موتورهای القایی و کنترل آن‌ها

مثال: یک موتور القایی سه‌فاز ۴ قطب ۵۰ هرتز، ۱۴۴۰r.p.m دارای سیم‌پیچی روتور با اتصال ستاره دارای مقاومت اهمی $۰/۲\frac{\Omega}{ph}$ و مقاومت پراکندگی حالت سکون هرفاز ۱ اهم است. وقتی استاتور با ولتاژ فرکانس نامی تغذیه می‌شود، نیروی محرکه الکتریکی القایی هرفاز روتور در حال سکون ۱۲۰ ولت است.

الف- جریان روتور، ضریب توان روتور و گشتاور را در حالت راه‌اندازی و بار کامل محاسبه کرده و نتایج را مقایسه کنید.

ب- اگر مقاومت خارجی هر فاز ۱ اهم در مدار روتور قرار گیرد. جریان روتور، ضریب توان روتور و گشتاور راه‌اندازی را محاسبه کنید.

حل: سرعت سنکرون:

$$n_s = \frac{۱۲۰ f_s}{p} = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۴} = ۱۵۰۰ \text{ r.p.m}$$

جریان روتور در راه‌اندازی:

$$I_{۲st} = \frac{E_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + x_۲^۲}} = \frac{۱۲۰}{\sqrt{۰/۲^۲ + ۱^۲}} = ۱۱۷/۶۷ A$$

ضریب توان روتور در راه‌اندازی:

$$cos\theta_{st} = \frac{r_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + x_۲^۲}} = \frac{۰/۲}{\sqrt{۰/۲^۲ + ۱^۲}} = ۰/۱۹۶$$

سرعت سنکرون به رادیان بر ثانیه:

$$\omega_s = \frac{۲\pi n_s}{۶۰} = \frac{۲\pi \times ۱۵۰۰}{۶۰} = ۵۰\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

گشتاور راه‌اندازی:

$$T_{est} = \frac{۳}{\omega_s} I_{۲st}^۲ \frac{r_۲}{۱} = \frac{۳}{۵۰\pi} (۱۱۷/۶۷)^۲ ۰/۲ = ۵۲/۹ \text{ N.m}$$

لغزش بار کامل:

$$s = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۵۰۰} = ۰٫۰۴$$

جریان روتور در بار کامل:

$$I_{۲fl} = \frac{sE_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + (sx_۲)^۲}} = \frac{۰٫۰۴ \times ۱۲۰}{\sqrt{۰٫۲^۲ + (۰٫۰۴ \times ۱)^۲}} = ۲۳٫۵۳\ A$$

ضریب توان روتور در راه‌اندازی:

$$cos\theta_{fl} = \frac{r_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + (sx_۲)^۲}} = \frac{۰٫۲}{\sqrt{۰٫۲^۲ + (۰٫۰۴ \times ۱)^۲}} = ۰٫۹۸$$

گشتاور بار کامل:

$$T_{efl} = \frac{۳}{\omega_s} I_{۲fl}^۲ \frac{r_۲}{s} = \frac{۳}{۵۰\pi}(۲۳٫۵۳)^۲ \frac{۰٫۲}{۰٫۰۴} = ۵۲٫۸۷\ \text{N.m}$$

نسبت جریان راه‌اندازی به جریان بار کامل:

$$\frac{I_{۲st}}{I_{۲fl}} = \frac{۱۱۷٫۶۷}{۲۳٫۵۳} \cong ۵$$

نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور بار کامل:

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{۵۲٫۹}{۵۲٫۸۷} \cong ۱$$

ب- وقتی مقاومت خارجی در مدار روتور قرار می‌گیرد، مقاومت کل مدار روتور ۱٫۲ = ۱ + ۰٫۲ خواهد شد.

$$I_{2st} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{120}{\sqrt{1{,}2^2 + 1^2}} = 76{,}82\ A$$

ضریب توان روتور در راه‌اندازی:

