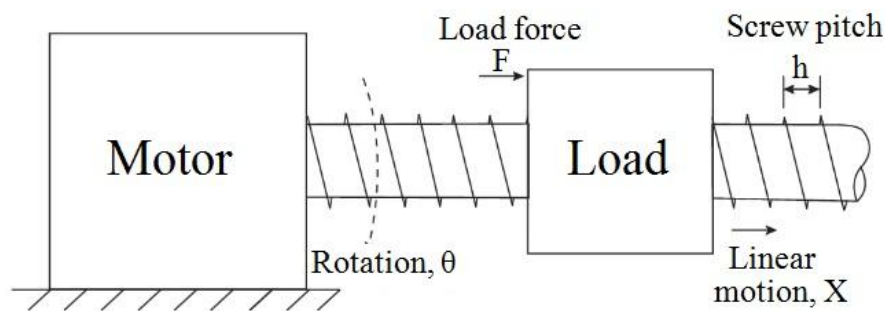
N بزرگ	N کوچک
اینرسی مؤثر پایین	اینرسی مؤثر بالا
شتاب سریع	شتاب کند
طول پله بار کوچک	طول پله بار بزرگ
سرعت موتور بالا	سرعت موتور پایین

۶-۴-۵- اتصال موتور به بار توسط پیچ

بار می تواند مطابق شکل زیر توسط یک پیچ به موتور وصل شود:



(الف)



(ب)

شکل ۶-۱۷- اتصال بار به موتور توسط یک پیچ، یک نمونه عملی، (ب) مدل کردن ساختار

با توجه به شکل ۶-۱۷-ب هنگام دوران موتور پله ای به اندازه  $\theta$ ، حرکت بار به اندازه یک گام پیچ ( $h$ ) اتفاق

می افتد و داریم:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{h}$$

$$F x = T_L \times \theta \quad \rightarrow \quad T_L = \frac{F x}{\theta} = \frac{F h}{2\pi}$$

روش محاسبه خطای موقعیت استاتیک برای نیروی  $F$ :

$$T_L = \frac{F h}{2\pi} \quad (1)$$

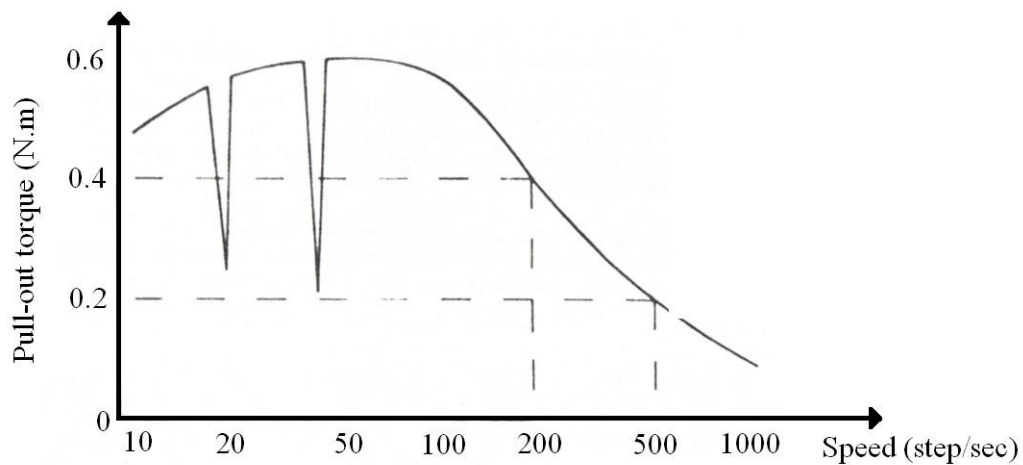
(2) از مشخصه  $T/\theta$  خطای وضعیت چرخشی موتور به دست می آید.

$$x = \frac{h \theta}{2\pi} \quad \leftarrow \quad \frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{h} \quad (3)$$

۶-۴-۶- مشخصه گشتاور- سرعت

مشخصه گشتاور سرعت یک موتور پله ای نمونه در شکل ۶-۱۸ نشان داده شده است.





شکل ۶-۱۸- مشخصه گشتاور-سرعت

وجود فررفتگی به خاطر تشدید مکانیکی بین موتور و بار (پدیده نامطلوب) برای سرعت های بالا جریان فاز ممکن است به مقدار نامی خودش نرسد و به این خاطر کاهش گشتاور رخ می دهد.

برای یک موتور سه فاز با تحریک یک فاز در هر لحظه، گشتاور شکست برابرست با:

$$\text{Pull - out torque} = \frac{\int_{-5\pi/6p}^{-\pi/6p} T_{pK} \sin P\theta \, d\theta}{(-\pi/6p) - (-5\pi/6p)} = 0.83 T_{pK}$$

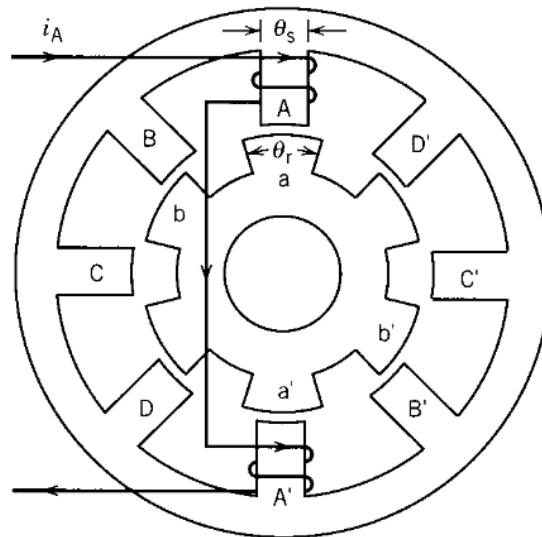
اگر از dip ها صرف نظر کنیم، گشتاور وقتی سرعت کم می شود نزول می کند. علت این امر نوسان در سرعت موتور است.

## فصل هفتم :

# موتور سوئیچ رلوکتانس Switched Reluctance Motor

### ۱-۷- تاریخچه و معرفی

- ✓ اولین بار این موتور در سال ۱۸۳۸ برای کشیدن یک لکوموتیو استفاده شد.
- ✓ رتور بدون سیم پیچی و مغناطیس دائم ← امکان کار در شرایط سخت (مزیت)
- ✓ نیاز به کانورتر (مدار الکترونیک قدرت) برای تحریک فازها
- ✓ موتور سوئیچ رلوکتانس یک موتور تبدیل انرژی است (تولید گشتاور در سرعت بالا مشابه موتور القایی سه فاز) در حالیکه موتور پله ای به منظور کنترل استفاده می شود.
- ✓ استاتور و روتور موتور سوئیچ رلوکتانس هر دو قطب برجسته است. برش عرضی یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز SRM 8/6 در شکل ۱-۷ نمایش داده شده است.



۱-۷- برش عرضی یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز

مثال ۷-۱- در یک SRM 8/6 ، اگر فازهای استاتور به ترتیب تحریک شوند و کل زمان تحریک چهار فاز  $T_0$  باشد (یعنی هر فاز در فاصله زمانی  $T_0/4$  تحریک می‌شود)، سرعت زاویه‌ای موج شار استاتور و سرعت زاویه‌ای رتور را بیابید.

حل: فرض کنید تحریک فاز A در شکل ۷-۱ قطع شده و فاز بعدی (فاز B) تحریک می‌شود.

در این صورت شار استاتور  $45^\circ$  چرخیده است. بنابراین در فاصله زمانی تحریک یک فاز (معادل  $T_0/4$ )، شار استاتور  $45^\circ$  (معادل  $\pi/4$  رادیان) در فضا چرخیده است. بنابراین سرعت زاویه موج شار استاتور برابرست با:

$$\omega_s = \pi/T_0$$

در این فاصله زمانی، رتور به اندازه  $15^\circ$  (معادل  $\pi/12$  رادیان) می‌چرخد. بنابراین سرعت موتور برابرست با:

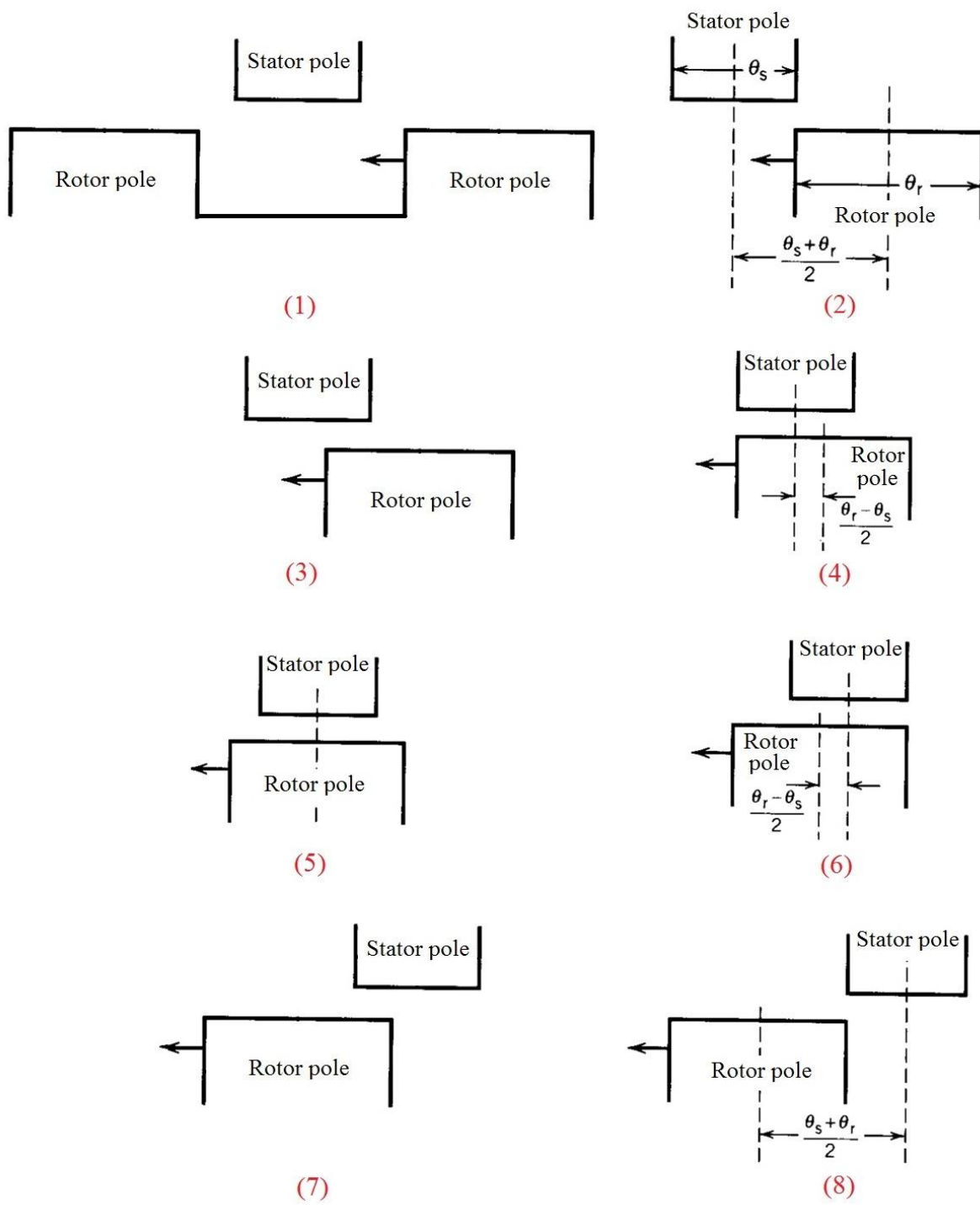
$$\omega_m = \frac{\pi}{3 T_0} \text{ (rad/s)}$$

