

$$P_{ag} = \frac{11940}{1-0.04} = 12,437.5 \text{ W}$$

$$P_r = 0.04 \times 12,437.5 = 497.5 \text{ W}$$

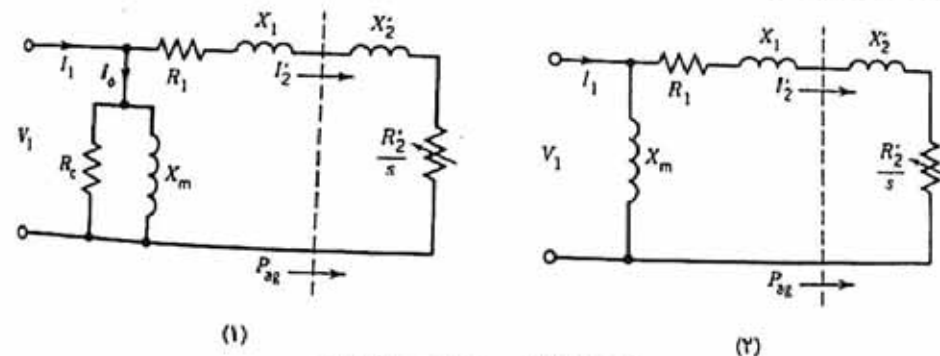
ج: براحتی داریم:

۵-۷-۴- معرفی چند مدار معادل تقریبی و ساده برای موتورهای القایی سه فاز

مدار معادل نشان داده شده در شکل (۵ و ۱۳-۵) یک مدل نسبتاً کامل و جامع است و برای هر فاز موتور در حالت ماندگار (مانا) ۱ صادق می‌باشد. این مدار در حقیقت یک مدار RL بوده که نسبتاً پیچیده نیز می‌باشد. لذا برای تحلیل موتورها، مدارهای ساده‌تری نیز پیشنهاد شده است.

مدار معادل تقریبی ۲

در شکل (۵ و ۱۳-۵) اگر از افت ولتاژ در R_1 و X_1 چشم‌پوشی شود و E_1 و V_1 را تقریباً مساوی بگیریم، در این صورت می‌توان شاخه‌های موازی که به شاخه‌های مغناطیس‌کنندگی ۳ موسوم‌اند، را به ابتدای مدار معادل منتقل نمود و به شکل (۱ و ۱۴-۵) دست یافت. می‌بینیم تحلیل این مدار RL بسیار ساده است. باید دانست اگر V_1 (ولتاژ تغذیه) و f_1 (فرکانس منبع تغذیه) ثابت باشند، تلفات هسته استاتور که توسط R_c مدل می‌شود، عددی ثابت خواهد بود. در شرایط بی‌باری که موتور بارمکانیکی خاصی را نمی‌چرخاند، سرعت موتور (سرعت محور) خیلی به سرعت سنکرون نزدیک است، لذا در شرایط بی‌باری لغزش بسیار کم و فرکانس رتور (f_2) نیز بسیار ناچیز است و با بالمال می‌توان از تلفات هسته رتور چشم‌پوشی نمود. در سرعت‌های کمتر (لغزش بیشتر) فرکانس رتور f_2 افزون‌تر می‌شود و تلفات هسته رتور زیاد می‌گردد. اما عمدتاً موتورها در لغزش کم کار می‌کنند و لذا f_2 عددیست کوچک. به همین منظور در تحلیل موتورها عمدتاً از تلفات هسته رتور صرف نظر می‌گردد. گفتمنی است در صورتیکه V_1 (ولتاژ تغذیه) و f_1 (فرکانس منبع تغذیه) ثابت باشند، مجموع تلفات هسته استاتور، تلفات تپوید و تلفات اصطکاک معمولاً عددی ثابت است و در سرعت‌های گوناگون آن چنان تغییر

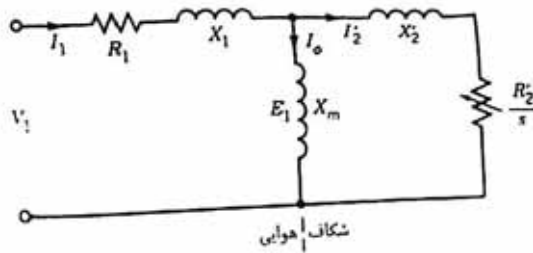


شکل ۵-۱۴ مدارهای معادل تقریبی

1- Steady state

3- Magnetis...

2- Approximate Equivalent Circuit



شکل ۵-۱۵ مدار معادل پیشنهادی توسط IEEE

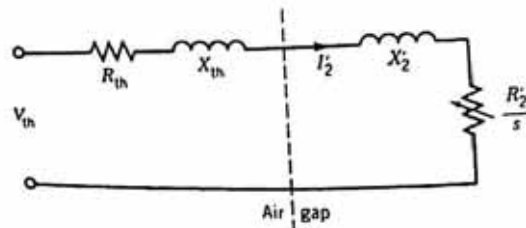
نمی‌کند. لذا می‌توان کل این سه تلفات (هسته، تهویه، اصطکاک) را یک کاسه کرده و به آن تلفات ثابت^۱ ماشین با تلفات چرخشی^۲ اطلاق می‌کنیم (P_{Rot}). در این صورت می‌توان R_c را از مدار معادل حذف نمود و به شکل (۲-۵ و ۱۴) رسید.

مدار معادل پیشنهادی IEEE

در موتورهای القایی سه فاز بخاطر وجود شکاف هوایی بین رتور و استاتور جریان تحریک (I_m) زیاد است و حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان اسمی را شامل می‌شود. همچنین راکتانس نشتی استاتور (X_1) نیز عددی نسبتاً بزرگ است. در چنین شرایطی انجمن مهندسیین برق و الکترونیک آمریکا (IEEE) پیشنهاد می‌نماید که بردن X_1 به ابتدای مدار معادل کار آنچنان پسندیده‌ای نیست و بهتر است از مدار معادل شکل (۵-۱۵) یاری گرفته بد در مدار IEEE نیز از R_c خبری نیست و تلفات هسته استاتور با تلفات تهویه و اصطکاک به صورت یک سه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۵ مدار معادل تونن^۳

سهولت محاسبات در مدار معادل IEEE بهتر است از روش تونن استفاده گردد. به عبارت دیگر بجای اداء V_1 ، R_1 ، X_1 ، X_m می‌توان از V_{th} ، R_{th} ، X_{th} استفاده نمودار (شکل ۵-۱۶) باید دانست:



شکل ۵-۱۶ مدار معادل تونن

$$V_{th} = \frac{X_m}{[R_1^2 + (X_1 + X_m)^2]^{1/2}} V_1 \quad (۴۵-۵)$$

اگر $R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2$ باشد که معمولاً نیز همینطور است، داریم:

$$V_{th} \approx \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1 \quad (۴۵-۵ و ۱)$$

$$= K_{th} V_1 \quad (۴۵-۵ و ۲)$$

امیدانس تونن به قرار زیر است:

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \\ = R_{th} + jX_{th}$$

اگر $R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2$ باشد، داریم:

$$R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1 \quad (۴۶-۵)$$

$$= K_{th}^2 R_1 \quad (۴۶-۵ و ۱)$$

اما معمولاً $X_1 \ll X_m$ است. پس:

$$X_{th} = X_1 \quad (۴۷-۵)$$

پس به طور کلی می‌توان برای موتورهای القایی سه فاز مدل‌های متفاوتی ارائه داد و باید دانست این مدل‌ها برای هر فاز ۱ موتور معتبر است. این مدل‌ها که در حالت ماندگار (مانا) معتبراند به قرار زیراند:

الف: مدل دقیق یا مدل T (شکل ۵ و ۱۳-۵)

ب: مدل تقریبی یا مدل L (شکل ۱ و ۱۴-۵)

ج: مدل تقریبی یا مدل L ساده (شکل ۲ و ۱۴-۵)

د: مدل $IEEE$ (شکل ۵-۱۵).

ه: مدل تونن مربوط به مدل $IEEE$ (شکل ۵-۱۶).

۵-۸- آزمایش‌های بی‌باری و رتور قفل شده جهت تعیین پارامترهای موتور القایی سه‌فاز

پارامترهای مدار معادل موتور القایی سه‌فاز از قبیل $R_1, R_2, X_1, X_2, X_m, R_c$ از آزمایش‌های زیر حاصل می‌شوند:

الف: آزمایش بی‌باری $(NLT)^2$

ب: آزمایش رتور قفل شده 3 یا رتور مسدود شده 4 (LRT یا BRT).

ج: آزمایش DC^5 بر روی سیم‌پیچ استاتور.

آزمایش بی‌باری (NLT) در موتورهای القایی شبیه آزمایش بی‌باری یا مدار باز در ترانسفورماتور هستند.

این آزمایش می‌توان به اطلاعاتی درباره جریان تحریک (I_m) در موتور و تلفات چرخشی (P_{Rot}) پی‌برد. در این آزمایش استاتور به شبکه‌ای با ولتاژ فرکانس اسمی وصل می‌شود و هیچ‌گونه بار مکانیکی به محور اعمال نمی‌شود. در این صورت توان ورودی به موتور مجموع تلفات هسته استاتور، تلفات تپه‌ویه و اصطکاک (P_{Rot}) و تلفات مسی رتور و استاتور خواهد بود. در بی‌باری تلفات مسی رتور ناچیز است (چرا؟). لذا در بی‌باری توان ورودی معادل مجموع تلفات مسی استاتور و P_{Rot} است. تلفات چرخشی موتور بوده و به قرار زیر است.

$$P_{Rot} = \text{تلفات هسته استاتور} + \text{تلفات اصطکاک و تپه‌ویه}$$

پس با انجام آزمایش بی‌باری می‌توان به P_{Rot} پی‌برد. ما P_{Rot} را در تمامی شرایط حتی شرایط بار داری معادل P_{Rot} در شرایط بی‌باری در نظر می‌گیریم و به آن تلفات ثابت ماشین^۱ نیز اطلاق می‌کنیم.

از آزمایش رتور قفل شده که مشابه آزمایش اتصال کوتاه در ترانسفورماتور است، می‌توان به بسیاری از پارامترهای موتور پی‌برد. در این آزمایش رتور را قفل یا مسدود می‌کنیم تا بچرخد. به استاتور باید ولتاژی اعمال گردد بنحوی که شرایط کار عادی رتور از قبیل جریان و فرکانس فراهم شود. فی‌المثل در شرایط کار عادی انتظار داریم که جریان و فرکانس رتور کم باشد، لذا باید به استاتور ولتاژ کمی اعمال شود تا جریان کمی برای رتور حاصل شود. از آنجایی که در حالت رتور قفل شده فرکانس رتور و استاتور مشابه است (چرا؟)، و می‌خواهیم فرکانس رتور کم باشد، لذا فرکانس منبع تغذیه استاتور نیز باید نسبت به فرکانس اسمی کاهش یابد. طبق استاندارد IEEE فرکانس منبع تغذیه در این آزمایش ۲۵ درصد فرکانس اسمی است. در این آزمایش می‌توان به راکتانس نشتی ماشین پی‌برد. از آنجایی که این راکتانس‌ها در فرکانس اسمی حاصل نمی‌شود، لذا پس از به دست آوردن آنها باید با یک تناسب ساده، مقدار راکتانس‌ها را در فرکانس اسمی (X_1) حساب نمود. نکته است در ماشین‌های با قدرت کمتر از ۲۰ اسب بخار اثر فرکانس در آزمایش رتور قفل شده انچنان مشهود نیست و می‌توان این آزمایش را با فرکانس اسمی انجام داد.

جهت پیدا کردن مقاومت استاتور (R_1) از آزمایش DC که معرف خولندگان عزیز است استفاده می‌شود. ذکر یک مثال موضوع را بیشتر روشن می‌کند.