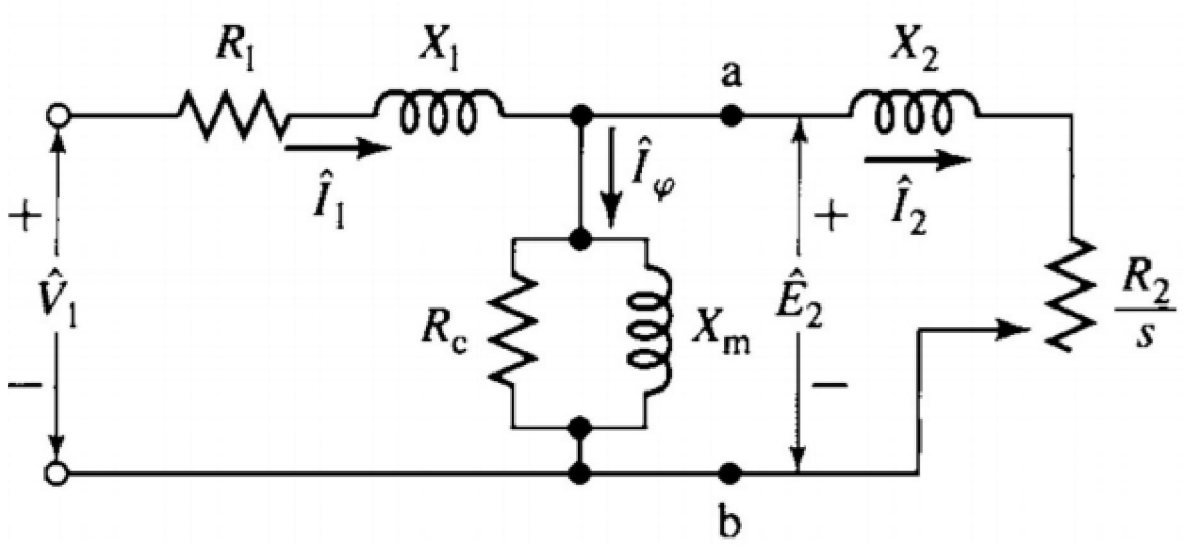
$$cos\theta_{st} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{1{,}2}{\sqrt{1{,}2^2 + 1^2}} = 0{,}768$$

$$T_{est} = \frac{3}{\omega_s} I_{2st}^2 \frac{r_2}{1} = \frac{3}{50\pi}(76{,}82)^2 1{,}2 = 135{,}25\ \text{N.m}$$

این مثال نشان می‌دهد که با قرار دادن مقاومت خارجی در مدار روتور جریان راه‌اندازی کاهش و گشتاور راه‌اندازی افزایش می‌یابد و ضریب توان در راه‌اندازی تصحیح می‌شود. اینها مزایای اصلی موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده بر موتور القایی قفس سنجابی است.

معرفی چند مدار معادل تقریبی و ساده برای موتورهای القایی سه‌فاز

مدار معادل نشان داده شده در شکل ۴.۲ یک مدل نسبتا کامل و جامع است و برای هر فاز موتور در حالت ماندگار (مانا) [1] صادق می‌باشد. این مدار در حقیقت یک مدار RL بوده که نسبتا پیچیده نیز می‌باشد. لذا برای تحلیل موتورها، مدارهای ساده‌تری نیز پیشنهاد شده است.