## ۷-۲- اصول تحلیل

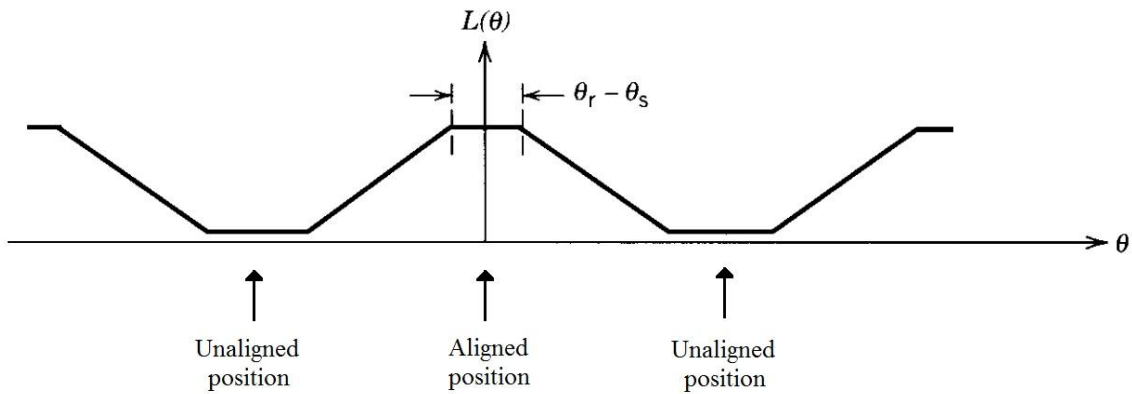
### ۷-۲-۱- منحنی اندوکتانس فاز

منحنی اندوکتانس با توجه به وضعیت های مختلف قطب های استاتور و رتور نسبت به یکدیگر (شکل ۷-۲) قابل تعیین است. برای موقعیت ناهمراستایی کامل (unaligned position) که تصویر شماره یک در شکل ۷-۲ می باشد، کمترین اندوکتانس را داریم. در این موقعیت که در حقیقت قطب استاتور تحریک شده دقیقاً بین دو قطب رتور مجاور قرار می گیرد، بیشترین رلوکتانس (مینیمم اندوکتانس) مشاهده می شود. هنگام چرخش رتور (حرکت رتور به سمت چپ در شکل مزبور)، تا لحظه شروع همپوشانی قطبها (تصویر شماره دو در شکل ۷-۲)، اندوکتانس تغییرات آنچنانی ندارد و می توان آنرا ثابت در نظر گرفت. از موقعیت شروع همپوشانی تا موقعیت همراستایی کامل (تصویر شماره پنج در شکل ۷-۲)، اندوکتانس افزایش می یابد و در حالت ساده می توان این افزایش را به صورت خطی مدل کرد. هنگامی که قطب رتور دقیقاً مقابل قطب استاتور تحریک شده قرار می گیرد، موقعیت همراستایی کامل (aligned position) است و در این موقعیت می‌نیمم

رلوکتانس (حداکثر اندوکتانس) را داریم. در صورتیکه پهنای قطب های استاتور و رتور یکسان نباشند، برای موقعیت های نشان داده شده در تصویرهای شماره ۴، ۵ و ۶، اندوکتانس ثابت است زیرا سطح مقطع عبور شار از قطب استاتور به قطب رتور تغییر نمی کند. می دانیم مقدار رلوکتانس به طول مسیر شار (فاصله هوایی) و سطح مقطع عبور شار بستگی دارد. هنگامی که قطب رتور از زیر قطب استاتور خارج می شود (تصویر شماره هفت در شکل ۷-۲)، عمل عکس اتفاق می افتد و اندوکتانس شروع به کاهش می کند زیرا سطح مقطع عبور شار کم می شود. به صورت مشابه با آنچه در بالا رخ داد، این کاهش تا زمانی قابل توجه است که همپوشانی قطب های استاتور و رتور وجود دارد. از لحظه ای که این همپوشانی تمام می شود (تصویر شماره ۸ در شکل ۷-۲)، تا موقعیت ناهمراستایی کامل بعدی مشابه آنچه در بالا رخ داد، اندوکتانس مقدار ناچیزی دارد و معمولاً از آن صرفنظر می شود. با این توضیحات، منحنی تغییرات اندوکتانس فاز در شکل ۷-۳ مشاهده می شود.



شکل ۷-۲- وضعیت قطب‌های استاتور و رتور برای موقعیت‌های مختلف رتور



شکل ۷-۳- منحنی تغییرات اندوکتانس یک فاز برحسب موقعیت رتور

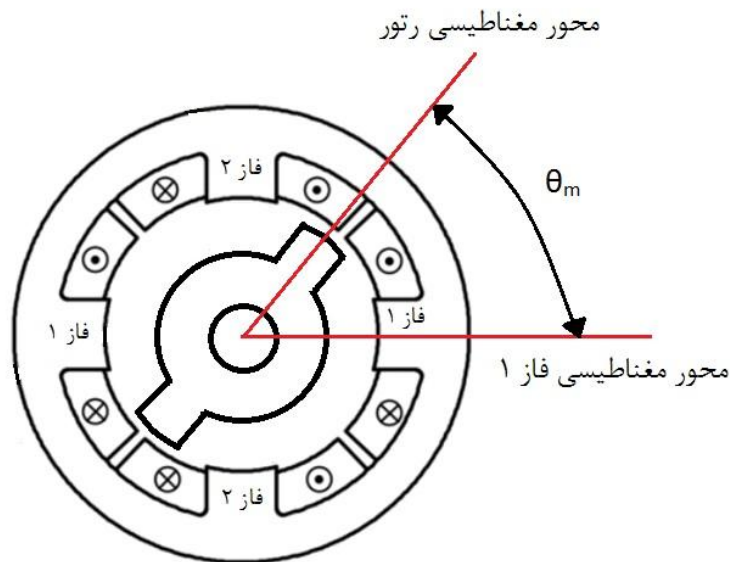
### ۷-۲-۲- گشتاور تولیدی موتور

رابطه بین شار پیوندی و جریان ماشین در یک موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز (شکل ۷-۴) به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11}(\theta_m) & L_{12}(\theta_m) \\ L_{21}(\theta_m) & L_{22}(\theta_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (۷-۱)$$

که در آن  $\theta_m$  موقعیت رتور می باشد. به دلیل تقارن داریم:

$$L_{22}(\theta_m) = L_{11}(\theta_m - 90) \quad (۷-۲)$$



۷-۴- موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز 4/2 SRM

با فرض ساختار خطی (هسته به اشباع نمی رود)، کوانرژی برابر است با:

$$w'_f(i_1, i_2, \theta_m) = \frac{1}{2} L_{11}(\theta_m) i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22}(\theta_m) i_2^2 + L_{12}(\theta_m) i_1 i_2$$

می دانیم گشتاور می تواند از کوانرژی به صورت زیر محاسبه شود:

$$T = \frac{\partial w'_f}{\partial \theta_m}(i_1, i_2, \theta_m)$$

با فرض ناچیزبودن اندوکتانس متقابل، داریم:

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{d L_{11}(\theta_m)}{d \theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{d L_{22}(\theta_m)}{d \theta_m}$$

با توجه به (۷-۲)، رابطه نهایی محاسبه گشتاور به صورت زیر می شود:

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{d L_{11}(\theta_m)}{d \theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{d L_{11}(\theta_m - 90^\circ)}{d \theta_m}$$

مثال ۷-۲- برای SRM 4/2 نشان داده شده در شکل ۷-۴ طول کمان قطبهای استاتور و رتور با یکدیگر برابر و ۶۰ درجه می باشند. به علاوه، طول فاصله هوایی ۲/۵۴ میلی متر، طول محوری ماشین ۱۳ سانتی متر و شعاع رتور ۳/۸ سانتی متر هستند. قطب های هر فاز به صورت سری و تعداد دور در هر فاز ۱۰۰ می باشد.

الف- با ایده آل فرض کردن هسته ( $\mu = \infty$ )، منحنی اندوکتانس یک فاز را رسم نمایید. در بدست آوردن این منحنی، هنگامی که قطبها همپوشانی ندارند فرض نمایید اندوکتانس قابل اغماض است و به علاوه، تغییرات اندوکتانس از شروع همپوشانی تا همراستایی کامل را خطی در نظر بگیرید.

ب- شکل موج گشتاور لحظه ای را برای دو حالت زیر بدست آورید:

1)  $i_1 = I_1, i_2 = 0$

2)  $i_1 = 0, i_2 = I_2$

ج- با فرض تحریک همزمان دو فاز وقتی  $i_1=i_2=5A$  است، مقدار گشتاور خالص تولیدی را برای زاویه‌های صفر، ۴۵ و ۷۵ درجه محاسبه نمایید.

حل:

$$\alpha = \beta = 60^\circ = \pi/3 \text{ rad} \quad \text{طول کمان قطب های استاتور و رتور}$$

$$R = 3.8 \text{ cm} \quad \text{شعاع رتور}$$

$$g = 2.54 \times 10^{-2} \text{ cm} \quad \text{طول فاصله هوایی}$$

$$L_{stk} = 13 \text{ cm} \quad \text{طول محوری ماشین}$$

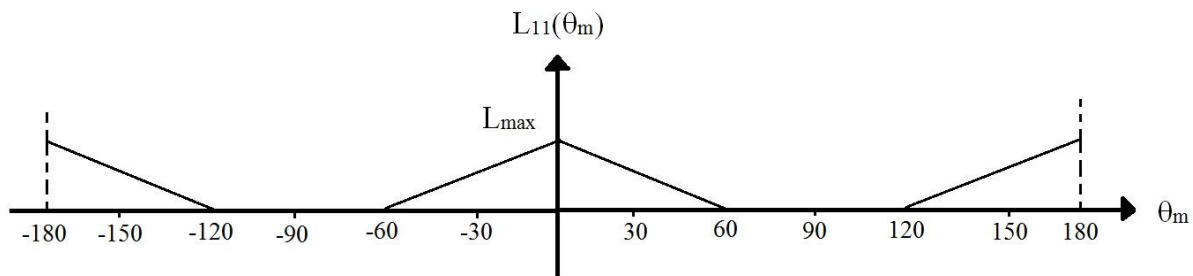
الف) بدست آوردن منحنی اندوکتانس فاز:

$$L = \frac{N^2}{R}, \quad R = \frac{\ell}{\mu A}, \quad \ell = 2g, \quad A = \alpha R L_{stk} \Rightarrow R = \frac{2g}{\mu_0 \alpha R L_{stk}}$$

$$\Rightarrow L_{max} = \frac{N^2 \mu_0 \alpha R L_{stk}}{2g}$$

$$\Rightarrow L_{max} = \frac{(100)^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \pi/3 \times 3.8 \times 10^{-2} \times 0.13}{2 \times (2.54 \times 10^{-4})} = 0.128 \text{ H}$$