مثال ۵-۳

یک موتور القایی سه فاز قفس سنجابی با مشخصات زیر مفروض است:

(خط - خط) ولت = ۲۲۰۰ = ولتاژ اسمی

اسب بخار = ۶۰ = توان اسمی

هرتز = ۶۰ = فرکانس اسمی

۶ = تعداد قطب‌ها

۱- نتایج آزمایش بی‌باری به قرار زیر است:

(خط - خط) ولت = ۲۲۰۰ = ولتاژ منبع تغذیه

هرتز = ۶۰ = فرکانس منبع تغذیه

آمبر ۴/۵ = جریان خط ۱
 وات ۱۶۰۰ = توان ورودی ۲ به موتور

۲- نتایج آزمایش رتور قفل شده بشرح زیر است

هرتز ۱۵ = فرکانس منبع تغذیه
 (خط - خط) ولت ۲۷۰ = ولتاژ منبع
 آمپر ۲۵ = جریان خط

وات ۹۰۰۰ = توان ورودی به موتور

۳- طبق آزمایش DC مقدار متوسط مقاومت هر فاز استاتور به قرار زیر است:

$$R_1 = 2/8 \Omega$$

الف: تلفات چرخشی (P_{Rot}) را در شرایط بی‌باری حساب کنید.

ب: پارامترهای مدار IEEE (شکل ۵-۱۵) را به دست آورید.

ج: پارامترهای مدار تونن (شکل ۵-۱۶) را به دست آورید.

حل

الف: طبق آزمایش بی‌باری توان ورودی به ماشین به قرار زیر است:

$$P_{NL} = 1600 W$$

لذا P_{Rot} به قرار زیر است:

$$P_{Rot} = P_{NL} - 3I_1^2 R_1$$

$$= 1600 - 3 \times 4/5^2 \times 2/8$$

$$= 1429/9 W$$

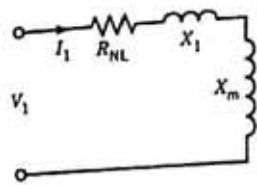
P_{Rot} تلفات چرخشی ماشین است

ب: اکنون مدار IEEE (شکل ۵-۱۵) را در نظر می‌گیریم. در شرایط بی‌باری لغزش بسیار کوچک است و لذا R_1'/S عددی بزرگ می‌باشد. لذا در مدل IEEE امپدانس معادل دو شاخه zX_m و $R_1'/S + jzX_1'$ تقریباً همان zX_m خواهد بود (چرا؟). پس مدار معادل IEEE در حالت بی‌باری مطابق شکل (ت و ۱ و ۳-۵) می‌شود. با توجه به این شکل در حالت بی‌باری می‌توان گفت:

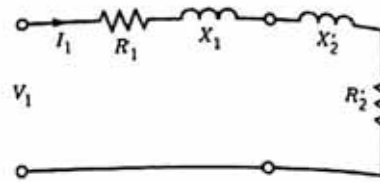
$$V_1 = \frac{2200}{\sqrt{3}} = 1270/2 V/phase$$

$$Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{1270/2}{4/5} = 282/27 \Omega$$

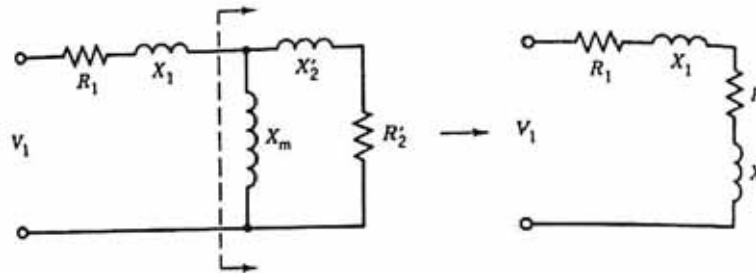
$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_1^2} = \frac{1600}{3 \times 4/5^2} = 26/34 \Omega$$



مدار معادل بی باری براساس شکل ۱۵-۵ (۱)



مدار معادل در حالت رتور قفل شده براساس شکل ۱۵-۵ (۲)



مدار معادل در حالت رتور قفل شده جهت بهبود مقدار R_2' (۳)

شکل ت و ۳-۵

$$\begin{aligned} X_{NL} &= (Z_{NL}^T - R_{NL}^T)^{1/2} \\ &= (282/27^T - 26/34^T)^{1/2} \\ &= 281/0 \Omega \end{aligned}$$

بن:

$$X_1 + X_m = X_{NL} = 281/0 \Omega$$

در آزمایش رتور قفل شده با توجه به مدل IEEE دو شاخه jX_m و $R_2'/s + jX_2'$ با هم موازی گشته و می‌دانیم $s=1$ است. در این حالت معمولاً داریم:

$$|X_m| \gg |R_2' + jX_2'|$$

پس در این آزمایش می‌توان از شاخه X_m صرف نظر کرد و به مدار شکل (ت و ۳ و ۵) رسید. با توجه به این شکل داریم:

$$\begin{aligned} R_{BL} &= \frac{P_{BL}}{I_1^T} \\ &= \frac{9000}{3 \times 25^T} = 4/8 \Omega \end{aligned}$$

$$R_2' = R_{BL} - R_1 = 4/8 - 2/8 = 2 \Omega$$

در فرکانس ۱۵ هرتز داریم:

$$Z_{BL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{270}{\sqrt{3} \times 25} = 6/24 \Omega$$

$$X_{BL} = (6/24^2 - 4/8^2)^{1/2} = 3/98 \Omega$$

در فرکانس ۶۰ هرتز داریم:

$$X_{BL} = 3/98 \times \frac{60}{15} = 15/92 \Omega$$

$$X_{BL} = X_1 + X'_r$$

با تقریب خوب داریم:

$$X_1 = X'_r = \frac{15/92}{2} = 7/96 \Omega \text{ (در فرکانس ۶۰)}$$

پس:

$$X_m = 281/0 - 7/96 = 273/04 \Omega$$

مقاومت رتور (R'_r) نقش مهمی در عملکرد موتور بازی می‌کند. IEEE نحوه پیدا کردن دقیق R'_r را این چنین توصیه می‌کند.

مقاومت سیستم در حالت رتور قفل شده (R_{BL}) از مجموع R_1 و یک مقاومت دیگر به نام R حاصل می‌شود. R مقاومت معادل دو شاخه X_m و X'_r و R'_r است (شکل ت و ۳ و ۳-۵). پس:

$$R = \frac{X_m^2}{R'_r + (X'_r + X_m)^2} R'_r$$

اما عمدتاً $X'_r + X_m \gg R'_r$ است. پس:

$$R = \left(\frac{X_m}{X'_r + X_m} \right)^2 R'_r$$

$$R'_r = \left(\frac{X'_r + X_m}{X_m} \right)^2 R$$

اما:

$$R = R_{BL} - R_1 = 4/8 - 2/8 = 2 \Omega$$

پس:

$$R'_r = \left(\frac{7/96 + 273/04}{273/04} \right)^2 \times 2 = 2/12 \Omega$$

ت: از معادله (۴۵-۵) داریم:

$$V_{th} = \frac{273/0.4}{7/96 + 273/0.4} V_1$$

$$= 0.97 V_1$$

رابطه (۱) و (۴۶-۵) داریم:

$$R_{th} = 0.97^2 R_1 = 0.97^2 \times 2/8 = 2/63 \Omega$$

معادله (۴۷-۵) داریم:

$$X_{th} \approx X_1 = 7/96 \Omega$$

۱-۱- مشخصه‌های موتورهای القایی سه فاز

در بخش قبل راجع به مدار معادل موتور القایی سه فاز بحث کردیم. این مدار معادل ما را یاری می‌دهد تا به مشخصه‌های ماشین بی‌بهریم. فی‌المثل می‌توان با توجه به مدار معادل در حالت مانا (ماندگار) به بازده^۱، زیاده^۲، ضریب توان^۳، گشتاور راه انداز^۴، گشتاور ماکزیمم^۴ (بیشینه) که به گشتاور پرتگاهی^۵ موسوم است و بیاری از مشخصه‌های دیگر دست یابیم. گشتاور مکانیکی حاصله^۶ توسط هر فاز موتور این چنین به دست می‌آید.

$$P_{mech} = T_{mech} \omega_{mech} = I_r^2 \frac{R_r}{s} (1-s) \quad (48-1)$$

$$\omega_{mech} = \frac{2\pi n}{60} \quad (48-2)$$

سرعت موتور (محور) بر حسب دور در دقیقه (rpm) است. رابطه سرعت مکانیکی (سرعت چرخش) با سرعت سنکرون به قرار زیر است (چرا؟).

$$\omega_{mech} = (1-s)\omega_{syn}$$

$$= \frac{n_{syn}}{60} 2\pi(1-s) \quad (49-2)$$

باید دانست:

$$\omega_{syn} = \frac{120f}{p60} \times 2\pi = \frac{4\pi f_1}{p} \quad (50-2)$$

رابطه (۱) و (۴۰-۵)، (۴۸-۵) و (۴۹-۵) داریم:

$$T_{mech} \omega_{syn} = I_r^2 \frac{R_r}{s} = P_{ag} \quad (51-2)$$

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} P_{ag} \quad (52-5)$$

$$= \frac{1}{\omega_{syn}} I_r^T \frac{R_r}{s} \quad (52-5) \text{ و } (1)$$

$$= \frac{1}{\omega_{syn}} I_r^T \frac{R_r'}{s} \quad (53-5)$$

از مدار معادل تونن (شکل ۵-۱۶) و معادله (۵۲-۵) داریم:

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^T}{(R_{th} + R_r'/s)^T + (X_{th} + X_r')^T} \frac{R_r'}{s} \quad (54-5)$$

اگر از مدار شکل (۵-۱۴) برای محاسبه I_r^T استفاده شود، در این صورت باید در معادله (۵۴-۵) تغییرات زیر را انجام داد تا گشتاور مکانیکی حاصل شود:

۱- به جای V_{th} از V_1 استفاده شود.

۲- به جای R_{th} باید R_1 جایگزین گردد.

۳- به جای X_{th} باید از X_1 استفاده گردد.

باید دانست اگر گشتاور مکانیکی توسط مدار معادل شکل (۵-۱۴) محاسبه شود، در این صورت ۵ درصد با گشتاور محاسبه شده توسط مدل‌های شکل (۵-۱۵) و شکل (۵-۱۶) تفاوت خواهد داشت. رابطه (۵۴-۵) مربوط به هر فاز موتور است. لذا اگر این رابطه سه برابر شود، کل گشتاور حاصله توسط موتور به دست می‌آید شکل (۵-۱۷) تغییرات گشتاور (کل گشتاور) بر حسب سرعت یا لغزش را نشان می‌دهد. در شرایط لغزش کم داریم:

$$R_{th} + \frac{R_r'}{s} \gg X_{th} + X_r' \quad \text{و} \quad \frac{R_r'}{s} \gg R_{th}$$

پس:

$$T_{mech} \approx \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^T}{R_r'} s \quad (55-5)$$

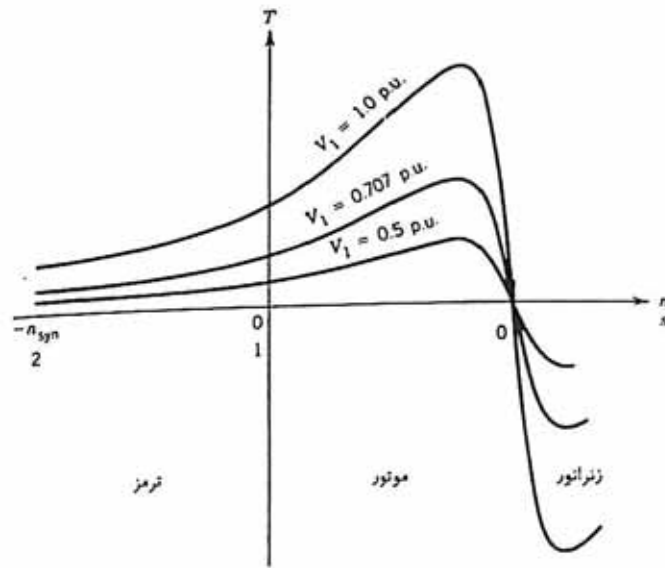
رابطه اخیر نشان می‌دهد که در لغزش کم تغییرات گشتاور نسبت به لغزش خطی است و در شکل (۵-۱۷) این تغییرات خطی در حول سرعت سنکرون مشهود است. اگر لغزش زیاد باشد داریم:

$$R_{th} + \frac{R_r'}{s} \ll X_{th} + X_r'$$

و:

$$T_{mech} \approx \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^T}{(X_{th} + X_r')^T} \frac{R_r'}{s} \quad (56-5)$$

می‌بینیم در این ناحیه گشتاور با معکوس لغزش متناسب است و این امر در شکل (۵-۱۷) در حول $s=1$ مشهود است. از رابطه (۵۴-۵) درمی‌یابیم که گشتاور با مجذور V_{th} و با مال V_1 متناسب است. شکل (۵-۱۷) منحنی



شکل ۱۷-۵ تغییرات گشتاور موتور القایی سه فاز بر حسب سرعت یا لغزش در تحت ولتاژهای مختلف به این منحنی‌ها مشخصه‌های گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش گفته می‌شود.

گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش را در تحت ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد و به این منحنی‌ها، مشخصه‌های گشتاور سرعت^۱ یا گشتاور لغزش نیز گفته می‌شود. به این مشخصه‌ها به اختصار مشخصه $T-s$ یا مشخصه $T-s$ نیز اطلاق می‌شود. برای پی بردن به گشتاور ماکزیمم (گشتاور بیشینه یا گشتاور پرتگاهی) این چنین عمل می‌کنیم:

$$dT/ds = 0$$

با نتیجه به رابطه (۵۴-۵) و اعمال شرط فوق داریم:

$$\frac{R'_r}{sT_{max}} = [R_{th}^2 + (X_{th} + X'_r)^2]^{1/2} \quad (57-5)$$

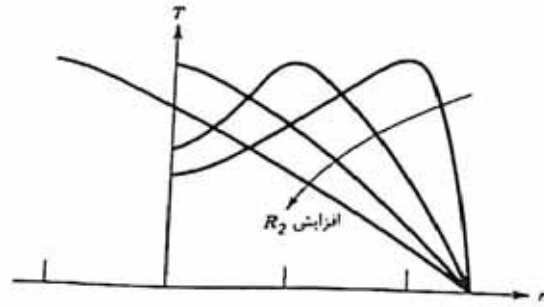
به سیمولت داریم:

$$sT_{max} = \frac{R'_r}{[R_{th}^2 + (X_{th} + X'_r)^2]^{1/2}} \quad (58-5)$$

از معادلات (۵۴-۵) و (۵۸-۵) داریم:

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + [R_{th}^2 + (X_{th} + X'_r)^2]^{1/2}} \quad (59-5)$$

در روابط اخیر T_{max} قله مشخصه گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش^۲ تحت ولتاژی مفروض بوده و sT_{max} لغزشی



شکل ۵-۱۸ اثر تغییرات مقاومت رتور بر مشخصه گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش

است که تحت آن T_{max} رخ می‌دهد. دقت کنید که T_{max} در رابطه (۵۹-۵) مربوط به هر فاز موتور و برای پیدا کردن کل گشتاور ماکزیمم، باید رابطه (۵۹-۵) را سه برابر نمود. با توجه به نکات فوق درمی‌یابیم که:

الف: sT_{max} تابعی از مقاومت رتور است.

ب: T_{max} تابعی از مقاومت رتور نمی‌باشد.

لذا اگر مقاومت رتور را تغییر دهیم، مشخصه‌هایی همچون شکل (۵-۱۸) حاصل می‌شود. این امر در موتورهای با رتور سیم‌بندی شده میسر است، زیرا از طریق حلقه‌های لغزان می‌توان به هر فاز رتور رنوستای متغیر اضافه نمود و مقاومت رتور را تغییر داد. معمولاً رسم بر آن است که مقاومت رنوستا را طوری تنظیم می‌کنند که گشتاور ماکزیمم (T_{max}) در لحظه راه‌اندازی رخ دهد، تا موتور با گشتاور قابل ملاحظه‌ای شتاب گیرد. پس از فزونی سرعت رنوستا را به تدریج از مدار خارج می‌کنند.

اگر مقاومت استاتور (R_1) کوچک باشد، لذا R_{th} نیز ناچیز شده و از روابط (۵۸-۵) و (۵۹-۵) داریم:

$$sT_{max} \approx \frac{R'_r}{X_{th} + X'_r} \quad (۶۰-۵)$$

$$T_{max} \approx \frac{1}{\sqrt{\omega_{syn}}} \frac{V_{th}^2}{X_{th} + X'_r} \quad (۶۱-۵)$$

از روابط (۵۴-۵) و (۵۹-۵) داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{(R_{th} + R'_r/s)^2 + (X_{th} + X'_r)^2}{(R_{th} + R'_r/sT_{max})^2 + (X_{th} + X'_r)^2} \frac{s}{sT_{max}} \quad (۶۲-۵)$$

اگر R_1 و بالمال R_{th} ناچیز باشند، داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} \approx \frac{(R'_r/s)^2 + (X_{th} + X'_r)^2}{(R'_r/sT_{max})^2 + (X_{th} + X'_r)^2} \frac{s}{sT_{max}} \quad (۶۳-۵)$$

از معادلات (۶۰-۵) و (۶۳-۵) داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{(R'_r/s)^2 + (R'_r/s T_{max})^2}{2(R'_r/s T_{max})^2} \times \frac{s}{s T_{max}} \quad (۶۴-۵)$$

$$= \frac{s^2 T_{max} + s^2}{2s T_{max} s}$$

باید دانست گشتاور T در لغزش s و گشتاور T_{max} در لغزشی $s T_{max}$ رخ می‌دهد. در حقیقت رابطه (۶۴-۵) گشتاور موتور را در شرایطی خاص با گشتاور ماکزیمم (بیشینه) مقایسه می‌کند.

جریان استاتور

از مدل شکل (۱۵-۵) امیدانس ورودی را به دست می‌آوریم.

$$Z' = R_1 + jX_1 + X_m // \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_r \right) \quad (۶۵-۵)$$

$$= R_1 + jX_1 + X_m // Z'_r$$

$$= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R'_r/s + jX'_r)}{R'_r/s + j(X_m + X'_r)} \quad (۶۵-۵ و ۱)$$

$$= |Z_1| \angle \theta_1 \quad (۶۵-۵ و ۲)$$

جریان استاتور به قرار زیر است (شکل ۱۵-۵).

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\phi + I'_r \quad (۶۵-۵ و ۳)$$

می‌دانیم محدوده لغزش موتور این چنین است

$$0 < s \leq 1$$

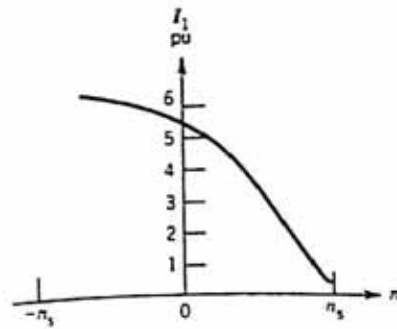
اگر فرض کنیم سرعت موتور همان سرعت سنکرون باشد (البته اینطور نیست)، در این صورت $s = 0$ بوده و R'_r/s بی‌نهایت می‌شود. در نتیجه I'_r صفر می‌گردد (شکل ۱۵-۵).

$$I_1 = I_\phi$$

هرچه لغزش بیشتر شود در این صورت $R'_r/s + jX'_r$ کمتر شده و لذا I'_r و I_1 زیاد می‌شوند (شکل ۱۵-۵). در لحظه راه‌اندازی ($s = 1$) جریان استاتور که به جریان راه‌اندازی^۱ معروف است، پنج تا هشت برابر جریان اسمی خواهد بود. شکل (۱۹-۵) تغییرات جریان استاتور بر حسب سرعت را نشان می‌دهد. جریان در این شکل در سیستم یکایی (پرینیت) بیان شده است و جریان مبنا همان جریان اسمی موتور است.

ضریب توان ورودی

با توجه به شکل (۱۵-۵) درمی‌یابیم که با تغییر لغزش موتور امیدانس‌های گوناگون از خود بروز می‌دهد و لذا زاویه بین V_1 ، I_1 تغییر می‌کند. شکل (۲۰-۵) تغییرات ضریب



شکل ۵-۱۹ تغییرات جریان استاتور بر حسب سرعت

توان^۱ (PF) بر حسب سرعت را برای موتور القایی سه فاز نشان می‌دهد.

بازده (بهره)

برای پیدا کردن بازده در موتورهای القایی سه فاز، باید به تلفات ماشین پی برد و بهتر است به نمودار پخش توان در موتور توجه کرد (شکل ۵-۲۱). در یک موتور القایی سه فاز توان ورودی به ماشین به قرار زیر است:

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\theta_1 \quad (۶۶-۵)$$

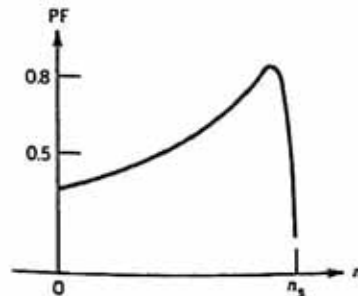
تلفات اهمی یا مسی استاتور بشرح زیر است.

$$P_1 = 3I_1^2 R_1 \quad (۶۷-۵)$$

R_1 مقاومت AC هر فاز استاتور با در نظر گرفتن اثر پوستی^۲ در درجه حرارت و فرکانس مورد نظر می‌باشد.^۳ استاتور حاوی تلفات هسته نیز می‌باشد که مجموع تلفات هیستریزس و جریان گردابی است. لذا پس از آن که توان ورودی تلفات استاتور اعم از تلفات هسته و تلفات مسی را تأمین نمود، مابقی از فاصله هوایی می‌گذرد (شکل ۵-۲۱). به توان عبوری از فاصله هوایی P_{ag} اطلاق می‌کنیم. بخشی از P_{ag} به صورت گرما و تلفات مسی در رتور هدر می‌رود، یعنی:

$$P_2 = 3I_2^2 R_2 \quad (۶۸-۵)$$

R_2 مقاومت AC هر فاز رتور است. در ماشین‌های رتور سیم‌بندی شده R_2 مجموع مقاومت هر فاز رتور؛

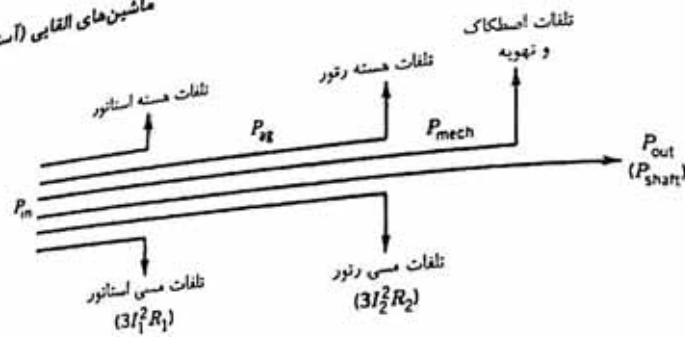


شکل ۵-۲۰ تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت

۱ - Power factor

۲ - Skin Effect

۳ - مقاومت AC در فرکانس ۶۰ هرتز حدود ۲۰ درصد از مقاومت DC بیشتر است.