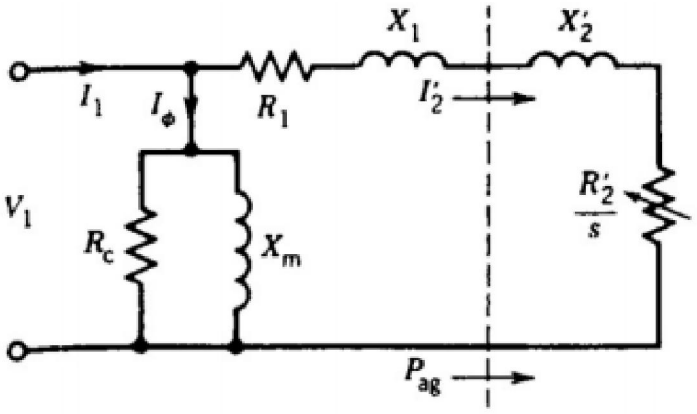


شکل ۴.۲: مدار معادل کامل یک موتور القایی

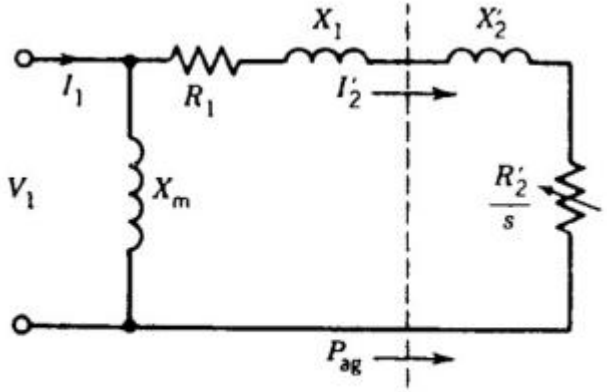
[1] Steady State

مدار معادل تقریبی

در شکل ۴.۲ اگر از افت ولتاژ در R_1 و X_1 چشم‌پوشی شود و E_1 و V_1 را تقریبا مساوی بگیریم، در این صورت می‌توان شاخه‌های موازی که به شاخه‌های مغناطیس‌کنندگی موسوم‌اند، را به ابتدای مدار معادل منتقل نمود و به شکل ۵.۲(الف) دست یافت. می‌بینیم که تحلیل این مدار RL بسیار ساده است. باید دانست اگر V_1 ولتاژ تغذیه و f_s فرکانس منبع تغذیه ثابت باشند، تلفات هسته استاتور که توسط R_c مدل می‌شود، عددی ثابت خواهد بود. در شرایط بی‌باری که موتور بار مکانیکی خاصی را نمی‌چرخاند، سرعت موتور خیلی به سرعت سنکرون نزدیک است، لذا در شرایط بی‌باری لغزش بسیار کم و فرکانس روتور f_r نیز بسیار ناچیز خواهد بود و می‌توان از تلفات هسته رتور چشم‌پوشی نمود. در سرعت‌های کمتر (لغزش بیشتر) فرکانس روتور افزون‌تر می‌شود و تلفات هسته روتور زیاد می‌گردد. اما عمدتا موتورها در لغزش کم کار می‌کنند و لذا f_r عددیست کوچک. به همین منظور در تحلیل موتورها عمدتا از تلفات هسته روتور صرف‌نظر می‌گردد. گفتنی است در صورتیکه V_1 و f_s ثابت باشند، مجموع تلفات هسته استاتور، تلفات تهویه و تلفات اصطکاک معمولا عددی ثابت است و در سرعت‌عای گوناگون آن چنان تغییر نمی‌کند. لذا می‌توان کل این تلفات (هسته، تهویه، اصطکاک) را یکی کرد و به آن تلفات ثابت ماشین یا تلفات چرخشی اطلاق نمود (P_{rot}). در این صورت می‌توان R_c را از مدار معادل حذف نمود و به شکل ۵.۲(ب) رسید [۵].



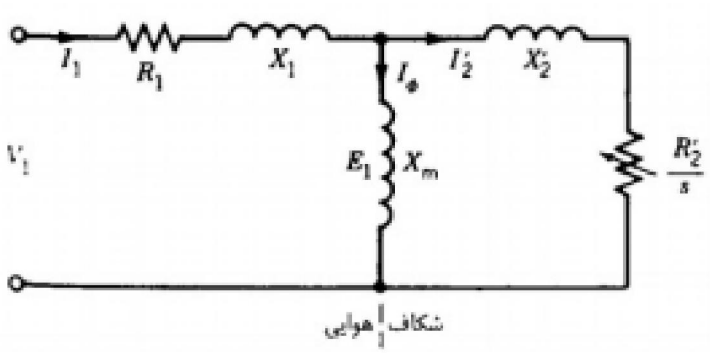
(الف) مدار معادل تقریبی با تغییر شاخه موازی



(ب) مدار معادل تقریبی با حذف مقاومت موازی

مدار معادل پیشنهادی IEEE

در موتورهای القایی سه‌فاز بخاطر وجود شکاف هوایی بین روتور و استاتور، جریان تحریک $I*_{\phi}$ زیاد است و حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان اسمی را شامل می‌شود. همچنین راکتانس نشتی استاتور X_1 نیز عددی نسبتا زیاد است. در چنین شرایطی انجمن مهندسین برق و الکترونیک آمریکا (IEEE) پیشنهاد می‌نماید که بردن X_m به ابتدای مدار معادل کار چندان پسندیده‌ای نیست و بهتر است از مدار معادل شکل ۶.۲یاری گرفته شود. در مدار معادل IEEE نیز از R_c خبری نیست و تلفات هسته استاتور با تلفات تهویه و اصطکاک به صورت یک کاسه در نظر گرفته می‌شود.