با فرض آنکه هنگامی که قطب‌ها همپوشانی ندارند اندوکتانس قابل اغماض است و همچنین، تغییرات خطی اندوکتانس از شروع همپوشانی تا همراستایی کامل، منحنی اندوکتانس فاز ۱ به صورت زیر شکل زیر است:



شکل ۷-۵- منحنی اندوکتانس فاز ۱

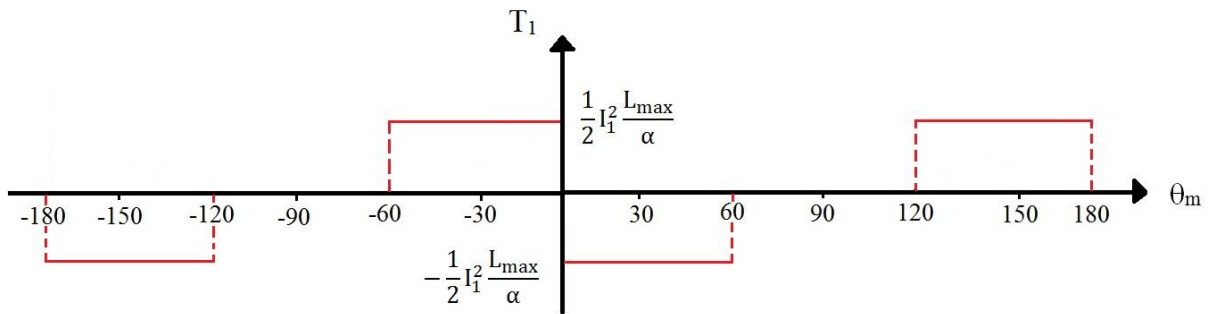
ب) تعیین شکل موج گشتاور لحظه‌ای:



همانطور که در بالا بحث شد، گشتاور تولیدی یک موتور دو فاز می تواند بر مبنای رابطه زیر محاسبه شود:

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{d L_{11}(\theta_m)}{d \theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{d L_{11}(\theta_m - 90^\circ)}{d \theta_m}$$

با توجه به منحنی اندوکتانس فاز (شکل ۷-۵) و رابطه فوق، شکل موج گشتاور تولیدی یک فاز (فاز ۱) بدست آمده و در شکل ۷-۶ نشان داده شده است.

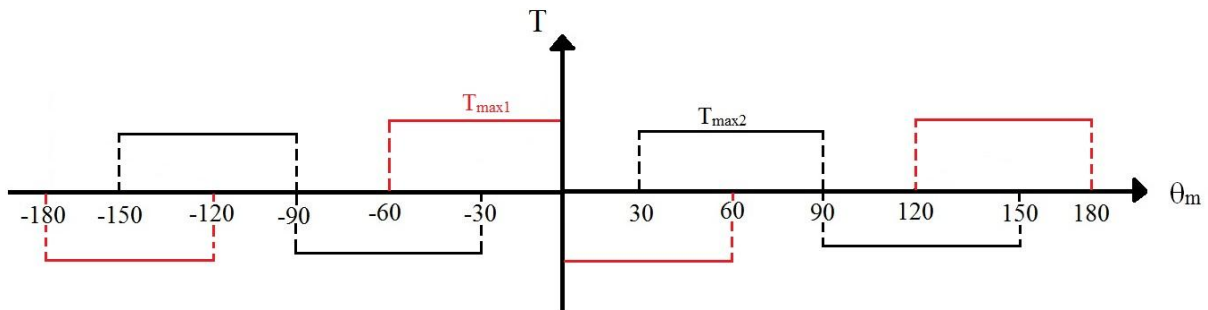


شکل ۷-۶- شکل موج گشتاور لحظه ای تولیدی یک فاز (فاز ۱)

شکل موج های گشتاور تولیدی توسط دو فاز نیز در شکل ۷-۷ مشاهده می شود. در این شکل، مقادیر ماکزیمم گشتاور تولیدی توسط هر یک از فازها به جریان آنها،  $L_{max}$  و  $\alpha$  بستگی دارد و برابرند با:

$$T_{max1} = \frac{L_{max} I_1^2}{2\alpha}$$

$$T_{max2} = \frac{L_{max} I_2^2}{2\alpha}$$



شکل ۷-۷- شکل موج های گشتاور تولیدی فازهای مختلف

ج) محاسبه گشتاور خالص برای موقعیت‌های مختلف:

برای موقعیت صفر:

از شکل ۷-۷ واضح است که گشتاور ناشی از هر دو فاز در موقعیت  $\theta_m = 0$  برابر با صفر می باشد.

در یک ماشین واقعی گذر گشتاور از  $T_{max1}$  به  $-T_{max1}$  در  $\theta_m = 0$  یک شیب محدودی دارد و در  $\theta_m = 0$  گشتاور صفر است.

این مشکلی است (وجود گشتاور صفر در یک موقعیت خاص) که در  $4/2$  SRM اتفاق می افتد و عملاً رتور در  $\theta_m = 0$  می چسبد و راه اندازی نمی شود. مشکل مزبور در  $6/4$  SRM،  $8/6$  SRM و  $12/8$  SRM مرتفع می شود.

برای موقعیت ۴۵ درجه:

$$\theta_m = 45^\circ$$

با توجه به شکل ۷-۷ به وضوح مشاهده می شود که در این موقعیت هر دو فاز گشتاور دارند. گشتاور فاز ۱ منفی و گشتاور فاز ۲ مثبت است. چون جریان‌ها برابرند، گشتاورها یکسانند و نتیجتاً گشتاور خالص تولیدی صفر است.

در اینجا می توان (برخلاف وضعیت  $\theta_m = 0$ ) با انتخاب مناسب جریان‌ها هم گشتاور مثبت تولید کرد و هم گشتاور خالص منفی (بسته به نیاز).

برای موقعیت ۷۵ درجه:

$$\theta_m = 75^\circ$$

فاز ۱ گشتاوری ایجاد نمی کند و فاز ۲ گشتاور مثبت به اندازه  $T_{max2}$  تولید می کند:

$$T_{max2} = \left(\frac{L_{max}}{2\alpha}\right) i_2 = \frac{1.28}{2(\pi/3)} 5^2 = 1.53 \text{ N.m}$$

### ۳-۷- مدل سازی موتور سوئیچ رلوکتانس

همانطور که در زیربخش ۲-۲-۷ بحث شد، با فرض ساختار خطی گشتاور تولیدی هر فاز موتور سوئیچ رلوکتانس می تواند از رابطه زیر بدست آید:

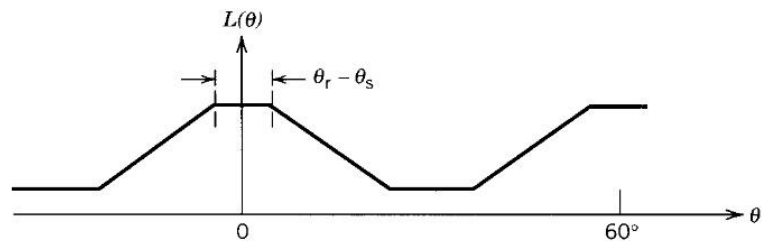
$$T_K = \frac{1}{2} i_K^2 \frac{\partial L_K(\theta_K)}{\partial \theta_m} \quad (3-7)$$

همانطور که به وضوح این رابطه نشان می دهد، گشتاور مستقل از جهت جریان است.

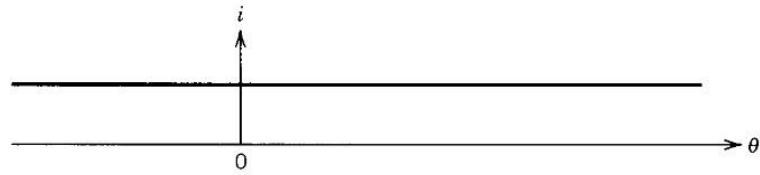
با توجه به شکل ۷-۸، مشاهده می شود که برای یک جریان ثابت، متوسط گشتاور تولیدی صفر است.

اگر جریان فقط در زمان افزایش اندوکتانس اعمال شود، گشتاور منفی از بین می رود و یک میانگین گشتاور مثبت تولید خواهد شد. (عملکرد موتوری)

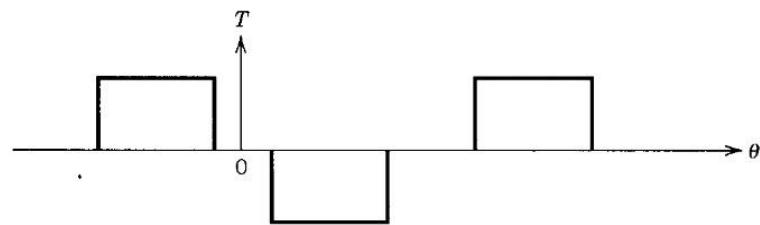
⇐ رتور وقتی در یک موقعیت خاص قرار می گیرید، بایستی تحریک فاز انجام شود. (نیاز به اینکودر)



(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۷-۸- شکل موج‌های مختلف: (الف) تغییرات اندوکتانس با موقعیت رتور، (ب) تحریک جریان ثابت، (ج) گشتاور برحسب