شکل ۲۱-۵ نمودار پخش توان در موتور القایی سه فاز

مقاومت هر فاز رنوستای متصل به آنست. باید دانست بخش ناچیزی از P_{ag} صرف تلفات هسته رتور می‌شود. البته از اینجائیکه فرکانس رتور در شرایط عادی کم است، تلفات هسته رتور نیز ناچیزی می‌باشد و می‌توان در شرایط کار عادی از آن صرف نظر نمود.

پس از آن که P_{ag} تلفات رتور را تأمین نمود، الباقی به توان مکانیکی (P_{mech}) تبدیل می‌شود. بخشی از P_{mech} صرف تلفات اصطکاک و تهویه شده و مابقی به صورت توان مکانیکی خروجی (P_{out}) بر روی محور ظاهر می‌شود. P_{out} توان مکانیکی مفید نیز نام دارد. به سهولت می‌توان بازده (بهره) را این چنین تعریف کرد:

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (۶۹-۵) \quad (\text{بازده})$$

بازده تابع لغزشی یا s است. اگر از کل تلفات به جز تلفات مسی رتور صرف نظر کنیم داریم:

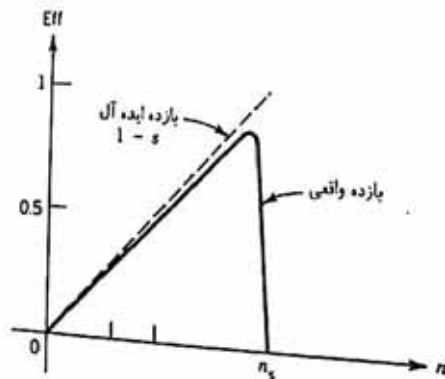
$$P_{ag} = P_{in}$$

$$P_r = sP_{ag}$$

$$P_{out} = P_{mech} = P_{ag} (1 - s)$$

لذا بازده ایده‌آل^۱ این چنین تعریف می‌شود.

$$Eff_{(ideal)} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - s \quad (۷۰-۵) \quad (\text{بازده ایده‌آل})$$



شکل ۲۲-۵

تعبیرات بازده بر حسب سرعت
در موتورهای القایی سه فاز

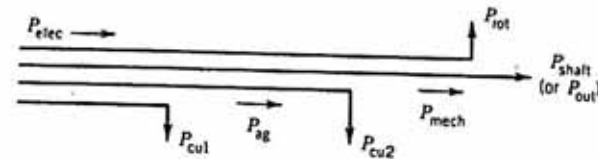
به بازده ایده‌آل گاهی بازده داخلی^۱ نیز گفته می‌شود، زیرا در این بازده نسبت توان خروجی و توان عبوری از فاصله هوایی (P_{ag}) مطرح است. شکل (۵-۲۲) تغییرات بازده بر حسب سرعت را برای موتورهای القایی نشان می‌دهد و در این شکل بازده ایده‌آل یا بازده داخلی نیز رسم شده است. واضح است که در صورت نیاز به بازده زیاد، موتور باید در حوالی سرعت سنکرون کار کند و لذا موتورهای عمده‌تأ طوری طراحی می‌شوند که در حالت کار عادی دارای لغزش کوچک باشند. همچنین ملاحظه می‌شود در صورت در نظر گرفتن کل تلفات، بازده واقعی از بازده ایده‌آل کمتر است. معمولاً بازده موتورهای القایی سه‌فاز در شرایط اسمی حدود ۹۵ درصد است.

۵-۱۰- نحوه پخش توان در ماشین‌های القایی در حالت‌های موتوری، ژنراتوری و ترمز

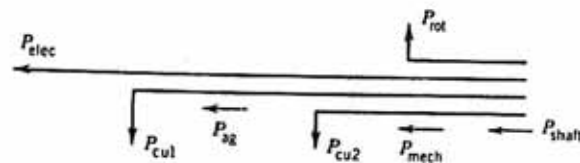
در بخش (۵-۵) دیدیم که ماشین القایی می‌تواند به صورت موتور یا ژنراتور کار کند و در ضمن در مرحله ترمز نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرد. شکل (۱ و ۵-۲۳) نمودار پخش توان را در موتورهای القایی نشان می‌دهد و در حالت موتوری داریم:

$$0 < s \leq 1$$

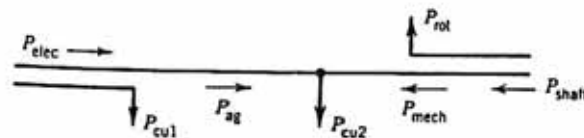
مشاهده می‌شود که:



(۱)



(۲)



(۳)

شکل ۵-۲۳ نمودار پخش توان برای ماشین‌های القایی ۱- موتور القایی ۲- ژنراتور القایی ۳- حالت ترمز

الف: توان الکتریکی از شبکه وارد موتور می‌شود (P_{elec}).

ب: بخشی از توان P_{elec} صرف تلفات اهمی یا مسی استاتور می‌گردد (P_{cu1}).

ج: تفاوت P_{elec} و P_{cu1} از شکاف هوایی عبور کرده و وارد رتور می‌شود (P_{ag}).

د: بخشی از P_{ag} صرف تلفات مسی رتور می‌شود (P_{cu2}).

ه: تفاوت P_{ag} و P_{cu2} به توان مکانیکی (P_{mech}) تبدیل می‌شود.

و: بخشی از P_{mech} صرف تلفات چرخشی P_{rot} می‌شود.

ز: تفاوت P_{mech} و P_{rot} به صورت توان مکانیکی مفید بر روی محور ظاهر می‌شود (P_{out} یا P_{shaft}) گفتنی است که:

تلفات ثابت = مقداری ثابت = تلفات تهویه + تلفات اصطکاک + تلفات هسته استاتور = P_{rot}

شکل (۲ و ۵-۲۳) نمودار پخش توان در حالت ژنراتوری را نشان می‌دهد (ژنراتور القایی).
و داریم:

$$s < 0$$

مشاهده می‌شود که:

۱- توان ورودی به سیستم توان مکانیکی اعمالی به محور است (P_{shaft}).

۲- بخشی از P_{shaft} صرف تلفات چرخشی (P_{rot}) می‌گردد.

۳- مابقی تفاوت P_{shaft} و P_{rot} به P_{mech} موسوم است.

۴- بخشی از P_{mech} صرف تأمین تلفات مسی رتور می‌گردد (P_{cu2}).

۵- مابقی P_{mech} از شکاف هوایی عبور می‌کند (P_{ag}) و به استاتور می‌رود.

۶- بخشی از P_{ag} صرف تأمین تلفات مسی استاتور می‌گردد (P_{cu1}).

۷- مابقی P_{ag} به صورت توان الکتریکی به شبکه تزریق می‌شود (P_{elec}).

در اینجا یادآوری می‌کنیم در حالت ژنراتوری نیز P_{rot} (تلفات چرخشی) از مجموع تلفات هسته استاتور و اصطکاک و تهویه حاصل می‌شود و به عنوان تلفات ثابت تلقی می‌گردد. گفتنی است:

الف: P_{mech} در حالت موتوری مبین تبدیل توان الکتریکی به مکانیکی است.

ب: P_{mech} در حالت ژنراتوری مبین تبدیل توان مکانیکی به الکتریکی می‌باشد.

از دیدگاه مدار معادل شکل (۵ و ۱۳-۵) داریم:

الف: در حالت موتوری R_r/s ($1 - s$) مثبت است.

ب: در حالت ژنراتوری R_r/s ($1 - s$) منفی است.

لذا در حالت ژنراتوری R_r/s ($1 - s$) به عنوان یک منبع انرژی عمل می‌کند، اما در حالت موتوری R_r/s ($1 - s$) به عنوان یک مصرف کننده انرژی عمل می‌نماید.

شکل (۳ و ۲۵-۳) نمودار پخش توان در حالت ترمز^۱ نشان می‌دهد. در حالت ترمز رتور در جهت خلاف میدان گردان می‌چرخد و داریم:

$$S > 1$$

در این حالت دو توان ورودی به سیستم اعمال می‌گردد. (شکل ۳ و ۵-۲۳):

۱- توان ورودی از شبکه به استاتور (P_{elec}).

۲- توان ورودی مکانیکی اعمالی به محور (P_{shaft}).

گفتنی است که:

الف: بخشی از P_{elec} صرف تلفات مسی استاتور می‌شود (P_{cu1}).

ب: مابقی P_{elec} از شکاف هوایی رد شده و به P_{ag} موسوم است.

ج: P_{ag} به رتور می‌ریزد و بخشی از تلفات مسی رتور را تأمین می‌کند (P_{cu2}).

د: بخشی از P_{shaft} صرف تلفات چرخشی (P_{rot}) می‌گردد.

ه: مابقی P_{shaft} به P_{mech} موسوم است.

و: P_{mech} نیز بخشی دیگر از تلفات مسی رتور را تأمین می‌کند (P_{cu2}).

ز: در حالت ترمز از دو سمت توان به رتور می‌ریزد و تلفات مسی رتور (P_{cu2}) زیاد است.

با توجه به مدار معادل شکل (۵ و ۱۳-۵) مقدار $(1-s)/s R_r$ منفی است و این مقاومت به عنوان یک منبع انرژی عمل می‌نماید که می‌تواند تلفات اهمی یا مسی رتور را در حالت ترمز همانند حالت ژنراتوری تأمین کند.

مثال ۵-۴

یک موتور القایی سه فاز ۴۶۰ ولتی، ۴ قطبی و ۶۰ هرتزی مفروض است و سرعت اسمی آن ۱۷۴۰ دور در دقیقه (rpm) است. سایر مشخصات موتور که از نوع رتور سیم‌بندی شده است به قرار زیر می‌باشد:

$$R_1 = 0.125 \text{ ohms}, \quad R'_2 = 0.12 \text{ ohms}$$

$$X_1 = X'_2 = 0.15 \text{ ohms}, \quad X_m = 30 \text{ ohms}$$

تلفات چرخشی (P_{rot}) معادل ۱۷۰۰ وات بوده و رتور از دو سمت اتصال کوتاه است.

الف: اگر موتور به ولتاژ اسمی وصل شود، جریان راه‌اندازی را پیدا کنید.

ب: گشتاور راه‌انداز چقدر است.

ج: لغزش در شرایط اسمی چیست.

د: جریان اسمی را حساب کنید.

ه: نسبت جریان راه‌اندازی به جریان اسمی چقدر است.

و: ضریب توان در شرایط اسمی چیست.

ز: گشتاور اسمی را حساب کنید.

ح: بازده کلی و بازده ایده‌آل (بازده داخلی) را به دست آورید.

ت: در چه لغزشی گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) رخ می‌دهد.

ی: گشتاور ماکزیمم (T_{max}) چقدر است.

ک: اگر بخواهیم T_{max} در لحظه راه‌اندازی رخ دهد به هر فاز رتور از طریق حلقه‌های لغزش چه مقدار مقاومت باید اضافه کنیم.

الف: در لحظه راه اندازی $s = 1$ بوده و به سهولت داریم:

$$V_1 = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265.16 \text{ volts/phase}$$

$$Z_1 = 0.125 + j0.15 + \frac{j30(0.12 + j0.15)}{0.12 + j30.15} = 1.108 \angle 66^\circ \Omega$$

$$I_{st} = \frac{265.16}{1.108 \angle 66^\circ} = 245.19 \angle -66^\circ \text{ A}$$

محاسبات فوق بر اساس مدل IEEE است.