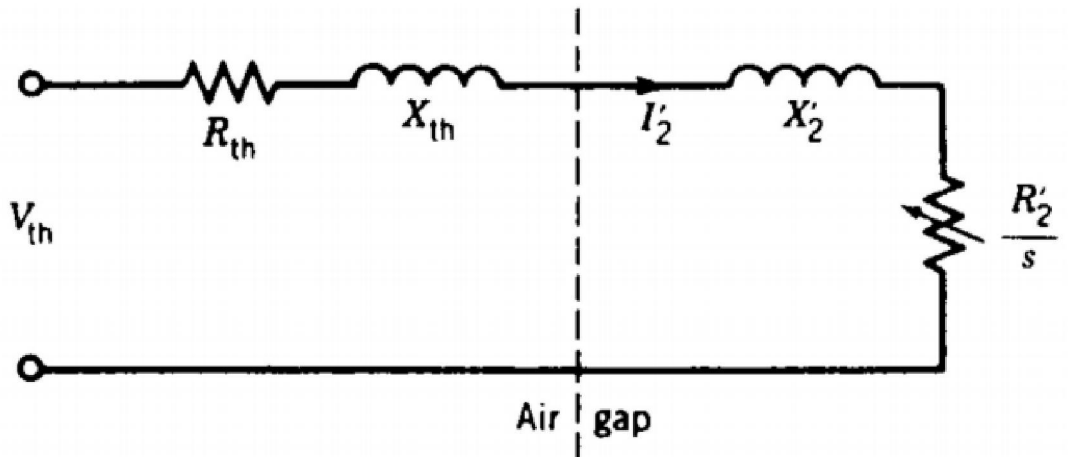
مدار معادل تونن

برای سهولت محاسبات در مدار معادل IEEE بهتر است از روش تونن استفاده گردد. به عبارت دیگر به جای استفاده از V_1، R_1، X_1 و X_m می‌توان از V_{th}، R_{th} و X_{th} استفاده نمود. با توجه به شکل ۷.۲ باید دانست:

$$V_{th} = \frac{X_m}{\left[R_1^2 + (X_1 + X_m)^2\right]^{\frac{1}{2}}} V_1 \qquad (۲۵.۲)$$

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

$$V_{th} \cong \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1 = k_{th} V_1 \qquad (۲۶.۲)$$



امپدانس تونن به قرار زیر است:

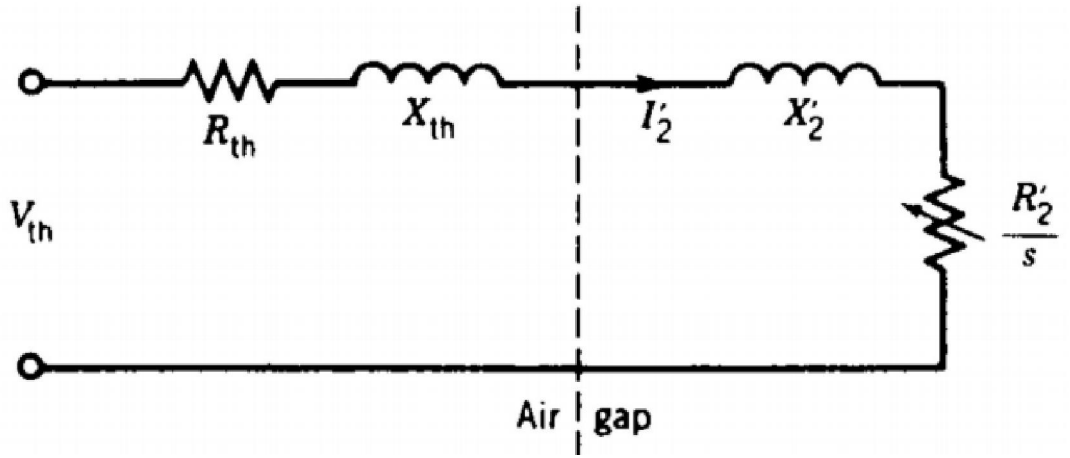
$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{th}j + X_{th} \qquad (۲۷.۲)$$

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

$$R_{th} \cong \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1 = k_{th}^2 R_1 \qquad (۲۸.۲)$$

اما معمولا $X_1 \ll X_m$ است، پس:

$$X_{th} \cong X_1 \qquad (۲۹.۲)$$



بررسی سه حالت ماشین القایی

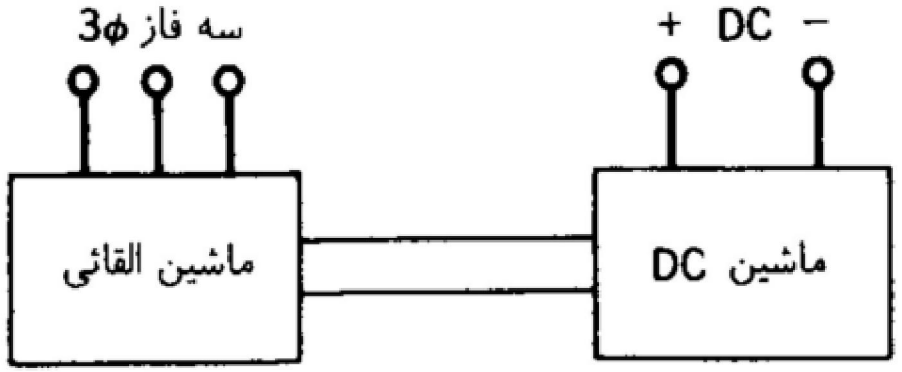
ماشین‌های القایی در سه حالت کلی زیر می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند:

۱. حالت موتوری [۱].