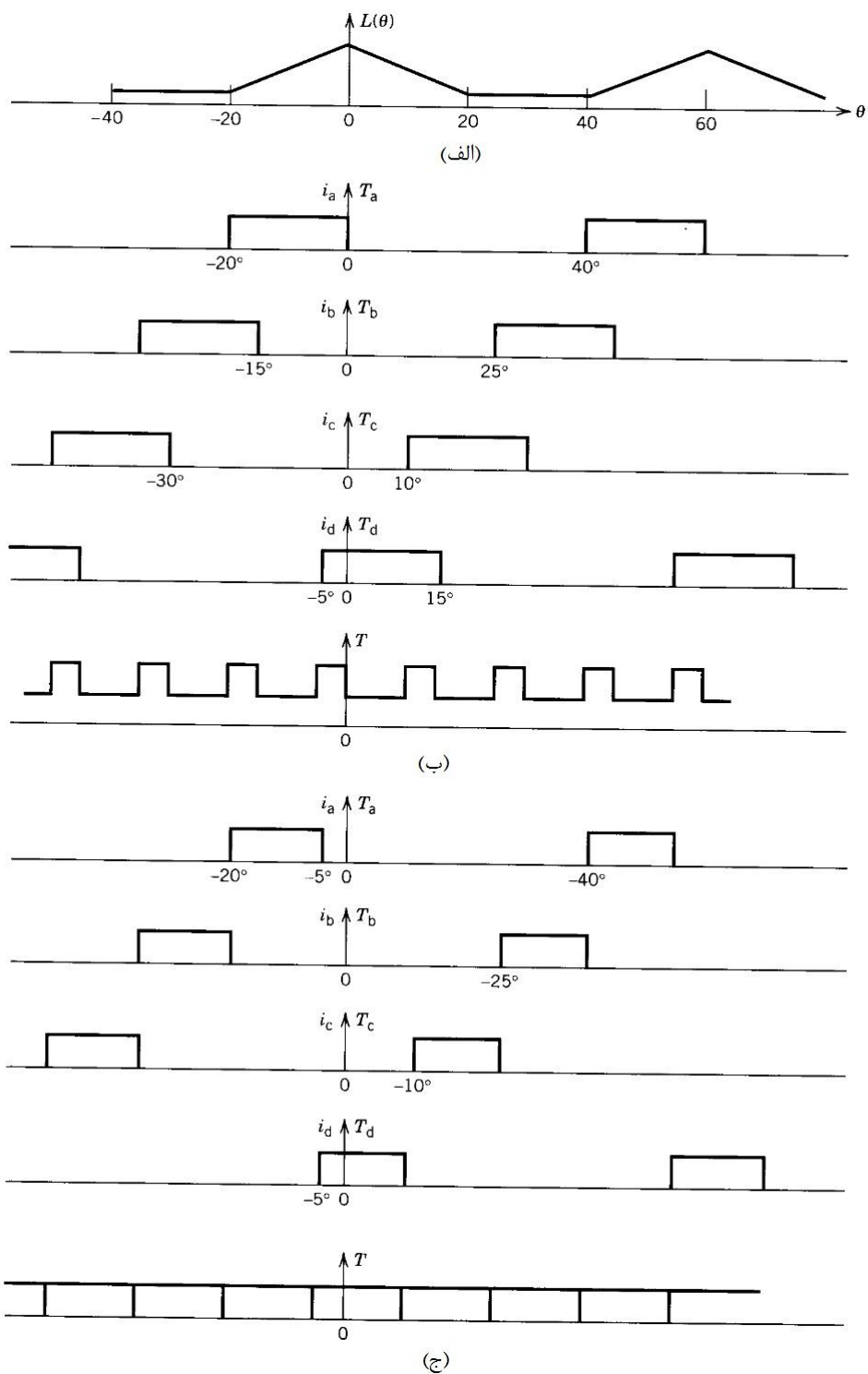
موقعیت برای تحریک جریان ثابت، (د) تحریک جریان پالسی، (ه) گشتاور برحسب موقعیت برای تحریک پالسی

مثال ۳-۷- برای یک 8/6 SRM چهار فاز  $\theta_s = \theta_r = 20^\circ$  هنگامی که تحریک فازها فقط در زمان افزایش اندوکتانس انجام می شود، شکل موج های اندوکتانس فاز، گشتاور فاز و گشتاور کل را برای جریان های مربعی برای به عرض های  $15^\circ, 20^\circ$  رسم کنید.

حل: از آنجائیکه موتور موردنظر یک 8/6 SRM است، پریود تحریک فاز  $60^\circ$  درجه می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{Phase excitation period} = 360^\circ / N_r \quad (4-7)$$

که در آن  $N_r$  تعداد قطب های رتور است. از آنجائیکه برای موتور موردبحث ۶ قطب روی رتور وجود دارد، دوره تناوب منحنی اندوکتانس نشان داده شده در شکل ۷-۹-الف برابر با  $60^\circ$  درجه می باشد. با توجه به نکات گفته شده در زیربخش ۷-۲-۱، منحنی تغییرات اندوکتانس قابل تعیین است. از آنجائیکه پهنای قطب های استاتور و رتور در اینجا یکسانند، اندوکتانس تنها در موقعیت همراستایی کامل (صفر درجه در شکل مزبور) ماکزیمم مقدار خود را دارد. به علاوه، چون این پهنای  $20^\circ$  درجه است، اندوکتانس در  $\theta = 20^\circ$  (لحظه اتمام همپوشانی قطبها) به مقدار می نیمم خود می رسد. با توجه به اینکه تحریک فازها فقط در زمان افزایش اندوکتانس انجام می شود، شکل موج های گشتاور تولیدی فازهای مختلف و گشتاور کل برای پالس جریان  $20^\circ$  مطابق شکل ۷-۲-ب بدست می آیند. وجود ریبیل (تموج) گشتاور (Torque ripple) در این شکل به وضوح مشاهده می شود که یکی از معایب موتور سوئیچ رلوکتانس است و باعث ایجاد سروصدا می شود. برای کاهش ریبیل گشتاور می توان عرض پالس های جریان را کاهش داد. برای مثال، شکل موج های گشتاور فازهای مختلف و گشتاور کل برای پالس جریان  $15^\circ$  در شکل ۷-۲-ج این نکته را تایید می نماید. البته توجه شود کاهش ریبیل گشتاور در اینجا به بهای کاهش گشتاور متوسط انجام پذیرفت. علاوه بر روش های کنترلی برای کاهش ریبیل، می توان روی طراحی ماشین هم برای این منظور کار کرد که به بهینه سازی طراحی (Design optimization) شناخته شده است.



شکل ۷-۹- شکل موجهای مختلف مربوط به مثال ۷-۳: (الف) تغییرات اندوکتانس فاز، (ب) گشتاور فازهای مختلف و گشتاور

کل برای به پالسهای جریان ۲۰ درجه‌ای، (ج) گشتاور فازهای مختلف و گشتاور کل برای پالسهای جریان ۱۵ درجه‌ای

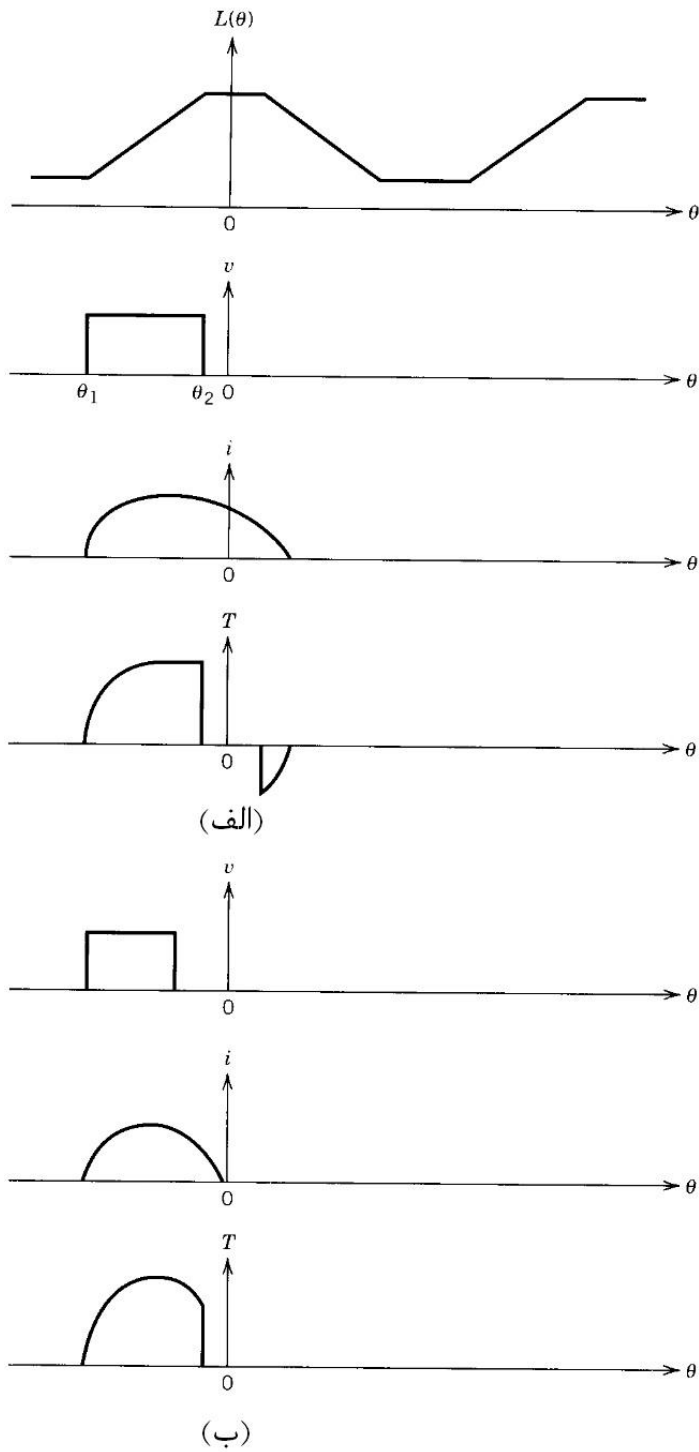
نکته دیگر وجود اختلاف فاز بین شکل موج های گشتاور تولیدی فازهای مختلف در شکل ۷-۹ به اندازه زاویه ضربه می باشد که در رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\delta = \frac{360^\circ}{q N_r} \quad (5-7)$$

که در آن  $\delta$  زاویه ضربه (Stroke angle)،  $N_r$  تعداد قطب های رتور و  $q$  تعداد فازهای موتور می باشد. از آنجائیکه 8/6 SRM یک موتور چهار فاز است و تعداد قطب های رتور برابر با ۶ می باشد، زاویه ضربه در اینجا  $15^\circ$  می شود.

### ۷-۳-۱- منحنی های واقعی جریان و گشتاور

از آنجائیکه موتور سوئیچ رلوکتانس مشابه دیگر موتورها یک موتور تغذیه ولتاژ است، در واقعیت هنگام روشن شدن فاز یک ولتاژ DC به آن فاز اعمال می شود و جریان فاز شکل موجی متفاوت با یک پالس دارد. در این زیربخش، مشخصه های عملکرد دقیق موتور بررسی می شوند. در لحظه روشن شدن جریان سریع شکل می گیرد زیرا اندوکتانس پایین است. در هنگام خاموش شدن اندوکتانس بالاست بنابراین شدت کاهش جریان کم است و ممکن است باعث ایجاد گشتاور منفی شود.



شکل ۷-۱۰- مشخصه‌های مختلف: (الف) وقتی ولتاژ در پریود افزایش اندوکتانس اعمال شود، (ب) وقتی ولتاژ زودتر از حالت

الف برداشته شود



شکل موج جریان می تواند از معادله ولتاژ فاز پیش بینی شود:

$$V = R i + \frac{d \lambda}{dt} \quad (6-7)$$

که در آن  $V$  ولتاژ اعمالی به فاز،  $i$  جریان فاز،  $R$  مقاومت سیم پیچی فاز و  $\lambda$  شار پیوندی با سیم پیچی است. با جایگذاری  $\lambda = L(\theta)i$  در رابطه فوق، داریم:

$$V = R i + \frac{d}{dt} [L(\theta_m)i]$$

$$\Rightarrow V = \left\{ R + \frac{d}{dt} [L(\theta_m)] \right\} i + L(\theta_m) \frac{di}{dt} = \left[ R + \frac{d L(\theta_m)}{d \theta_m} \frac{d \theta_m}{dt} \right] i + L(\theta_m) \frac{di}{dt}$$

در نتیجه:

$$V = \left[ R + \frac{d L(\theta_m)}{d \theta_m} \omega_m \right] i + L(\theta_m) \frac{di}{dt} \quad (7-7)$$

که در آن  $\omega_m$  سرعت موتور است. معادله مزبور به صورت عددی حل می شود و شکل موج جریان به دست می آید.