ب: ب راحتی داریم:

$$\omega_{syn} = \frac{1800}{60} \times 2\pi = 188.5 \text{ rad/sec}$$

$$V_{th} = \frac{265.16(j30.15)}{(0.125 + j30.15)} = 261.13 \text{ V}$$

$$Z_{th} = \frac{j30(0.125 + j0.15)}{0.125 + j30.15} = 0.155 \angle 63.9^\circ$$

$$= 0.124 + j0.149$$

$$R_{th} = 0.124 \Omega$$

$$X_{th} = 0.149 \approx X_1$$

$$T_{st} = \frac{P_{ag}}{\omega_{syn}} = \frac{I_r^2 R_r'/s}{\omega_{syn}}$$

$$= \frac{3}{188.5} \frac{261.13^2}{(0.124 + 0.12)^2 + (0.149 + 0.15)^2} \times \frac{0.12}{1}$$

$$= \frac{3}{188.5} \times (241.13)^2 \times \frac{0.12}{1} = 185.12 \text{ N.m}$$

ج: به سهولت داریم:

$$s = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0.0333$$

د: با توجه به مدل IEEE و لغزش فوق داریم:

$$\frac{R_r'}{s} = \frac{0.12}{0.0333} = 61.01 \Omega$$

$$Z_1 = (0.125 + j0.15) + \frac{(j30)(61.01 + j0.15)}{61.01 + j30.15}$$

$$= 0.125 + j0.15 + 5/598 + j1/596 = 6/2123 \angle 19.7^\circ \Omega$$

$$I_{FL} = \frac{265/6}{6/2123 \angle 19.7^\circ} = 42/754 \angle -19.7^\circ$$

ه: براحتی داریم:

$$\frac{I_{st}}{I_{FL}} = \frac{245/9}{42/754} = 5/75$$

و: به آسانی داریم:

$$PF = \cos(19.7^\circ) = 0.94 \text{ (پس‌فاز)}$$

ز: به آسانی داریم:

$$T = \frac{3}{188/5} \frac{(261/3)^2}{(0.124 + 6/0.1)^2 + (0.49 + 0.15)^2} \times 6/0.1$$

$$= \frac{3}{188/5} \times 41/29^2 \times 6/0.1 = 163/11 \text{ N.m}$$

ح: به سهولت داریم:

$$P_{ag} = T\omega_{syn} = 163/11 \times 188/5 = 30,746/2 \text{ W}$$

$$P_r = sP_{ag} = 0.1233 \times 30,746/2 = 1023/9 \text{ W}$$

$$P_{mech} = (1 - 0.1233)30,746/2 = 29,722/3 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} = 29,722/3 - 1700 = 28,022/3 \text{ W}$$

$$P_{input} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1$$

$$= 3 \times 265/6 \times 42/754 \times 0.94 = 32,022/4 \text{ W}$$

$$Eff_{motor} = \frac{28,022/3}{32,022/4} \times 100 = 87.5\%$$

$$Eff_{internal} = (1-s) = 1 - 0.1233 = 0.8767 \rightarrow 87.67\% \text{ (بازده داخلی یا ایده‌آل)}$$

ت: از رابطه (۵۸-۵) داریم:

$$S_{Tmax} = \frac{0.12}{[0.124^2 + (0.49 + 0.15)^2]^{1/2}} = \frac{0.12}{1/0.186} = 0.1963$$

ی: از رابطه (۵۹-۵) داریم:

$$T_{max} = \frac{3}{2 \times 188/5} \times \left[\frac{261/3^2}{0.124 + [0.124^2 + (0.49 + 0.15)^2]^{1/2}} \right]$$

$$= 431/68 \text{ N.m}$$

$$\frac{T_{max}}{T_{FL}} = \frac{431/68}{163/11} = 2/65$$

ی. به راحتی داریم:

$$s_{Tmax} = 1 = \frac{R'_r + R'_{ext}}{[0.24^2 + (0.49 + 0.5)]^{1/2}} = \frac{R'_r + R'_{ext}}{1.0186}$$

$$R'_{ext} = 1.0186 - 0.2 = 0.8186 \text{ } \Omega/\text{phase}$$

توجه کنید که برای بخشهای (الف) و (ب) لازم نیست از مدار معادل تونن استفاده شود. محاسبه می تواند بر بنای مدار معادل شکل (۵-۱۵) به ترتیب زیر انجام گیرد.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + R_c + jX_c$$

$$= 0.25 + j0.5 + 5/598 + j1/596$$

$$T = \frac{3}{\omega_{syn}} I_1^2 R_c$$

$$= \frac{3}{1885} \times 42/754^2 \times 5/598$$

$$= 163 \text{ N.m}$$

مثال ۵-۵

یک موتور القایی سه فاز ۴۶۰ ولتی، ۶۰ هر تزی و ۶ قطبی موجود است و رتور آن از نوع سیم بندی شده است. این موتور بار ثابت ۱۰۰ نیوتون متر را در سرعت ۱۱۴۰ دور در دقیقه می چرخاند. باید دانست در این شرایط رتور از هر دو سمت اتصال کوتاه شده است. اکنون می خواهیم بار فوق را با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه بچرخانیم. چه مقدار مقاومت باید به هر فاز رتور از طریق حلقه های لغزان اضافه نمود. مقاومت رتور از ۰/۲ اهم در هر فاز بگیریید و از P_{rot} صرف نظر کنید. نسبت دورهای استاتور به رتور را واحد فرض کنید.

حل

سرعت سنکرون به قرار زیر است:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

در سرعت ۱۱۴۰ دور در دقیقه داریم:

$$s_1 = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0.05$$

در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه داریم:

$$s_2 = \frac{1200 - 1000}{1200} = 0.167$$

از مدار معادل موتور چنین استنباط می شود اگر R'_r/s در دو شرایط مختلف از بهره برداری یکسان باشد، جریان رتور (I_2) و جریان استاتور (I_1) در این دو حالت مشابه بوده و گشتاور حاصله در این دو شرایط مختلف نیز یکسان خواهد بود (معادله ۵-۵۴). همچنین اگر از P_{rot} صرف نظر شود، گشتاور حاصله با گشتاور خروجی و

لمال با گشتاور بار ۱ یکسان خواهد بود. اگر نسبت تبدیل استاتور به روتور واحد فرض شود. داریم:

$$\frac{R_r}{s_1} = \frac{R_r + R_{ext}}{s_2}$$

$$\frac{0.2}{0.05} = \frac{0.2 + R_{ext}}{0.167}$$

$$R_{ext} = 0.468 \Omega/\text{phase}$$

مثال ۵-۶

یک موتور ۴۶۰ ولتی، ۶۰ هرتزی، چهار قطبی مفروض است و رتور آن از نوع قفس سنجابی می‌باشد. سرعت اسمی موتور ۱۷۱۰ دور در دقیقه است جریان راه‌اندازی این موتور چهار برابر جریان اسمی می‌باشد. الف: گشتاور راه‌انداز چند درصد گشتاور اسمی است. ب: در چه سرعت و لغزشی گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) رخ می‌دهد. ج: T_{max} چند درصد گشتاور اسمی است.

حل

در این مساله پارامترهای ماشین داده نشده است. الف: سرعت سنکرون به قرار زیر است:

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

لغزش در شرایط اسمی این چنین است:

$$s_{FL} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

از رابطه (۱ و ۵-۵۲) داریم:

$$T = \frac{I_r^2 R_r}{\omega_{syn}} \propto \frac{I_r^2 R_r}{s}$$

پس:

$$\frac{T_{st}}{T_{FL}} = \left| \frac{I_r(st)}{I_r(FL)} \right|^2 s_{FL}$$

$$T_{st} = 6^2 \times 0.05 \times T_{FL} = 1.8 T_{FL} = 180\% T_{FL}$$

ب: از معادله (۵-۶۴) داریم:

$$\frac{T_{st}}{T_{max}} = \frac{s_{T_{max}}}{1 + s_{T_{max}}}$$

$$\frac{T_{FL}}{T_{max}} = \frac{\gamma s_{Tmax} s_{FL}}{s_{Tmax} + s_{FL}}$$

پس:

$$\frac{T_{st}}{T_{FL}} = \frac{s_{Tmax} + s_{FL}}{s_{FL} + s_{FL} \times s_{Tmax}}$$

$$1/8 = \frac{s_{Tmax} + 0/0025}{0/05 + 0/05 \times s_{Tmax}}$$

$$s_{Tmax} + 0/0025 = 0/09 + 0/09 s_{Tmax}$$

$$s_{Tmax} = \left(\frac{0/0875}{0/91} \right)^{1/2} = 0/31$$

$$(سرعت تحت گشتاور ماکزیم) = (1 - 0/31) \times 1800 = 1242 \text{ rpm}$$

چ: از رابطه (۵-۶۴) داریم:

$$T_{max} = \left| \frac{1 + s_{Tmax}^2}{\gamma s_{Tmax}} \right| T_{st}$$

$$= \frac{1 + 0/31^2}{\gamma \times 0/31} \times 1/8 T_{FL}$$

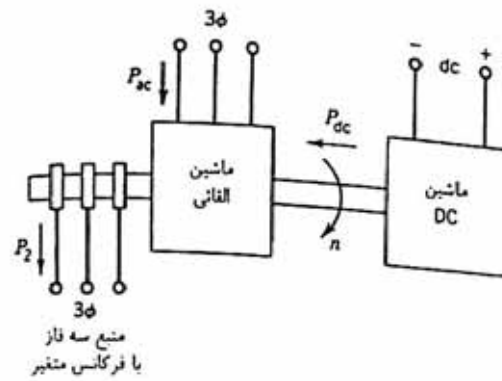
$$= 3/18 T_{FL} = 3/18 T_{FL}$$

مثال ۵-۷

شکل (ت و ۵-۷) شمای یک سیستم را نشان می‌دهد که به عنوان یک تغییر دهنده فرکانس از آن استفاده می‌شود. سیستم شامل یک ماشین القایی و یک ماشین DC است و فرکانس متغیر از پایانه‌های رتور حاصل می‌گردد. ماشین القایی سه فاز ۶ قطبی، ۶۰ هرتزی و ۴۶۰ ولتی است و ولتاژ شبکه سه فاز نیز ۴۶۰ ولت با فرکانس ۶۰ هرتز می‌باشد. رتور ماشین القایی از نوع رتور سیم‌بندی شده بوده، و سه پایانه رتور به حلقه‌های لغزان بر روی محور وصل است. می‌خواهیم فرکانس را در محدود ۱۵ تا ۱۲۰ هرتز کنترل کنیم. الف: سرعت چرخش سیستم را بر حسب دور در دقیقه طوری حساب کنید که در خروجی (پایانه‌های رتور) فرکانس‌های ۱۵ و ۱۲۰ هرتز داشته باشیم.

ب: اگر در حالت سکون ولتاژ القاء شده در رتور مدار باز ۲۴۰ ولت باشد، ولتاژ القاء شده در رتور را در هنگامی که فرکانس خروجی ۱۵ و ۱۲۰ هرتز باشد حساب کنید.

ج: اگر از کلیه تلفات ماشین القایی صرف نظر کنیم، در فرکانس‌های ۱۵ و ۱۲۰ هرتز چه مقدار از توان خروجی (پایانه رتور) توسط منبع AC و چه مقدار توسط ماشین DC تأمین می‌شود.