۲. حالت ژنراتوری [۲].

۳. حالت ترمزی [۳].

برای بررسی مفاهیم این سه حالت به شکل ۸.۲ توجه می‌کنیم که در آن یک ماشین القایی بهم‌محور با یک ماشین DC است.



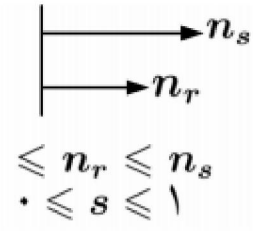
[1] Motoring mode
[2] Generating mode
[3] Plugging mode

حالت موتوری

پایانه‌های استاتور ماشین القایی را به شبکه سه‌فاز AC وصل می‌کنیم. در این‌حال میدان گردان استاتور شکل گرفته، عمل القا در روتور صورت می‌پذیرد و گشتاور حاصل می‌شود. رتور در جهت میدان گردان استاتور بچرخش در می‌آید و سرعت آن در نهایت به n_r است و همواره داریم:

$$n_r < n_s \qquad (۳۰.۲)$$

واضح است که n_s سرعت سنکرون میدان گردان استاتور است ۹.۲(الف). در حالتی که ماشین القایی به صورت موتور کار می‌کند به صورت یک محرک اولیه [۴] برای ماشین DC عمل می‌کند و ماشین DC در حالت ژنراتوری قرار می‌گیرد [۵].

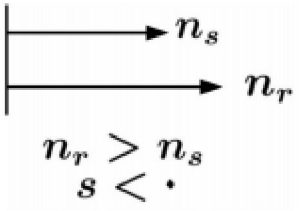


(الف) حالت موتوری

[4] Acceleration

حالت ژنراتوری

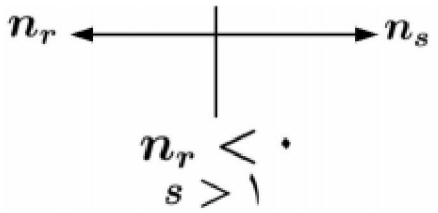
در این حالت پایانه ماشین القایی را به شبکه سه‌فاز وصل کرده و ماشین DC را در حالت موتوری به کار می‌اندازیم. سرعت چرخش موتور DC را طوری تنظیم می‌کنیم که سرعت دوران محور (n_r) از n_s یا سرعت میدان گردان استاتور ماشین القایی بیشتر گردد، اما جهت چرخش محور همان جهت دوران میدان گردان ماشین القایی باشد. در این حالت ماشین القایی در حالت ژنراتوری کار می‌کند و به آن ژنراتور القایی یا ژنراتور آسنکرون نیز گفته می‌شود. شکل ۹.۲(ب) شرایط کار ژنراتور القایی را نشان می‌دهد [۵].