مثال ۷-۴- برای SRM 4/2 مطرح شده در مثال ۷-۲ فرض کنید:

$$R = 1.5 \Omega$$

$$L_\ell = 5 \text{ mH}$$

$$L_{\max} = 0.128 \text{ H}$$

برای سرعت ثابت  $\omega_m = 4000 \text{ rpm}$ ، زمانی که در فاصله  $-60^\circ < \theta_m < 0^\circ$  ولتاژ ۱۰۰ ولت به فاز

۱ اعمال شود، جریان فاز را به دست آورید.

حل:

برای  $-60^\circ < \theta_m < 0^\circ$  داریم:

$$L_{11}(\theta_m) = L_\ell + \frac{L_{\max}}{\pi/3} (\theta_m + \pi/3) = 0.005 + 0.122(\theta_m + \pi/3)$$

$$\Rightarrow \frac{d L_{11}(\theta_m)}{d \theta_m} = 0.122 \quad \Rightarrow \quad \frac{d L_{11}(\theta_m)}{d \theta_m} \times \frac{d \theta_m}{dt} = 51.2^\Omega$$

$$\omega_m = \frac{d \theta_m}{dt} = 4000 \times \frac{\pi}{30} = \frac{400\pi}{3} \text{ rad/s}$$

این مقدار از مقاومت سیم پیچی  $R = 1.5^\Omega$  بسیار بزرگتر است، پس از افت  $R_i$  در رابطه (۶-۷) صرف نظر می کنیم:

$$V = \frac{d (L_{11} i_1)}{dt} \Rightarrow i_1(t) = \frac{\int_0^t V dt}{L_{11}(t)}$$

$$\Rightarrow i_1(t) = \frac{V_{dc} t}{L_{11}(t)} \Rightarrow i_1(t) = \frac{100 t}{0.005 + 51.1 t} \text{ A}$$

که در آن  $V_{dc}$  ولتاژ اعمالی به فاز (۱۰۰ ولت) است. معادله فوق تا  $\theta_m = 0$  در زمان  $t = 2.5 \text{ ms}$  معتبر است و مقدار نهایی جریان در این زمان  $1/88$  آمپر می شود.

#### ۴-۷- طرح بهینه موتور

مشابه دیگر موتورهای الکتریکی، طراحی بهینه (Optimal design) یک درایو SRM با مصالحه بین کمیت‌های مختلف انجام می شود:

- ✓ قیمت ارزان
- ✓ گشتاور موردانتظار برای بازه وسیع سرعت
- ✓ بازده بالا
- ✓ نسبت گشتاور به جرم (حجم) بالا
- ✓ نویز کم

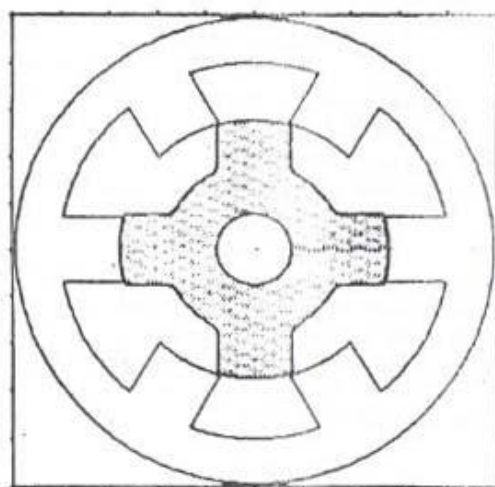
## ۷-۵- برخی نکات مهم در مورد موتور سوئیچ رلوکتانس

### ۷-۵-۱- انواع ساختارهای SRM

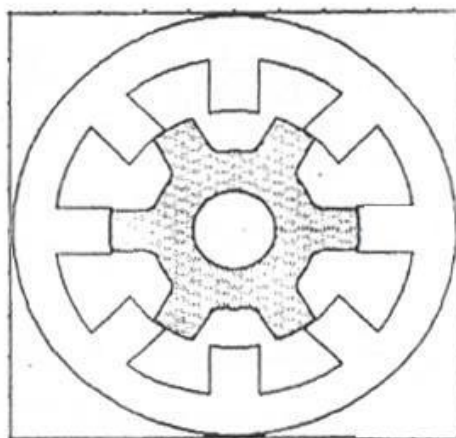
همانطور که قبلاً اشاره شد، انواع مرسوم موتور سوئیچ رلوکتانس که در بیشتر کاربردها از آنها استفاده می‌شود

سه نوع 6/4 SRM ، 8/6 SRM و 12/8 SRM می‌باشند. برش عرضی این موتورها در شکل ۷-۱۱

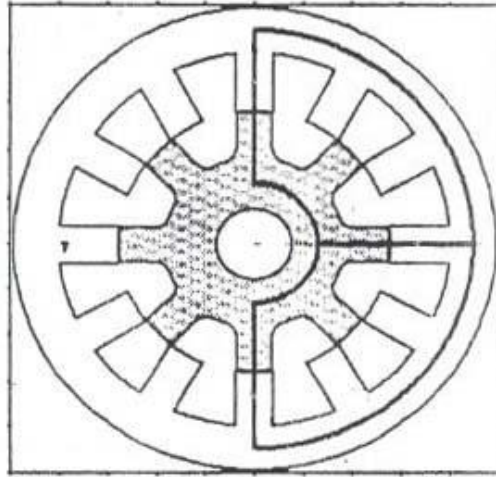
نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

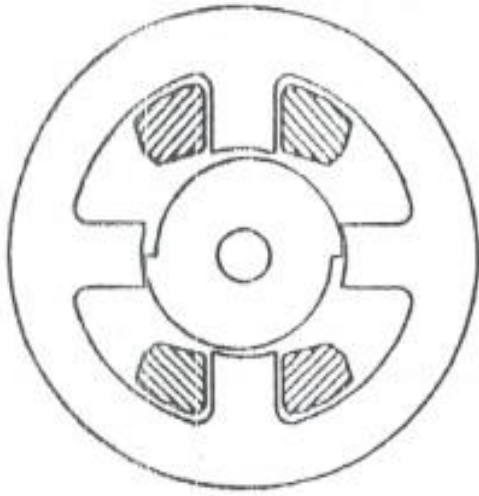


(ج)

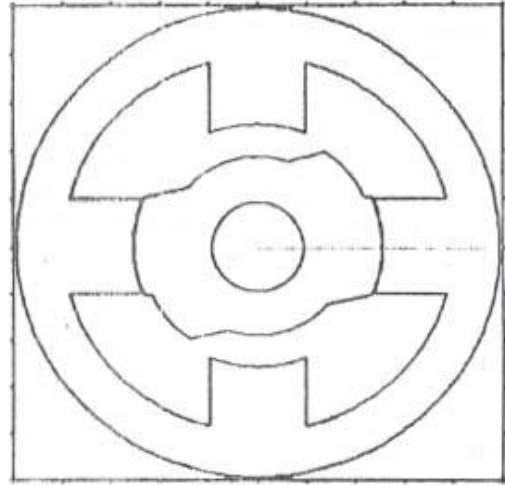
شکل ۷-۱۱- ساختارهای پر کاربرد موتور سوئیچ رلوکتانس: (الف) 6/4 SRM ، (ب) 8/6 SRM و (ج) 12/8 SRM

اگر نسبت قطب های استاتور به رتور ( $N_s/N_r$ ) عدد صحیح شود، موقعیت گشتاور صفر وجود دارد. در مورد موتورهای نشان داده شده در شکل ۷-۱۱ این نسبت عدد صحیح نمی شود و بنابراین موقعیت گشتاور صفر در این نوع موتورها وجود ندارد.

در مورد حالت هایی که نسبت مزبور یک عدد صحیح است، با نامتقارن ساختن سطح رتور مشکل گشتاور راه انداز صفر در برخی موقعیتها مرتفع می شود (شکل ۷-۱۲).



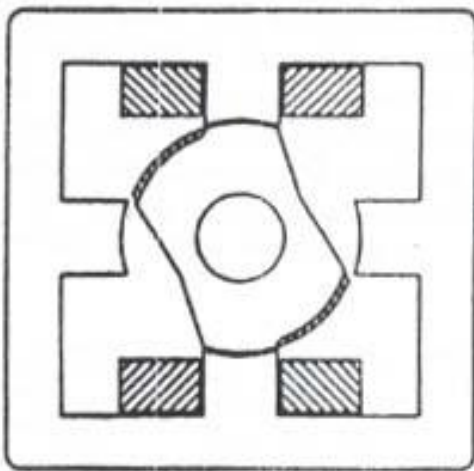
(ب)



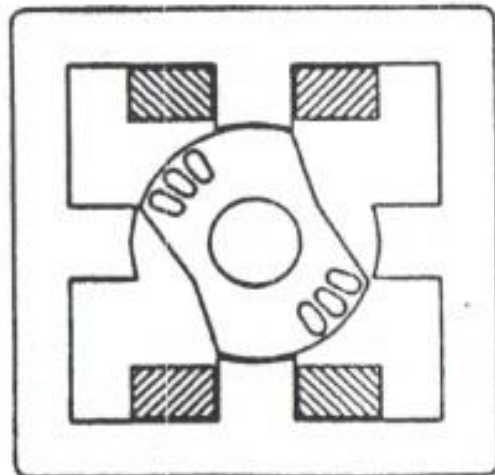
(الف)

شکل ۷-۱۲- حل مشکل راه اندازی با نامتقارن ساختن سطح رتور

مشکل راه اندازی می تواند با برداشتن قسمتهایی از آهن رتور مطابق شکل ۷-۱۳ نیز مرتفع شود.



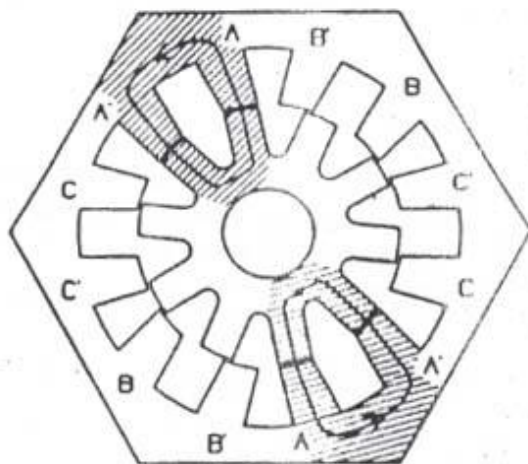
(ب)



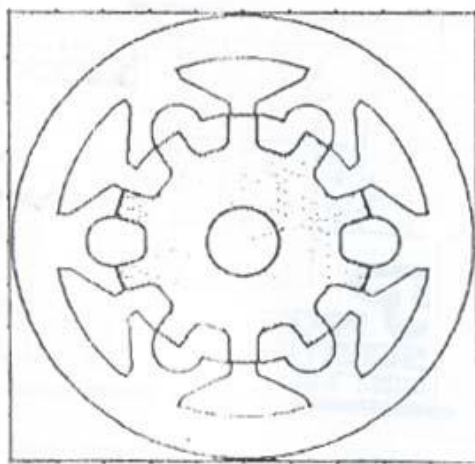
(الف)

شکل ۷-۱۳- حل مشکل راه اندازی با تغییر ساختار رتور (الف) ایجاد سوراخ هایی روی رتور، (ب) دندان دندان کردن سطح رتور