شکل (ت و ۵-۷)

حل

الف: برای $f_r = 15 \text{ Hz}$ لغزش به قرار زیر است.

$$s = \pm \frac{f_r}{f_1} = \pm \frac{15}{60} = \pm \frac{1}{4}$$

سرعت سنکرون به قرار زیر است:

$$n_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

سرعت سیستم برای $f_r = 15 \text{ Hz}$ به قرار زیر است.

$$n = (1 \pm s)n_s = (1 \pm \frac{1}{4}) \times 1200$$

$$= 900 \text{ و } 1500 \text{ rpm}$$

برای $f_r = 120 \text{ Hz}$ داریم:

$$s = \pm \frac{120}{60} = \pm 2/0$$

$$n = (1 \pm 2/0)1200$$

$$= -1200 \text{ و } 3600 \text{ rpm}$$

ب: به سهولت داریم:

$$sE_r = s \times 240$$

$$f_r = 15 \text{ Hz}, \quad sE_r = 60 \text{ V}$$

$$f_r = 120 \text{ Hz}, \quad sE_r = 480 \text{ V}$$

ج: توان ورودی به سیستم از منبع سه فاز AC به قرار زیر است:

$$P_{ac} = P_{ag} = \frac{P_r}{s}$$

توان ورودی به ماشین القایی از طریق محور به قرار زیر است:

$$P_{dc} = -(1-s)P_{ag} = -\frac{(1-s)}{s} \times P_r$$

برای $f_r = 15 \text{ Hz}$ داریم:

$$P_{ac} = \frac{P_r}{+(1/4)} \text{ و } \frac{P_r}{-(1/4)} = +4P_r \text{ و } -4P_r$$

$$P_{dc} = \frac{-[1-(1/4)]}{+(1/4)} P_r \text{ و } \frac{-[1+(1/4)]}{-(1/4)} P_r$$

$$= -3P_r \text{ و } 5P_r$$

برای $f_r = 120 \text{ Hz}$ داریم:

$$P_{ac} = \frac{P_r}{+(2/10)} \text{ و } \frac{P_r}{-(2/10)} = 0.5P_r \text{ و } -0.5P_r$$

$$P_{dc} = \frac{-(1-2/10)}{+2/10} P_r \text{ و } \frac{-(1+2/10)}{-2/10} P_r$$

$$= 0.5P_r \text{ و } 1.5P_r$$

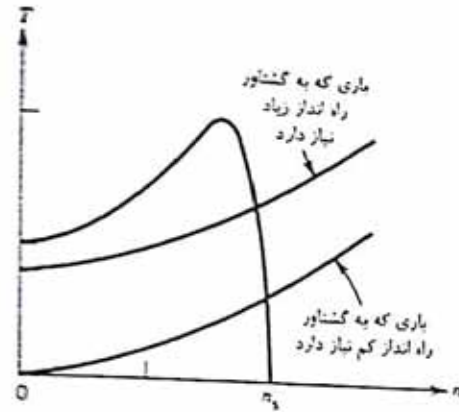
نتایج به طور خلاصه در جدول زیر آمده است.

f_r Hz	rpm	نحوه عملکرد ماشین القایی	لغزش	sE_r (ولت)	ورودی به استاتور P_{ac}	ورودی از طریق محور P_{dc}	ذخیره‌رئور P_r
15	900	موتور	$+(1/4)$	60	$4P_r$	$-3P_r$	P_r
	1500	ژنراتور	$-(1/4)$	60	$-4P_r$	$5P_r$	P_r
120	-1200	ترمز	$+2/10$	480	$0.5P_r$	$0.5P_r$	P_r
	3600	ژنراتور	$-2/10$	480	$-0.5P_r$	$1.5P_r$	P_r

لز آنجایی که همواره از سرعت‌های زیاد دوری می‌جوئیم، لذا دو سرعت 900 و 1200- دور در دقیقه را در نظر می‌گیریم. سرعت 900 دور در دقیقه بمعنی آن است که ماشین DC در جهت میدان گردان استاتور می‌چرخد. سرعت 1200- دور در دقیقه بیانگر آن است که ماشین DC در خلاف جهت میدان گردان استاتور می‌چرخد.

۵-۱۱- اثر مقاومت رتور

در موتورهای القایی سه فاز قفس سنجایی متداول، عمدتاً در شرایط اسمی با لغزش کوچک و جریان اسمی کم روبرو هستیم. بازده و ضریب توان این‌گونه موتورها در شرایط اسمی نسبتاً قابل ملاحظه است. در این‌گونه موتورها در لحظه راه‌اندازی یا گشتاور و ضریب توان کم مواجه بوده، اما جریان در لحظه راه‌اندازی نسبتاً



شکل ۵-۲۴ مشخصه گشتاور سرعت موتور همراه با دو گشتاور بار مختلف

زیاد است. اگر بار مکانیکی گشتاور راه‌انداز قابل ملاحظه‌ای را طلب کند (شکل ۵-۲۴)، در این صورت شتاب موتور آرام بوده و جریان زیادی در طول مدت سرعت‌گیری از شبکه می‌کشد و بنابراین مسئله حرارتی جدی خواهد بود.

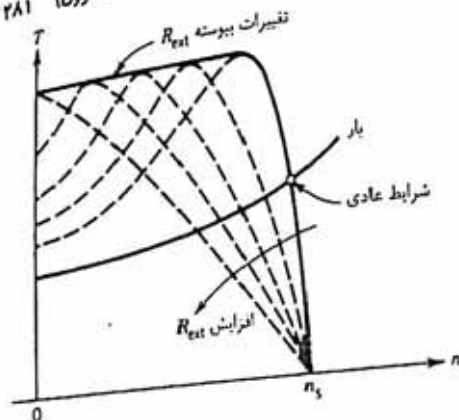
مقاومت رتور بر روی عملکرد موتور اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. در شرایط کار عادی که لغزش کم است، مقاومت رتور نیز باید کم باشد تا بازده خوبی حاصل شود. در لحظه راه‌اندازی مقاومت رتور باید زیاد باشد تا گشتاور راه‌انداز و ضریب توان قابل ملاحظه گردد و جریان راه‌اندازی کم شود. موتورهای القایی که مقاومت رتور آنها ثابت است باید طوری طراحی شوند که مصالحه‌ای بین شرایط راه‌اندازی و کار عادی پیش آید. اما موتورهای القایی دیگری نیز وجود دارد که مقاومت رتور آنها متغیر است. در ذیل آنها را توضیح می‌دهیم:

۵-۱۱-۱- موتورهای القایی با رتور سیم‌بندی شده

در این موتورها می‌توان به هر فاز رتور از طریق حلقه‌های تغذیه رتور متصل نمود (شکل ۱ و ۵-۳۶). معادله (۵-۵۸) نشان می‌دهد که لغزش متناظر با گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) به مقاومت رتور بستگی دارد. یعنی:

$$sT_{max} \propto (R_{wr} + R_{ext}) \quad (۷۱-۵)$$

R_{wr} مقاومت هر فاز رتور و R_{ext} مقاومت هر فاز رتور متصل به رتور است. اگر به گشتاور راه‌انداز زیاد نیاز داشته باشیم می‌توان R_{ext} را طوری تنظیم نمود که گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) در لحظه راه‌اندازی رخ دهد ($sT_{max} = 1$). در ضمن شتاب‌گیری موتور بتدریج R_{ext} را از مدار خارج می‌سازیم. تا بالاخره به نقطه کار عادی ماشین برسیم. شکل (۵-۲۵) اثر تغییر R_{ext} را بر روی گشتاور ماشین نشان می‌دهد. نقطه کار ماشین از محل تلاقی گشتاور ماشین و گشتاور بار حاصل می‌شود. باید دانست قله منحنی گشتاور موتور (T_{max}) به



شکل ۵-۲۵

از مقاومت رتور بر روی T_{max} (کشاور ماکزیمم) و جابجایی آن

مقاومت رتور بستگی ندارد و عددیست ثابت، اما S_{Tmax} با تغییر مقاومت رتور جابجا می شود. در خاتمه راندازی و مرحله کار عادی ماشین، R_{ext} از مدار بیرون می رود و رتور با مقاومت کم خود به کار ادامه می دهد. لذا ماشین با لغزش کم و بازده زیاد به گردش ادامه خواهد داد.

با توجه به شکل (۵-۲۵) می توان به نقاط تلاقی متفاوتی دست یافت. منظور از نقاط تلاقی محل برخورد منحنی کشاور ماشین و کشاور بار است. لذا با تغییر R_{ext} می توان به سرعت های گوناگونه دست یافت. این روش یکی از روش های کنترل سرعت^۱ در موتورهای القایی است و بعداً درباره آن بحث می کنیم.

۵-۱۱-۲- موتورهای القایی قفس سنجایی با میله های عمیق^۲

می دانیم در حالت سکون (راه اندازی) فرکانس رتور به قرار زیر است:

$$f_2 = f_1 \quad (\text{فرکانس شبکه})$$

فرکانس رتور در حالت چرخش محور به قرار زیر است:

$$f_2 = sf_1$$

اگر $f_1 = 60 \text{ Hz}$ باشد و لغزش (s) کم باشد، در این صورت f_2 حدود یک تا سه هرتز خواهد بود. از این خاصیت یعنی تغییرات f_2 از لحظه راه اندازی تا شرایط کاری عادی می توان استفاده کرد تا مقاومت رتور به طور اتوماتیک تغییر کند. میله های رتور را می توان طوری طراحی کرد که مقاومت مؤثر آنها در فرکانس ۶۰ هرتز چندین برابر مقاومت مؤثر میله ها در فرکانس ۳ هرتز باشد. این امر بخاطر پدیده اثر پوستی^۳ امکان پذیر است. شکل (۱ و ۲-۵) یک میله عمیق نازک مربوط به رتور قفس سنجایی را که دورن شیار قرار گرفته نشان می دهد. در این شکل شار ناشی شیار که توسط جریان میله پدید می آید نشان داده شده است. پر واضح است که اندوکتانس لایه های تحتانی میله عمیق بیش از اندوکتانس لایه های فوقانی خواهد بود. علت این امر آن است که شار پیوندی (شار دور^۴) بیشتری لایه های تحتانی را در بر می گیرد. نتیجه آن که جریان در لایه های تحتانی با اراکتانس زیاد، کمتر از جریان در لایه های فوقانی با اراکتانس کم است. این بدان معنی است که جریان

1 - Speed Control

2 - Deep Bar

3 - Skin Effect

سنجایی با میله‌های عمیق جهت مقایسه نشان داده شده است.

۵-۱۱-۳- رتورهای قفس سنجایی مضاعف (دوبل)

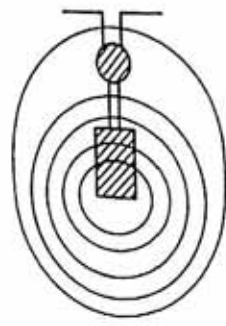
اگر بخواهیم گشتاور راه‌انداز زیاد و جریان راه‌انداز کم باشد، می‌توان از رتورهای قفس سنجایی مضاعف می‌توان استفاده کرد. رتورهای قفس سنجایی مضاعف می‌توان استفاده کرد. رتورهای قفس سنجایی مضاعف (دوبل) از دو قفس تشکیل شده‌اند

- ۱- قفس بیرونی یا قفس خارجی یا قفس فوقانی
- ۲- قفس دورنی یا قفس داخلی یا قفس تحتانی

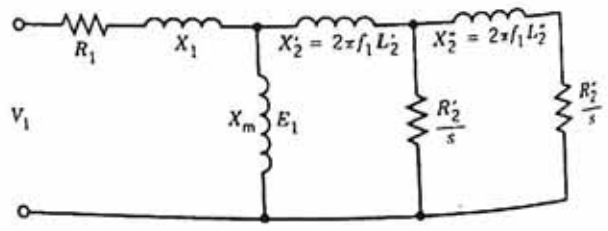
شکل (۱) و (۲) شمای میله‌های این دو قفس را در یک شیار نشان می‌دهد و باید گفت میله‌های هر دو قفس از دو انتها بوسیله حلقه‌های انتهایی^۴ اتصال کوتاه شده‌اند. لازم به تذکر است که:

- ۱- سطح مقطع قفس بیرونی از سطح مقطع قفس دورنی کمتر است.
- ۲- مقاومت ویژه^۵ ماده قفس بیرونی از مقاومت ویژه ماده قفس دورنی بیشتر است.
- ۳- با توجه به بندهای (۱ و ۲) مقاومت قفس بیرونی از مقاومت قفس دورنی بیشتر است.
- ۴- با باریک کردن شیار بین دو قفس، راکتانس ناشی قفس دورنی نسبت به قفس بیرونی بیشتر می‌شود. در لحظه راه‌اندازی بخش اعظم جریان رتور از قفس بیرونی می‌گذرد، لذا مقاومت مؤثر رتور افزایش می‌یابد. در شرایط کار عادی که فرکانس رتور کم است، راکتانس قابل نظر کردن است و جریان از هر دو قفس موازی می‌گذرد. در حقیقت مقاومت رتور برابر مقاومت معادل دو قفس موازی است. لذا دوباره بایک سیستم با مقاومت متغییر روبرو هستیم. باید گفت در موتورهای قفس سنجایی با میله‌های عمیق یا قفس سنجایی مضاعف، مقاومت مؤثر و راکتانس ناشی رتور با فرکانس تغییر می‌کند. شکل (۲) و (۳) مدار معادل موتور القایی قفس سنجایی مضاعف را نشان می‌دهد. که:

۱- L_1 اندوکتانس ناشی هر فاز قفس بیرونی است.