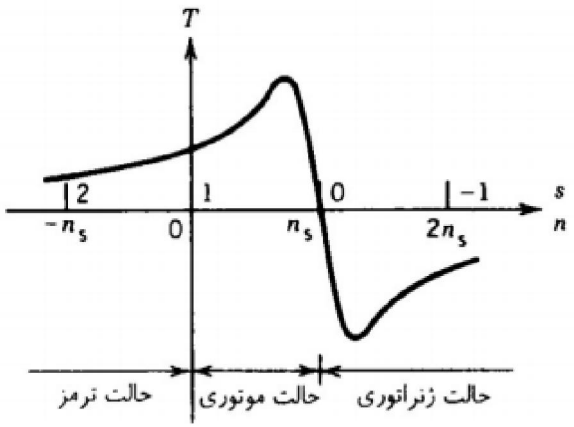
(ب) حالت ژنراتوری

حالت ترمزی

گیریم محور دو ماشین در شکل ۸.۲ از هم جدا شود و ماشین القایی به شبکه سه‌فاز وصل شود و در حالت موتوری کار کند. اگر توالی فاز ولتاژهای اعمالی به استاتور به ناگهان عوض شود و از توالی فاز abc به توالی فاز acb تغییر ماهیت دهد، در این صورت جهت چرخش میدان گردان استاتور نسبت به جهت چرخش روتور که به دوران خود به خاطر اینرسی (لختی) ادامه می‌دهد، عوض خواهد شد و حالت ترمزی پیش می‌آید. در اینحال نهایتا سرعت رتور صفر شده و در جهت مخالف شروع به دوران می‌کند و در اینجاست که باید هر چه سریعتر در لحظه سرعت صفر منبع تغذیه از موتور جدا شود. شکل ۹.۲(ج) جهت سرعت‌ها در حالت ترمزی را نشان می‌دهد. شکل ۱۰.۲ تغییرات گشتاور برحسب لغزش یا سرعت را در سه‌حالت موتوری، ژنراتوری و ترمزی نشان می‌دهد [۵].



(ج) حالت ترمزی



شکل ۱۰.۲: نمودار گشتاور- سرعت و گشتاور- لغزش ماشین القایی سه‌فاز [۵]

مشخصه‌های موتورهای القایی سه‌فاز

می‌توان با توجه به مدار معادل به بازده، ضریب توان، گشتاور راه‌انداز، گشتاور ماکزیمم و بسیاری از مشخصه‌های دیگر دست یابیم. گشتاور مکانیکی حاصله توسط هر فاز موتور این چنین بدست می‌آید:

$$P_{mech} = T_{mech}\omega_{mech} = I_2^2 \frac{R_2}{s}(1-s) \qquad (۳۱.۲)$$

که: $\omega_{mech} = \frac{2\pi n_r}{60}$ n_r سرعت موتور (محور) برحسب دور بر دقیقه است.

از مدار معادل تونن داریم:

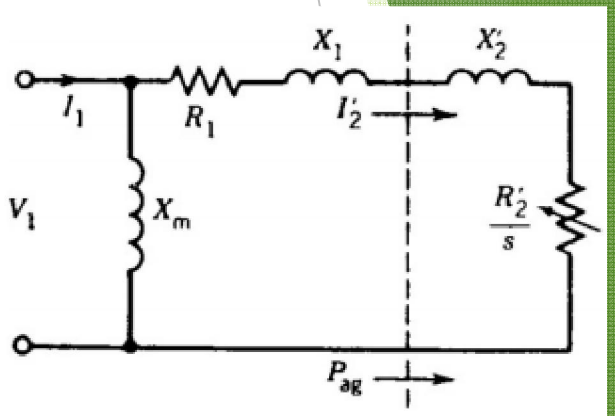
$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{th} + X_2\right)^2} \frac{R_2}{s} \qquad (۳۲.۲)$$

اگر از مدار شکل ۵.۲(ب) برای محاسبه I_2 استفاده شود، در این صورت باید در معادله بالا 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} از R_1 استفاده شود.

۳. به جای X_{th} از X_1 استفاده شود.



(ب) مدار معادل تقریبی با حذف مقاومت موازی

در شرایط لغزش کم داریم:

$$R_{th} + \frac{R_۲}{s} \gg X_{th} + X_۲ \quad \text{و} \quad \frac{R_۲}{s} \gg R_{th} \tag{۳۳.۲}$$