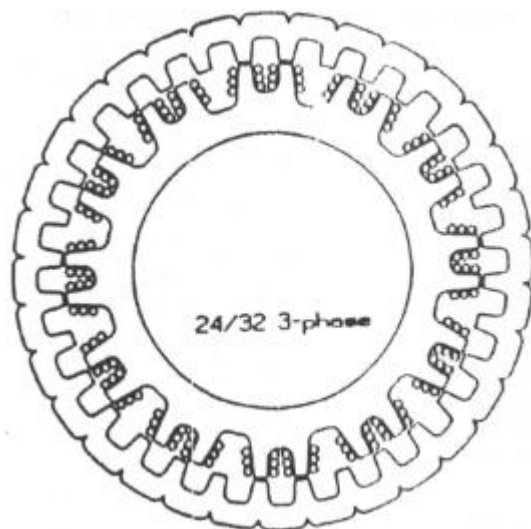
برخی از انواع دیگر موتور سوئیچ رلوکتانس در شکل های زیر نشان داده شده اند:



شکل ۷-۱۴- برش عرضی یک 12/10 SRM



شکل ۷-۱۵- برش عرضی یک 12/10 SRM دو دندانه برقطب



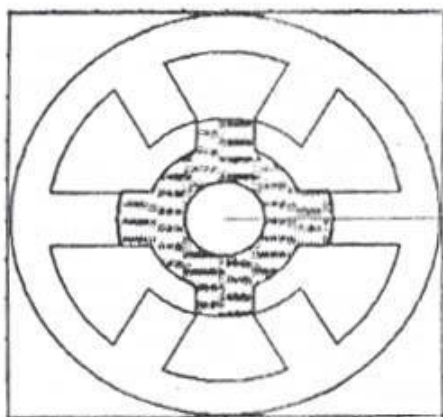
شکل ۷-۱۶- برش عرضی یک 24/32 SRM با رتور خارجی

۷-۵-۲- مشخصه استاتیکی شار پیوندی با یک فاز (Static fluxlinkage characteristic)

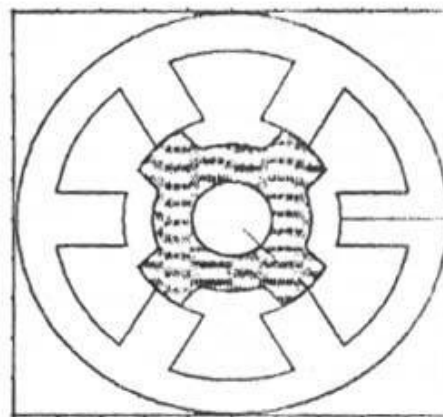
قبلاً بحث شد که دو موقعیت مهم در موتور سوئیچ رلوکتانس وجود دارد به نام های موقعیت ناهمراستایی

کامل (Unaligned position) و موقعیت همراستایی کامل (Aligned position) که در شکل ۷-۱۷ برای یک

SRM 6/4 نشان داده شده اند.



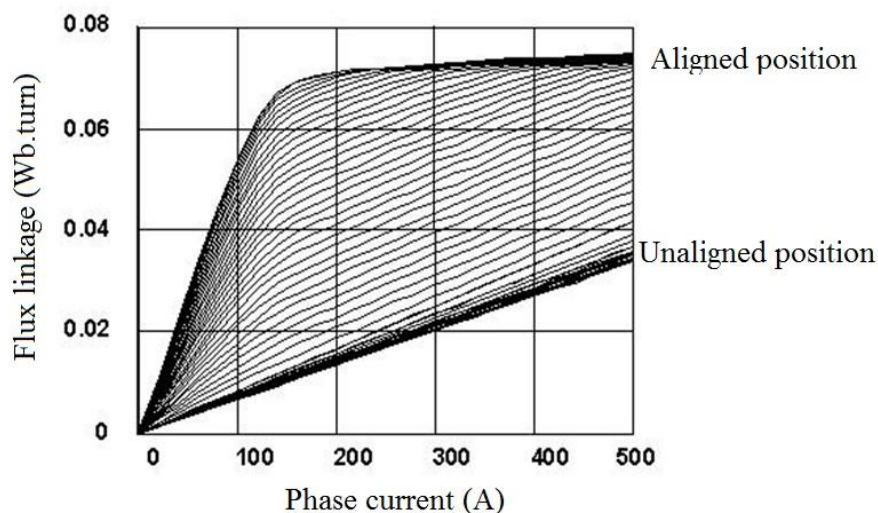
(ب)



(الف)

شکل ۷-۱۷- موقعیت های مهم: (الف) ناهمراستایی کامل، (ب) همراستایی کامل

همانطور که از شکل ۷-۱۷-الف مشاهده می شود، در موقعیت ناهمراستایی کامل بیشترین رلوکتانس (کمترین اندوکتانس فاز) را داریم و به این خاطر هسته به اشباع نمی رود و مشخصه شار پیوندی بر حسب جریان فاز خطی است. در مقابل، برای موقعیت همراستایی کامل (شکل ۷-۱۷-ب)، کمترین رلوکتانس (ماکزیمم اندوکتانس فاز) مشاهده می شود و بنابراین هسته در جریان های بالا می تواند به اشباع برود و مشخصه شار پیوندی بر حسب جریان فاز غیر خطی شود. برای موقعیت های میانی (بین ناهمراستایی کامل و همراستایی کامل) بسته به مقدار همپوشانی قطب ها و جریان، اشباع ممکن است رخ دهد و مشخصه غیرخطی شود. مشخصه استاتیکی شار پیوندی برای موقعیت های مختلف و جریان های فاز متفاوت در شکل ۷-۱۸ برای یک موتور نمونه نشان داده شده است. روش های مختلفی شامل تحلیلی (ریاضی)، اجزاء محدود و اندازه گیری برای تعیین این مشخصه که یکی از مهمترین مشخصه های عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس است مطرح می شود.



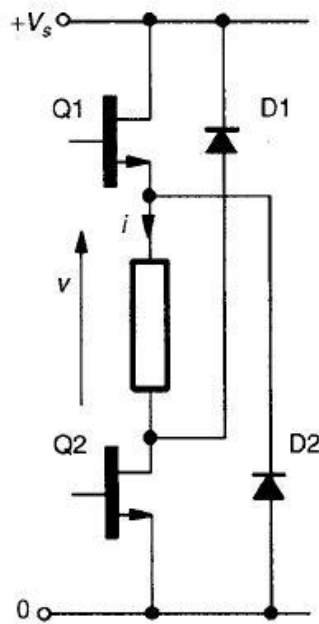
شکل ۷-۱۸- مشخصه استاتیکی شار پیوندی با یک فاز

### ۷-۵-۳- حالت های مختلف کنترلی

همانطور که در فصل قبل اشاره شده، مدارهای محرک موتور سوئیچ رلوکتانس مشابه آن برای موتور پله ای است. برای نمونه، یک مدار محرک پرکاربرد برای موتور سوئیچ رلوکتانس در شکل ۷-۱۹ نشان داده شده



است. برای اعمال ولتاژ مثبت روی سیم پیچی هنگام تحریک یک فاز، کلیدهای Q1 و Q2 روشن می شوند و به این ترتیب ولتاژ مثبت روی سیم پیچی فاز قرار می گیرد. اگر بخواهیم ولتاژ صفر روی سیم پیچی داشته باشیم بایستی فقط کلید Q1 روشن شود و در این حالت دیود D1 نیز در مدار می آید. برای خاموش کردن فاز و اعمال ولتاژ منفی روی فاز، هر دو کلید قطع می شوند و بنابراین دیودهای D1 و D2 هدایت می کنند.



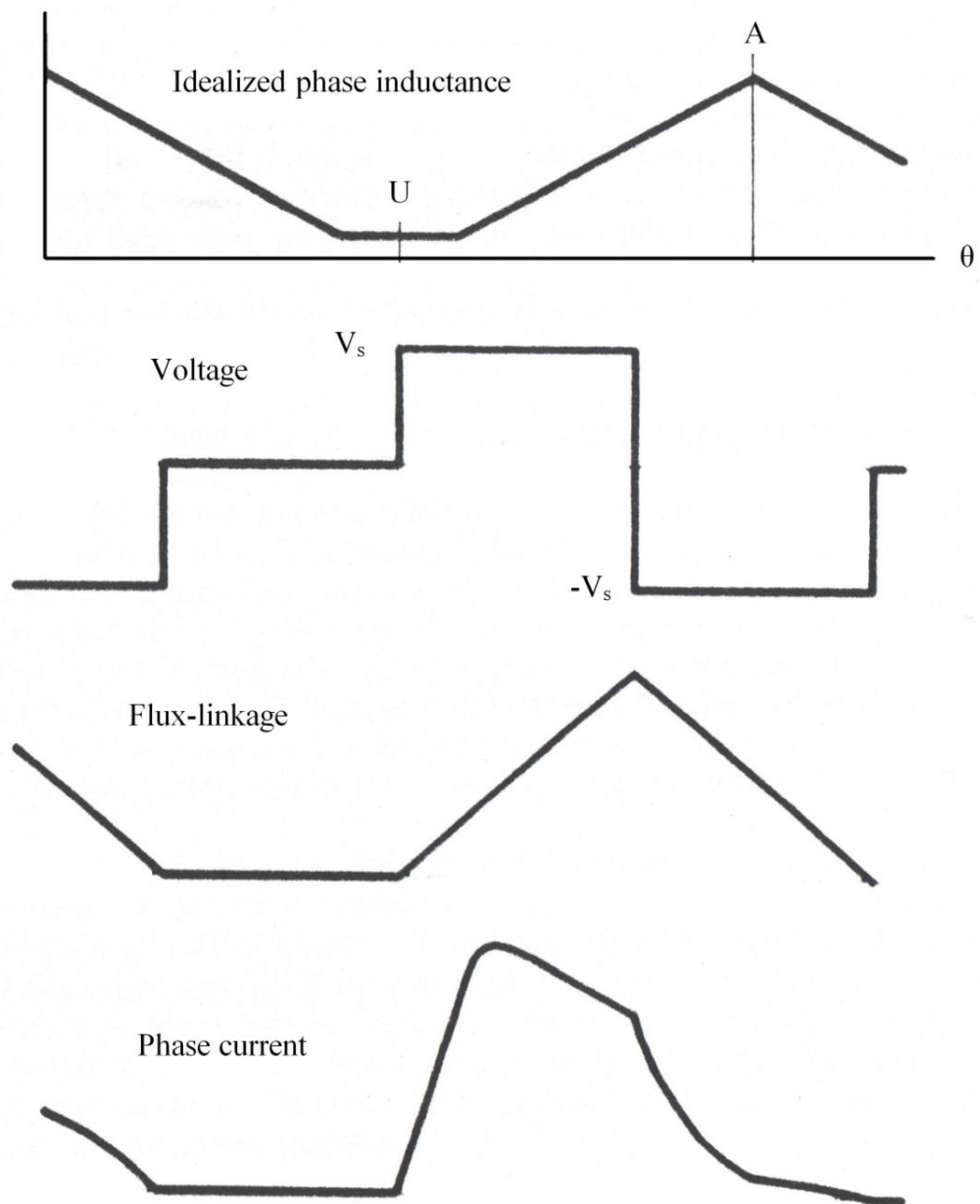
شکل ۷-۱۹- مدار محرک پرکاربرد برای موتور سوئیچ رلوکتانس