(۱)



(۲)

شکل ۲۷-۵ رتور قفس سنجایی مضاعف و مدار معادل موتور القایی سه فاز

- 1 - Double Cage
- 2 - Upper یا Outer Cage
- 3 - Lower یا Inner Cage
- 4 - End Rings

۲- I_p اندوکتانس نشستی هر فاز قفس دورنی می‌باشد.

۳- R_p' مقاومت هر فاز قفس خارجی است.

۴- R_p'' مقاومت هر فاز قفس داخلی است.

کمیت‌های فوق تابع فرکانس رتور (f_r) هستند. موتورهای قفس سنجابی با میله‌های عمیق یا قفس سنجابی مضاعف (دوبل) را می‌توان طوری طراحی نمود که در شرایط راه‌اندازی و کار عادی عملکرد خوبی داشته باشند. این امتیاز از تغییر مقاومت رتور ناشی می‌شود. البته این تغییر مقاومت همانند رتورهای سیم‌بندی شده قابل انعطاف نمی‌باشد. باید دانست اگر شرایط راه‌اندازی خیلی حاد باشد بهتر است از رتور سیم‌بندی شده استفاده شود.

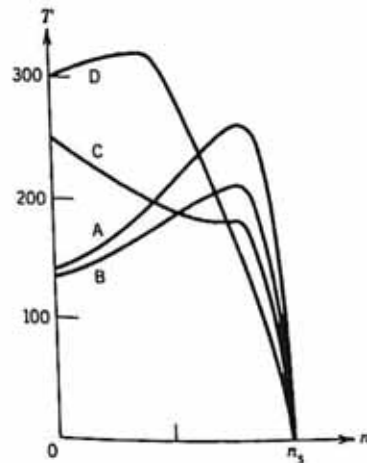
۵-۱۲- طبقه‌بندی موتورهای القایی قفس سنجابی

معمولاً در صنعت با بارهای مکانیکی گوناگون روبرو هستیم. برای ایجاد محیطی مناسب برای راه‌اندازی و کار عادی این بارهای مکانیکی، انواع طرحهای مختلف از موتورهای قفس سنجابی به بازار عرضه شده است. سازندگان طبق استاندارد NEMA^۱، موتورهای قفس سنجابی را در چهار کلاس A, B, C, D می‌سازند. شکل (۵-۲۸) مشخصه گشتاور سرعت را در این چهار کلاس نشان می‌دهد. تفاوت عمده در طراحی موتورهای قفس سنجابی در این چهار کلاس همان نحوه تغییر مقاومت مدار رتور است.

موتورهای کلاس A

موتورهایی که در این کلاس طراحی می‌شوند دارای خواص زیراند:

- ۱- گشتاور راه‌اندازی آنها عادی است.
- ۲- جریان راه‌اندازی آنها زیاد است.
- ۳- در شرایط کار عادی لغزش کم است.



شکل ۵-۲۸ مشخصه‌های گشتاور سرعت موتورهای کلاس A, B, C, D

۴. مقاومت رتور کم است و لذا در لغزش کم ($0.15 < s < 0.105$) بازده نسبتاً خوب است.
۵. از این موتورها در شرایطی که گشتاور بار به گشتاور راه‌انداز کم نیاز دارد استفاده می‌شود. این گونه بارها سریعاً شتاب می‌گیرند و مساله حرارتی پیش نمی‌آید.
۶. در ماشین‌های بزرگ کلاس A ماشین راتحت ولتاژ کمتر از ولتاژ اسمی راه‌اندازی می‌کنند.
۷. مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده است.

موتورهای کلاس B

مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۵-۲۸) آمده است. در این موتورها می‌توان به نکات ذیل توجه کرد:

- ۱- گشتاور راه‌اندازی این موتورها شبیه موتورهای کلاس A است.
- ۲- جریان راه‌اندازی در این موتورها، ۷۵ درصد موتورهای کلاس A است. علت کاهش جریان راه‌اندازی نحوه طراحی میله‌های عمیق یا قفس مضاعف با راکتانس‌های نشستی زیاد است. باید دانست که راکتانس نشستی زیاد گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) را کاهش می‌دهد. لغزش و بازده در شرایط اسمی در این گونه موتورها تقریباً مشابه کلاس A است. موتورهای کلاس B کاربرد وسیعی در صنعت دارند.

موتورهای کلاس C

- مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۵-۲۸) آمده است. در این موتورها داریم:
- ۱- گشتاور راه‌اندازی این موتورها زیاد است.
 - ۲- جریان راه‌اندازی این موتورها نسبتاً کم است. در این موتورها از رتور قفس سنجایی مضاعف استفاده می‌شود و مقاومت رتور بیش از کلاس B است. در شرایط اسمی لغزش این گونه موتورها بیش از کلاسهای A، B بوده و بازده نسبت به کلاسهای A، B کمتر است.

موتورهای کلاس D

مشخصه گشتاور سرعت این موتورها در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده است. این موتورها دارای خواص زیراند:

- ۱- گشتاور راه‌اندازی این موتورها زیاد است.
- ۲- جریان راه‌اندازی این موتورها کم است.
- ۳- در شرایط کار عادی لغزش نسبتاً بزرگ است.
- ۴- در این موتورها میله‌های رتور قفس سنجایی مسی نبوده بلکه برنزی است.
- ۵- در این موتورها گشتاور ماکزیمم (بیشینه یا T_{max}) در لغزش ۵۰ درصد حاصل می‌شود.
- ۶- لغزش اسمی این موتورها بین ۸ تا ۱۵ درصد بوده و لذا بازده این ماشین‌ها کم است.

۷- در این موتورها، تلفات اهمی رتور نسبتاً زیاد است، لذا موتورهای حجیم و گران هستند.

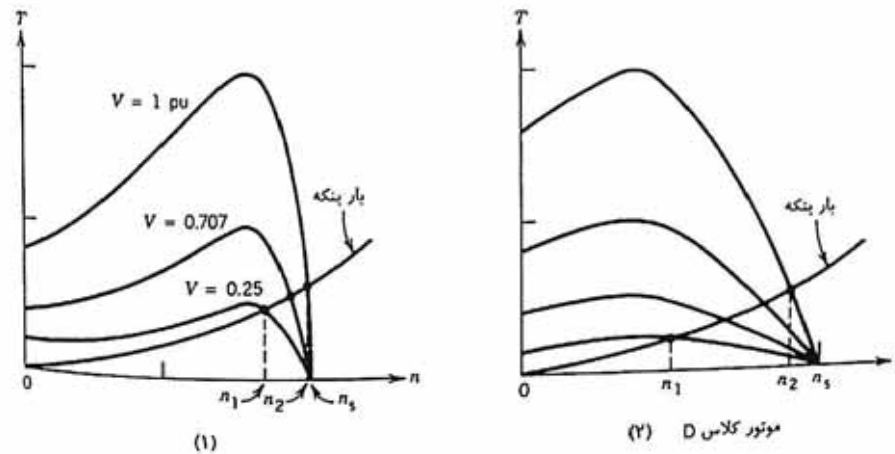
۵-۱۳- کنترل سرعت

اگر موتور القایی سه فاز به شبکه‌ای با ولتاژ و فرکانس ثابت وصل شود، در این صورت پس از راه‌اندازی در سرعتی حوالی سرعت سنکرون خواهد چرخید. گفتنی است با افزایش گشتاور بار سرعت به میزان کم کاهش می‌یابد، لذا این موتورها تقریباً از نوع موتورهای سرعت ثابت^۱ فرض می‌شوند. اما در برخی از صنایع لازم است که سرعت موتور در یک محدوده و طیف نسبتاً وسیعی تغییر کند. موتورهای DC به طور سنتی برای مواردیکه کنترل سرعت مورد نیاز است مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. اما موتورهای DC گران بوده و به تعمیرات و نگهداری در زمینه کموتاتور و جاروبک نیاز دارد. ولی برعکس موتورهای القایی بویژه نوع قفس سنجایی آن ارزان و چون سخت بوده و کموتاتور نیز ندارد و لذا برای سرعت‌های زیاد بسیار مناسب‌اند. امروزه با پیشرفت علم الکترونیک قدرت^۲ و پیدایش کنترل‌کننده‌های حالت جامد^۳، کنترل سرعت یا کنترل دور موتورهای القایی رو به تکامل است. اما این کنترل‌کننده‌ها نسبتاً گران بوده و زمان می‌طلبد تا به صورت ارزان در دسترس عموم قرار بگیرد. در این بخش چند روش کنترل سرعت مورد توجه قرار می‌گیرد.

۵-۱۳-۱- تغییر قطب‌ها^۴

می‌دانیم سرعت موتور خیلی به سرعت سنکرون نزدیک است و داریم:

$$n_s = \frac{120f}{P}$$



شکل ۵-۲۹ مشخصه گشتاور سرعت تحت ولتاژهای گوناگون

سرعت سنکرون) را تغییر دهیم، سرعت چرخش موتور (محور) نیز تغییر می نماید. برای تغییر n می توان تغییر تعداد قطبها استفاده نمود (چرا؟). این امر توسط تغییر اتصالات کلاف های استاتور امکان پذیر است. معمولاً تغییر تعداد قطبها از نسبت ۲ به ۱ تبعیت می کند. و لذا در این روش دو سرعت سنکرون مثبت حاصل می گردد. گفتنی است در برخی از موتورهای استاتور دارای دو سیم پیچ سه فاز جداگانه و مستقل است و هر کدام دو سرعت سنکرون مهیا می سازند. پس با چهار سرعت سنکرون مواجه خواهیم بود. در پرتوهای سیم بندی شده در هنگام تغییر تعداد قطبهای استاتور، باید آرایش سیم پیچ رتور را تغییر داد و علاوه بر این تعداد قطبهای رتور و استاتور یکسان باشد. اما موتور قفس سنجابی کار ماشین کماکان فقط با تغییر قطبهای استاتور ادامه خواهد یافت و به تغییر بافت رتور نیاز نداریم. با تغییر تعداد قطبهای استاتور، سرعت به صورت پله ای تغییر می کند و این گونه موتورهای سه فاز عمدتاً گران هستند.