$$T_{mech} \cong \frac{۱}{\omega_s} \frac{V_{th}^۲}{R_۲} s \tag{۳۴.۲}$$

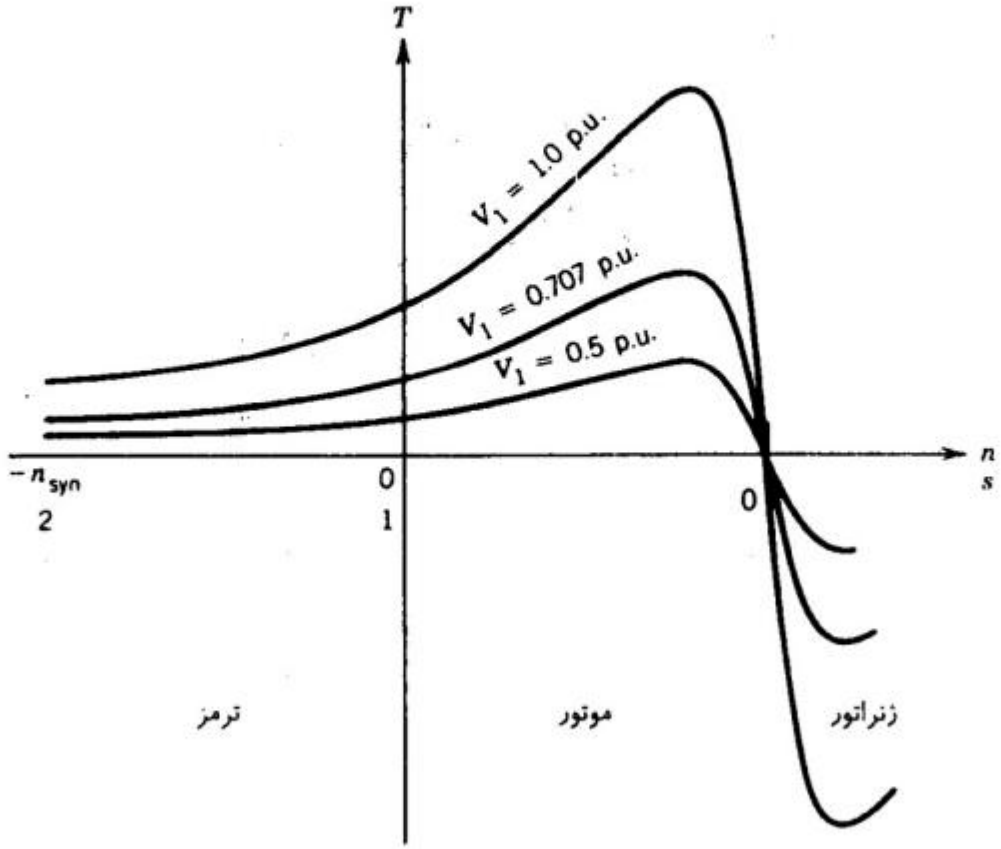
رابطه اخیر نشان می‌دهد که در لغزش کم تغییرات گشتاور نسبت به لغزش خطی است و در شکل ۱۱.۲ این تغییرات خطی حول سرعت سنکرون مشهود است. اگر لغزش زیاد باشد، داریم:

$$R_{th} + \frac{R_۲}{s} \ll X_{th} + X_۲ \tag{۳۵.۲}$$

و:

$$T_{mech} \cong \frac{۱}{\omega_s} \frac{V_{th}^۲}{(X_{th} + X_۲)^۲} \frac{R_۲}{s} \tag{۳۶.۲}$$

می‌بینیم در این ناحیه گشتاور با معکوس لغزش متناسب است و این امر در شکل ۱۱.۲ در حول $s = 1$ مشهود است. از رابطه (۳۲.۲) در می‌یابیم که گشتاور با مجذور V_{th} و در نتیجه V_1 متناسب است. شکل ۱۱.۲ منحنی گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش را در تحت ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد.



شکل ۱۱.۲: نمودار گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش به ازای ولتاژهای استاتور مختلف [۵]

برای پی‌بردن به گشتاور ماکزیمم این چنین عمل می‌کنیم: $\frac{dT}{s} = ۰$

با توجه به رابطه (۳۲.۲) و اعمال شرط فوق داریم:

$$\frac{R_۲}{s_{T_{max}}} = \left[R_{th}^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۳۷.۲)$$

به سهولت داریم:

$$s_{T_{max}} = \frac{R_۲}{\left[R_{th}^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲\right]^{\frac{۱}{۲}}} \qquad (۳۸.۲)$$

از معادلات (۳۲.۲) و (۳۸.۲) داریم:

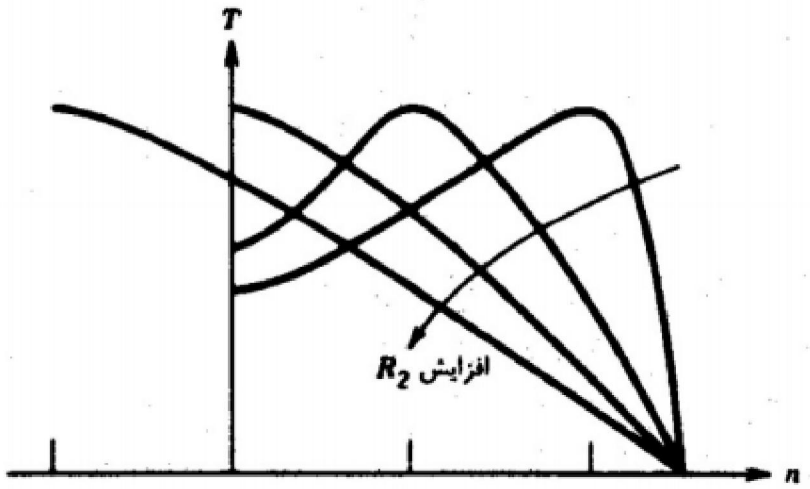
$$T_{max} = \frac{۱}{۲\omega_s} \frac{V_{th}^۲}{R_{th} + \left[R_{th}^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲\right]^{\frac{۱}{۲}}} \qquad (۳۹.۲)$$