به کمک این مدار محرک حالت های کنترلی مختلف برای موتور سوئیچ رلوکتانس امکان پذیر است. دو حالت کنترلی مهم عبارتند از:

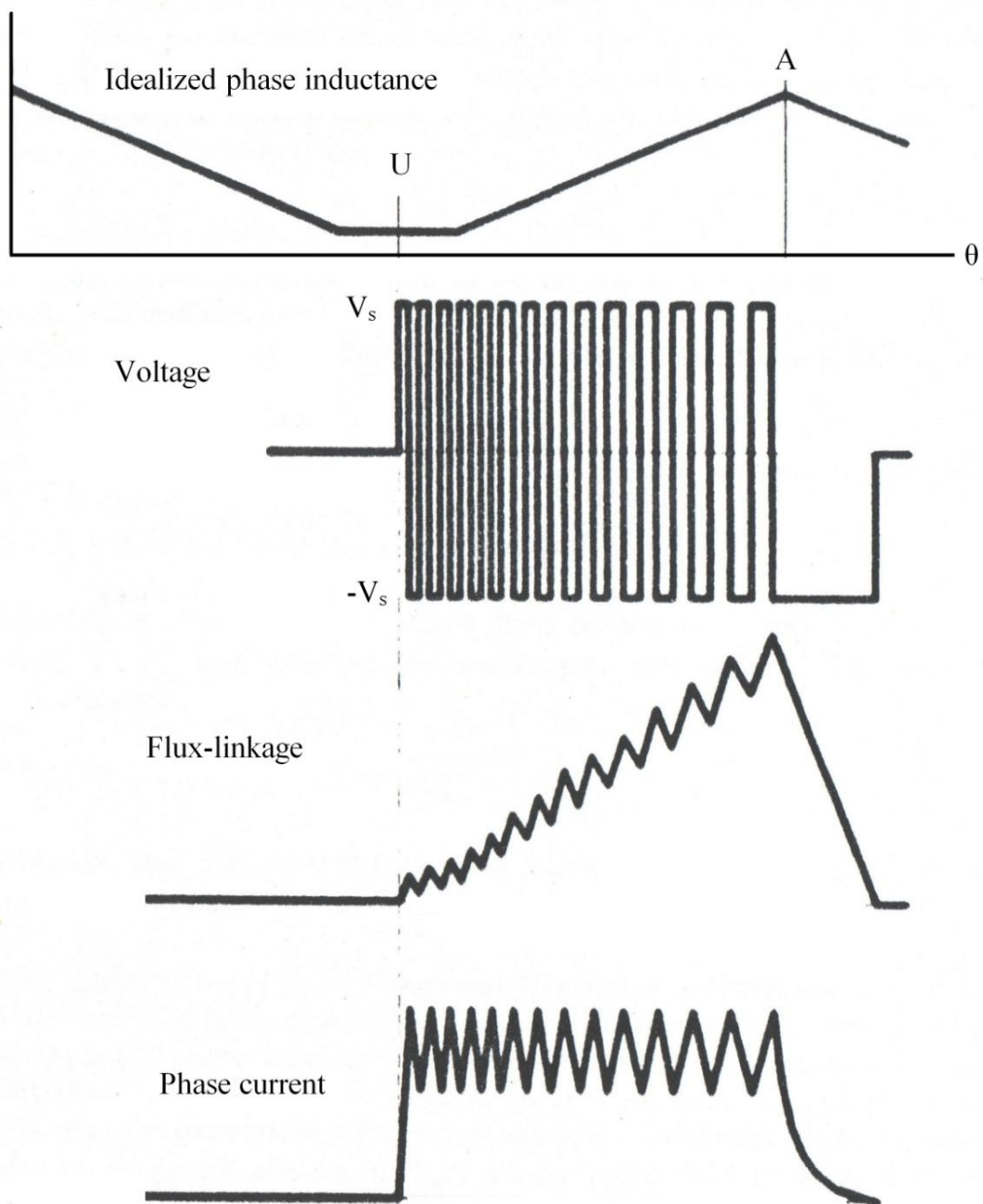
۱- حالت (مود) کنترلی تک پالس (single-pulse control mode)

۲- حالت کنترل جریان (current regulation control mode)

شکل موج های مختلف مربوط به این دو مود کنترلی مهم به ترتیب در شکل های ۷-۲۰ و ۷-۲۱ ارائه شده اند.



شکل ۲۰-۷- شکل موج های مختلف برای مود کنترلی تک پالس



شکل ۷-۲۱- شکل موج های مختلف برای حالت کنترل جریان

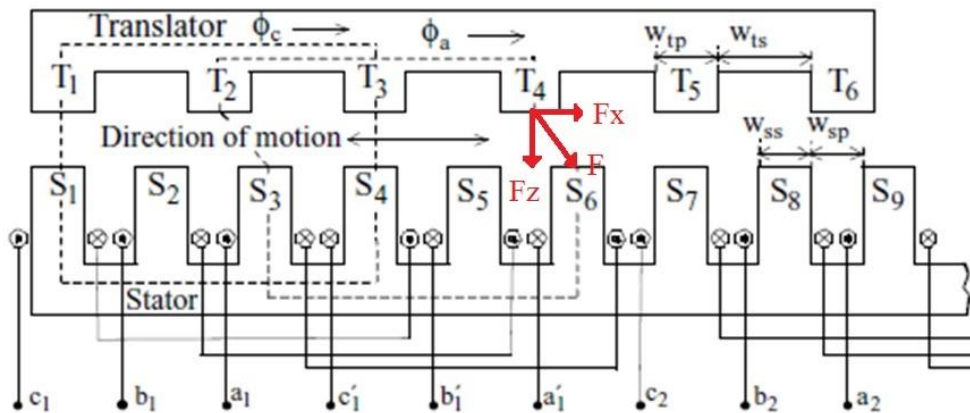
## فصل هشتم :

### Linear motors      موتورهای خطی

در مقایسه با موتورهای دورانی که در آنها چرخش رتور را داریم، در موتورهای خطی قسمت متحرک که با آن Translator گفته می شود دارای حرکت خطی است. مشابه موتورهای دورانی، تنوع موتورهای خطی بسیار زیاد است ولی در اینجا به عنوان نمونه تنها به دو نوع از آنها تحت عنوان موتور سوئیچ رلوکتانس خطی و موتور القایی خطی اشاره می شود.

#### ۸-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس خطی (LSRM) Linear Switched reluctance motor

ساختار یک LSRM سه فاز به همراه سیم پیچی هایش در شکل ۸-۱ نمایش داده شده است. در این ساختار استاتور اکتیو و رتور پسیو است. همانطور که در بالا اشاره شد، به رتور translator گفته می شود. ساختار موتور شامل ۶ قطب روی رتور و n قطب روی استاتور است و معادل یک SRM 6/4 است.

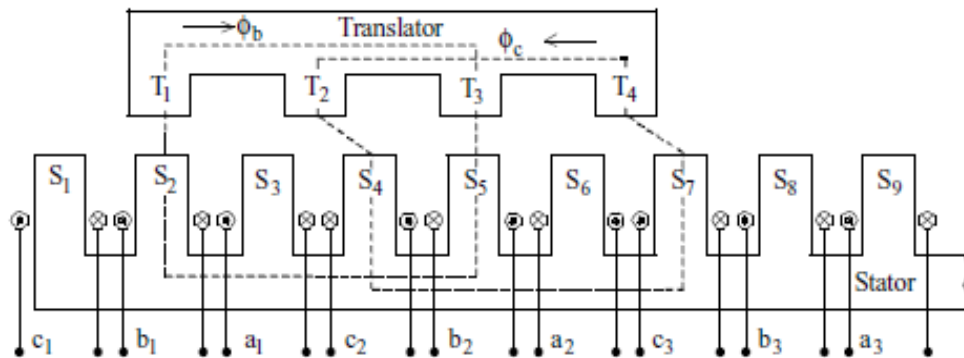


شکل ۸-۱- برش عرضی یک LSRM

یک ناحیه استاتور حاوی ۶ قطب استاتور است و بنابراین تعداد نواحی استاتور ( $N_{sc}$ ) برابر است با:

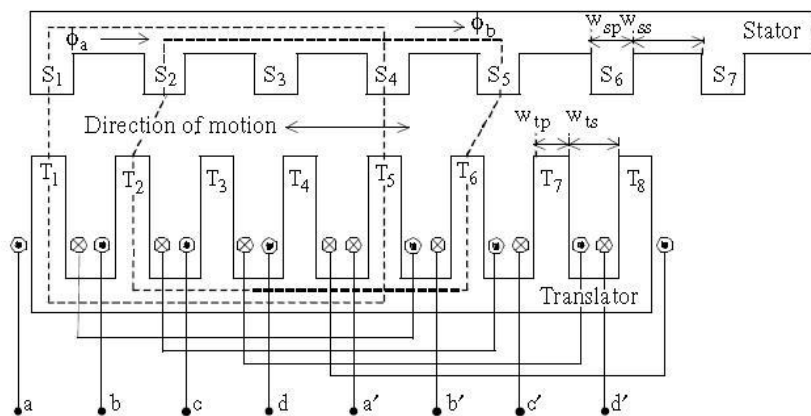
$$N_{sc} = \frac{n}{6}$$

ماشین سوئیچ رلوکتانس دورانی معادل (6/4 SRM) تنها ۴ قطب روی رتور دارد و از این رو به نظر می‌رسد وجود فقط ۴ قطب روی رتور مشابه شکل ۲-۸ کافی باشد. اما این کار باعث معکوس شدن شار در بخشی از رتور و نتیجتاً افزایش تلفات هسته و نویز می‌گردد. بنابراین همان ساختار نشان داده‌شده در شکل ۱-۸ معمولاً برای کاربردهای مختلف مدنظر قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۸- برش عرضی یک LSRM با چهار قطب روی قسمت متحرک

می‌توان تحریک را روی قسمت متحرک (translator) مطابق شکل ۳-۸ قرار داد. با این کار هزینه ساخت بسیار کمتر می‌گردد.