۱-۱۳-۲- کنترل ولتاژ

در مباحث قبل در این فصل در یافتیم که گشتاور موتور القایی سه فاز با مجذور ولتاژ متناسب است. شکل (۱) و (۲) مشخصه های گشتاور سرعت موتور القایی سه فاز را تحت ولتاژهای گوناگون نشان می دهد. بار این موتور یک پنکه^۱ است. با توجه به شکل (۱) و (۲) تغییر ولتاژ اعمال به استاتور می توان پنکه را در سرعتهای^۱ n تا n^7 چرخاند. شکل (۲) و (۳) مشخصه های گشتاور سرعت یک موتور کلاس D قفس سنجابی را تحت ولتاژهای گوناگون نشان می دهد و مشاهده می شود در طیف وسیعی کنترل سرعت امکان پذیر است. در این دو شکل محل تلاقی مشخصه های گشتاور سرعت و گشتاور بار، نقطه کار^۲ را مشخص می سازد. تغییر ولتاژ بایانه استاتور می تواند توسط اتوترانسفورماتور با خروجی متغییر انجام گیرد. (شکل ۱ و ۳) یکی دیگر از روش های تغییر ولتاژ استفاده از کنترل کننده های حالت جامد یا الکترونیک است (شکل ۴ و ۵). اتوترانسفورماتور به ماشین ولتاژ سینوسی اعمال می کند، اما کنترل کننده های حالت جامد ولتاژ غیر سینوسی برای موتور فراهم می نمایند. در ماشین های کوچک می توان مستقیماً آنرا به کنترل کننده حالت جامد که یک کنترل کننده تریستوری است متصل نمود. اما در موتورهای بزرگ بین کنترل کننده تریستوری و موتور باید حافی^۳ قرار دارد. زیرا در غیر این صورت جریان های با هارمونیک بالا در خط تغذیه موتور برآه می کنند. در کنترل کننده تریستوری (شکل ۲ و ۳) زیگنال فرمان^۴ برای سرعت خاص از پیش تنظیم شده ای تریستورها با زاویه خاص^۵، آتش می کند (روشن می نماید)، تا ولتاژ مفروضی برای بایانه موتور حاصل گردد. به α زاویه آتش گفته می شود. اگر زیگنال فرمان سرعت عوض شود، زاویه آتش تریستورها^(۶) تغییر کرده و ولتاژ جدیدی به موتور اعمال می گردد، بالنتیجه به سرعت جدیدی می رسیم. اگر کنترل سرعت دقیق در مد نظر باشد، سیستم کنترل حلقه^۶ باز (شکل ۲ و ۳) در برخی از کاربردها ارضاء کننده نیست. شکل (۳) و (۴) یک سیستم کنترل ولتاژ تریستوری با حلقه بسته^۷ را نشان می دهد. گیریم به علی سرعت موتور^(۸) در این صورت تفاضل بین سرعت مرجع (n_{set}) و سرعت واقعی موتور (n) باعث تغییر زاویه

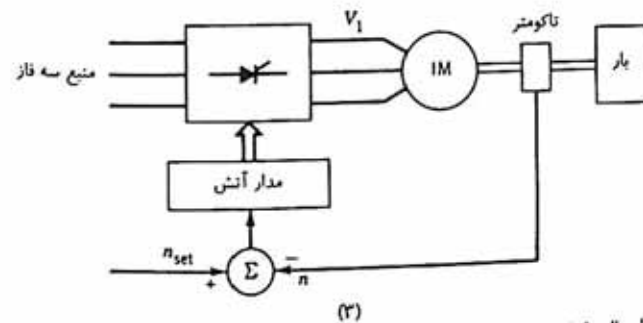
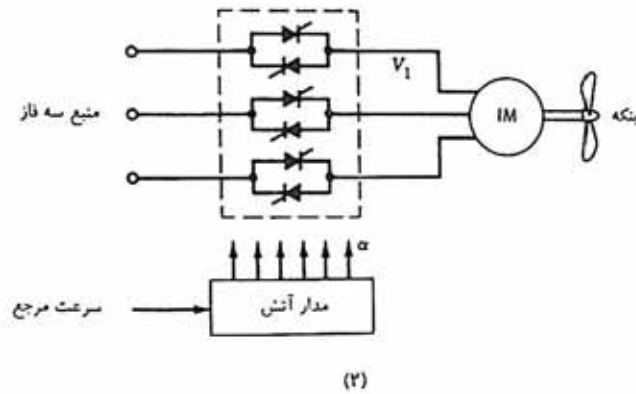
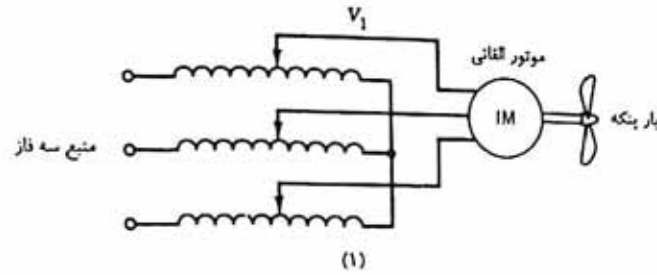
1 - Fan
 2 - Operating Point
 3 - Filter
 4 - Command Signal
 5 - Feedback
 7 - Closed Loop

آتش تریستورها (α) می‌گردد. بالنتیجه ولتاژ پایانه ماشین افزایش می‌یابد. این امر باعث فزونی گشتاور شده و سرعت به مقدار قبل از اغتشاش خواهد رسید.

۵-۱۳-۳- کنترل فرکانس

می‌دانیم سرعت سنکرون به قرار زیر است و سرعت موتور (n) در حوالی سرعت سنکرون می‌باشد

$$n_s = \frac{120f}{P}$$



شکل ۵-۳۰ نحوه اعمال ولتاژ به استاتور ۱- توسط اتوترانسفورماتور ۲- توسط کنترل کننده حالت جامد (تریستوری) یا حلقه باز ۳- توسط کنترل کننده حالت جامد (تریستور) یا حلقه بسته

یکی از راههای تغییر n و بالمال n ، تغییر فرکانس منبع تغذیه است. لذا به یک تغییر دهنده فرکانس^۱ در سر راه موتور نیاز داریم. شکل (۵-۳۱) نمودار جعبه‌ای^۲ یک سیستم کنترل حلقه‌باز را نشان می‌دهد که فرکانس منبع تغذیه موتور را تغییر خواهد داد. این سیستم شامل یک یکسوساز^۳ کنترل شده AC/DC بوده و از عناصر نیمه‌هادی تشکیل شده است. علاوه بر یکسوساز، این سیستم حاوی یک اینورتر^۴ DC/AC می‌باشد و اینورتر نیز از عناصر نیمه‌هادی تشکیل گردیده است. ما در اینجا درباره ساختمان درونی این سیستم‌ها که در فصل ۱۰ مورد بحث قرار می‌گیرد صحبت نمی‌کنیم. بلکه به طور خلاصه می‌گوییم که:

۱- یکسوساز ولتاژ سه فاز AC را به ولتاژ DC تبدیل می‌کند.

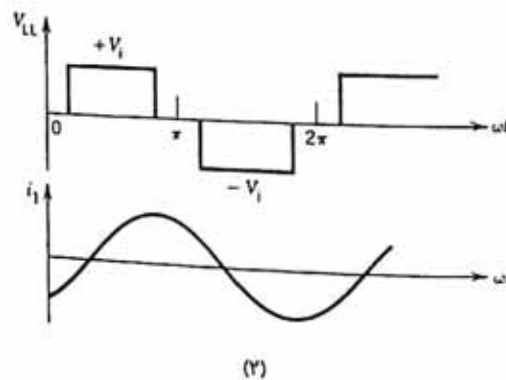
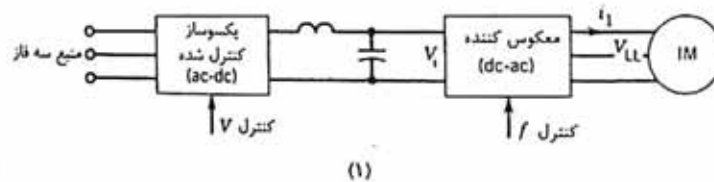
۲- اینورتر ولتاژ DC را به ولتاژ AC با فرکانس جدید تبدیل می‌نماید.

به سچولت از رابطه (۵-۲۷) داریم:

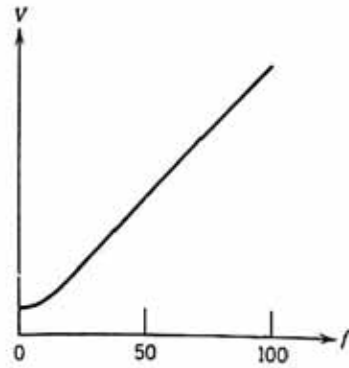
$$\Phi_p \propto \frac{E}{f} \quad (۷۲-۵)$$

اگر در شکل (۵-۱۵) از افت ولتاژ در دو سر R_1 و X_1 صرف نظر کنیم در این صورت $V_1 \approx E_1$ شده و داریم:

$$\Phi_p \propto \frac{V}{f} \quad (۷۲-۵)$$

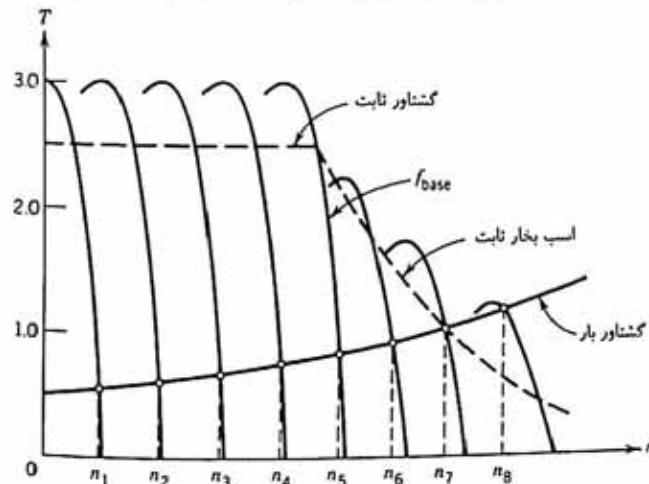


شکل ۵-۳۱ مدار کنترل حلقه‌باز جهت کنترل سرعت موتور القایی. در این سیستم ولتاژ و فرکانس موتور قابل کنترل است.



شکل ۳۲-۵ ولتاژ مورد نیاز در قبال تغییرات فرکانس جهت تأمین چگالی شار ثابت در شکاف هوایی

لذا برای بهره‌ی از اشباع زیاد در سیستم مغناطیسی باید ولتاژ پایانه موتور متناسب با فرکانس تغییر نماید. این نحوه کنترل را V/f ثابت نام نهاده‌اند. در اینجا باید گفت در فرکانس‌های پائین افت ولتاژ در دو سر R_1 و X_1 در شکل (۱۵-۵) در مقابل V_1 قابل نظر نیست و لذا دیگر رابطه (۷۳-۵) معتبر نمی‌باشد. لذا برای تأمین و برقراری چگالی شار مشابه، نسبت V/f در فرکانس‌های پائین افزایش داده می‌شود. شکل (۳۲-۵) تغییرات مورد نیاز ولتاژ بر حسب فرکانس را نشان می‌دهد. در شکل (۳۱-۵) ولتاژ موتور را می‌توان تغییر داد، بشرطی که ولتاژ ورودی به اینورتور (V_i) تغییر نکند. تغییر V_i بوسیله تغییر زاویه آتش یکسوساز کنترل شده امکان پذیر است. گفتنی است اگر ولتاژ خروجی اینورتور بتواند توسط خود اینورتور تغییر کند (اینورتورهای PWM یا مدولاسیون پهنای پالس^۱)، در این صورت یکسوساز کنترل شده را می‌توان با یکسوساز دیود^۲ جایگزین نمود. در این حالت V_i ثابت مانده و خروجی اینورتور توسط خود اینورتور تغییر می‌کند. شکل (۳۳-۵) مشخصه گشتاور سرعت موتور القایی سه فاز را در تحت فرکانس‌های متغیر نشان



شکل ۳۳-۵ ولتاژ مورد نیاز در قبال تغییرات فرکانس جهت تأمین چگالی شار ثابت در شکاف هوایی