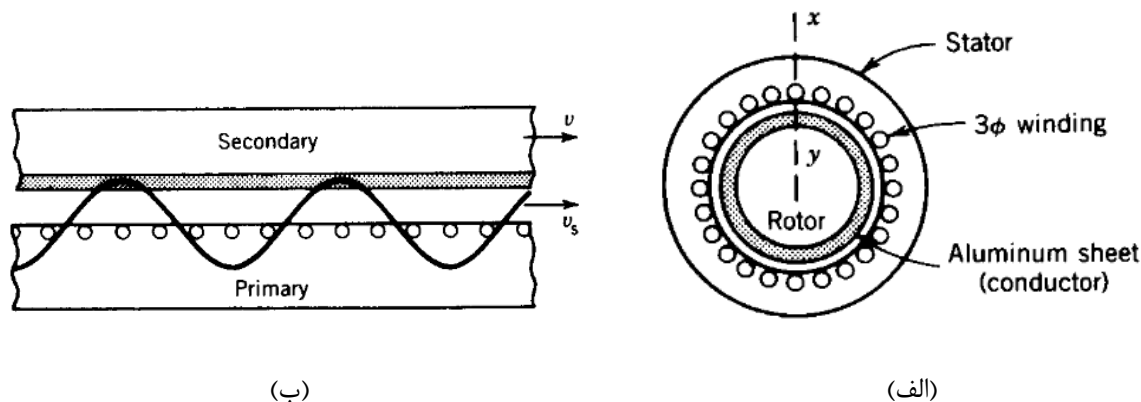


شکل ۳-۸- برش عرضی یک LSRM با سیم پیچی روی قسمت متحرک

## ۲-۸- موتور القایی خطی (LIM)

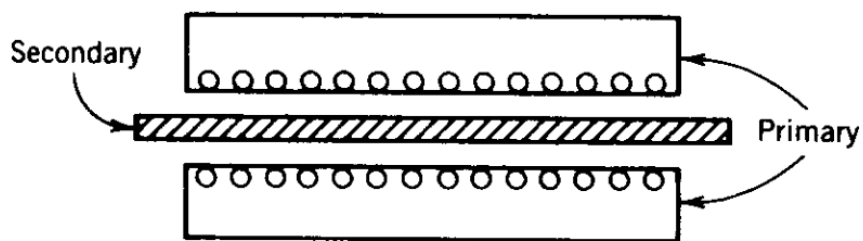
### ۱-۲-۸- ساختار و اصول عملکرد موتور

همانطور که از شکل ۴-۸ مشاهده می شود، اصول عملکرد موتور القایی خطی بسیار شبیه نوع دورانی است.



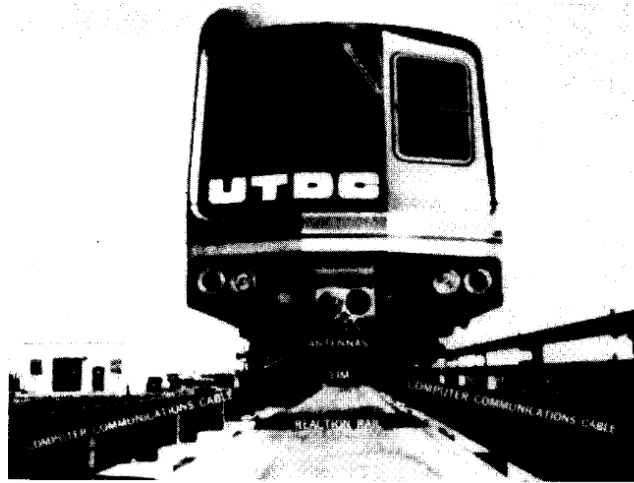
شکل ۴-۸- موتور القایی (الف) نوع دورانی، (ب) نوع خطی

ساختار نشان داده شده در شکل ۴-۸- الف، موتور القایی از نوع یک بر single-side LIM است. موتور می تواند مطابق شکل ۵-۸ نوع دوبر double-side LIM باشد.

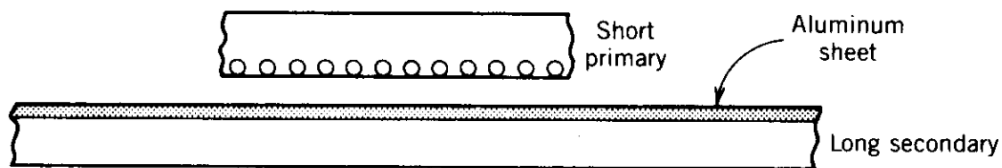


شکل ۵-۸- موتور القایی خطی نوع دوبر

کاربرد مهم موتور القایی خطی در سیستم حمل و نقل است (شکل ۶-۸). برای این کاربرد، معمولاً یک اولیه کوتاه روی قطار و یک ثانویه بلند روی ریل مطابق شکل ۷-۸ انتخاب مناسبی است.



شکل ۸-۶- نمونه عملی استفاده از یک LIM برای کاربرد قطار برقی



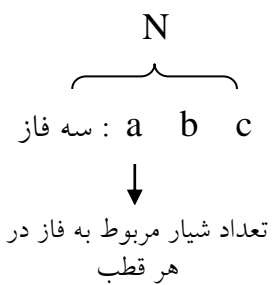
شکل ۸-۷- موتور القایی خطی برای کاربرد سیستم حمل و نقل

### ساختار اولیه در LIM:

۱- استاتور از آهن مورق به خاطر کاهش تلفات فوکو

۲- شیار باز نیمه باز بسته

۳- سیم پیچی: توزیع شده یا متمرکز



← چهار قطب

$$q = \frac{S}{P \times m} : \text{تعداد شیار در هر فاز در هر قطب}$$

در رابطه فوق:

S : تعداد کل شیارها

P : تعداد قطب ها

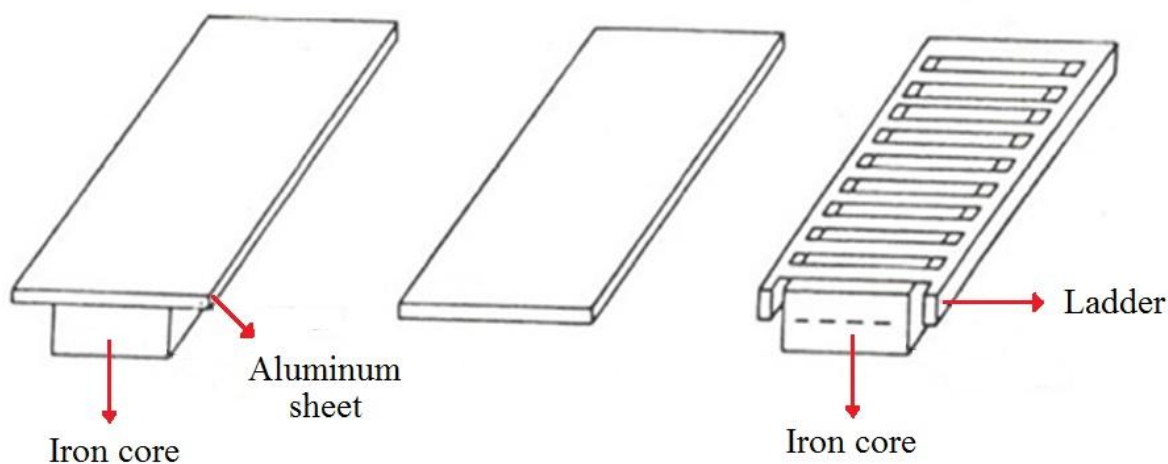
m=3 تعداد فازها

اگر q بزرگتر از دو باشد سیم پیچی نوع توزیع شده است و حرکت نرم تر است.

ساختار ثانویه یک LIM:

✓ هادی آلومینیوم (Al) با ضخامت  $2 - 6\text{mm}$  به صورت ورقه کامل یا نردبانی مطابق شکل ۸-۸

✓ وجود هسته آهنی برای تکمیل مسیر شار در ماشین یک بر



شکل ۸-۸- انواع مختلف ثانویه برای LIM

فاصله هوایی در موتور القایی خطی:

در اینجا، فاصله هوایی حدود  $10\text{mm}$  یا بیشتر در حالی که در نوع دورانی (RIM) در بازه  $1\text{mm}$  است.

فاصله هوایی بزرگ ← افزایش رلوکتانس مسیر شار ← جریان مغناطیس کنندگی زیاد ← کاهش بازده و

ضریب توان پائین.



در اینجا دو نیرو وجود دارد:

✓ نیروی افقی  $F_x$  یا Thrust (نیروی رانش)

✓ نیروی عمودی  $F_n$  از نوع جزیبی می تواند در تعلیق (Levitation) مفید باشد.

رابطه سرعت-لغزش:

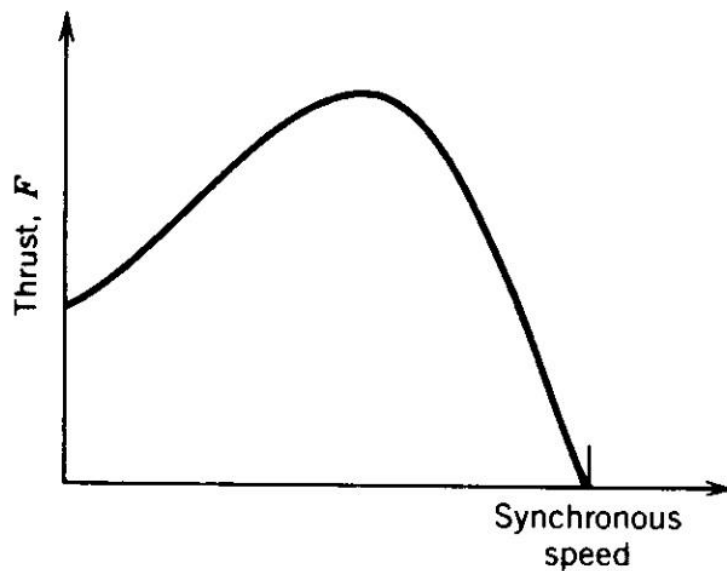
$$v_s = 2 \zeta f \quad (\text{m/s})$$

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

که در آن  $\zeta$  گام قطبی است،  $f$  فرکانس و  $v$  سرعت خطی حرکت موتور است.

و همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود، مشخصه نیروی رانش-سرعت مشابه مشخصه گشتاور-سرعت

در موتور القایی دورانی است.



شکل ۸-۹- مشخصه نیروی رانش-سرعت

### ولتاژ القایی:

تفاوتی با ماشین معمولی ندارد. اگر شار فاصله هوایی به صورت سینوسی در نظر گرفته شود جریان و توزیع سیم پیچی نیز همین طور، داریم:

$$\varphi = \varphi_{max} \sin \omega t \quad \rightarrow \quad e_1(t) = N_1 \frac{d\varphi}{dt} = N_1 \omega \varphi_{max} \cos \omega t$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \varphi_{max}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f \varphi_{max}$$

مقدار مؤثر ولتاژ القایی در استاتور

ولتاژی که در ثانویه القاء می شود وابسته به لغزش است:

$$E_{2s} = s E_2$$

در حالت کار موتوری ( $s < 1$ ) داریم:

$$I'_2 = \frac{s E'_2}{|Z'_2(s)|} = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2)^2}}$$

جریان ثانویه ارجاع داده شده به اولیه

مشابه موتور القایی دورانی، نیروی رانش می تواند از روی توان عبوری از فاصله هوایی نتیجه شود:

$$F_x = \frac{P_{ag}}{v_s} = \frac{3 I'^2_2 R'_2 / s}{v_s}$$

### نیروی عمودی

در حالت وجود ثانویه آهنی دو نیروی عمودی وجود دارد و  $F_z = F_{za} - F_{zr}$  که در آن:

یک آهن ربا، آهن را جذب می کند  $F_{za}$ : نیروی جاذبه الکترومغناطیسی  $\rightarrow$

(attraction force)

اعمال نیرو بین دو هادی حامل جریان  $F_{zr}$ : نیروی دافعه لورنتز  $\rightarrow$

(repulsion force)

روابط توان:

تعداد فازها  
↑  
توان ورودی :  $P_{in} = m_1 V_1 I_1 \cos\varphi$

توان خروجی :  $P_{out} = F_x v$

راندمان یا بازده :  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{F_x v}{m_1 V_1 I_1 \cos\varphi}$