در روابط اخیر T_{max} قله مشخصه گشتاور سرعت یا گشتاور لغزش تحت ولتاژی مفروض بوده و $s_{T_{max}}$ لغزشی است که تحت آن T_{max} رخ می‌دهد. دقت کنید که T_{max} در رابطه (۳۹.۲) مربوط به هر فاز موتور و برای پیدا کردن کل گشتاور ماکزیمم، باید رابطه (۳۹.۲) را سه برابر کرد. با توجه به معادلات فوق در می‌یابیم که:

۱. $s_{T_{max}}$ تابعی از مقاومت روتور است.

۲. T_{max} تابعی از مقاومت روتور نمی‌باشد.

لذا اگر مقاومت روتور را تغییر دهیم، مشخصه‌هایی همچون شکل ۱۲.۲ حاصل می‌شود. این امر در موتورهای با روتور سیم‌بندی شده میسر است، زیرا از طریق حلقه‌های لغزان می‌توان به هر فاز روتور رئوستای متغیر اضافه نمود و مقاومت روتور را تغییر داد. معمولا رسم بر آن است که مقاومت رئوستا را طوری تنظیم می‌کنند که گشتاور ماکزیمم در لحظه راه‌اندازی رخ دهد، تا موتور با گشتاور قابل‌ملاحظه‌ای شتاب بگیرد. پس از فزونی سرعت، رئوستا را به تدریج از مدار خارج می‌کنند.



R_{th} متناسب با مقاومت استاتور r_1 و X_{th} متناسب با x_1 و x_2 است. با توجه به این واقعیت‌ها بررسی معادله (۳۹.۲) نشان می‌دهد که [۴]:

۱. T_{max} با افزایش مقاومت استاتور r_1 کاهش می‌یابد.

۲. T_{max} با افزایش مقاومت القایی پراکندگی استاتور x_1 و مقاومت القایی پراکندگی روتور x_2 کاهش می‌یابد.

برای بدست آوردن گشتاور حداکثر بالاتر فاصله هوایی تا حد امکان کوچک نگه‌داشته می‌شود. فاصله هوایی کوچک‌تر شار بیشتری را اجازه می‌دهد که به طور متقابل بین سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور وجود داشته باشد. در نتیجه شار پراکندگی و راکتانس پراکندگی کاهش یافته و مقدار گشتاور حداکثر بیشتر خواهد شد [۴].

اگر مقاومت استاتور کوچک باشد، لذا R_{th} نیز ناچیز شده و از روابط (۳۸.۲) و (۳۹.۲) داریم:

$$s_{T_{max}} \cong \frac{R_2}{X_{th} + X_2} \qquad (۴۰.۲)$$

$$T_{max} \cong \frac{1}{2\omega_s} \frac{V_{th}^2}{X_{th} + X_2} \qquad (۴۱.۲)$$

از روابط (۳۲.۲) و (۳۹.۲) داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{\left(R_{th} + \frac{R_۲}{s}\right)^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲}{\left(R_{th} + \frac{R_۲}{s_{T_{max}}}\right)^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲} \frac{s}{s_{T_{max}}} \qquad (۴۲.۲)$$

اگر $R_۱$ و در نتیجه آن R_{th} ناچیز باشند، داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{\left(\frac{R_۲}{s}\right)^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲}{\left(\frac{R_۲}{s_{T_{max}}}\right)^۲ + \left(X_{th} + X_۲\right)^۲} \frac{s}{s_{T_{max}}} \qquad (۴۳.۲)$$

از معادلات (۴۰.۲) و (۴۳.۲) داریم:

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{\left(\frac{R_۲}{s}\right)^۲ + \left(\frac{R_۲}{s_{T_{max}}}\right)^۲}{۲\left(\frac{R_۲}{s_{T_{max}}}\right)^۲} \frac{s}{s_{T_{max}}} = \frac{s_{T_{max}}^۲ + s^۲}{۲ s_{T_{max}} s} \qquad (۴۴.۲)$$

در حقیقت رابطه (۴۴.۲) گشتاور موتور را در شرایطی خاص با گشتاور ماکزیمم مقایسه می‌کند [۵].

برای پیدا کردن بازده در موتورهای القایی سه‌فاز، باید به تلفات ماشین پی برد و بهتر است به نمودار پخش توان در موتور توجه کرد (۱۳.۲). در یک موتور القایی سه‌فاز توان ورودی به ماشین به قرار زیر است:

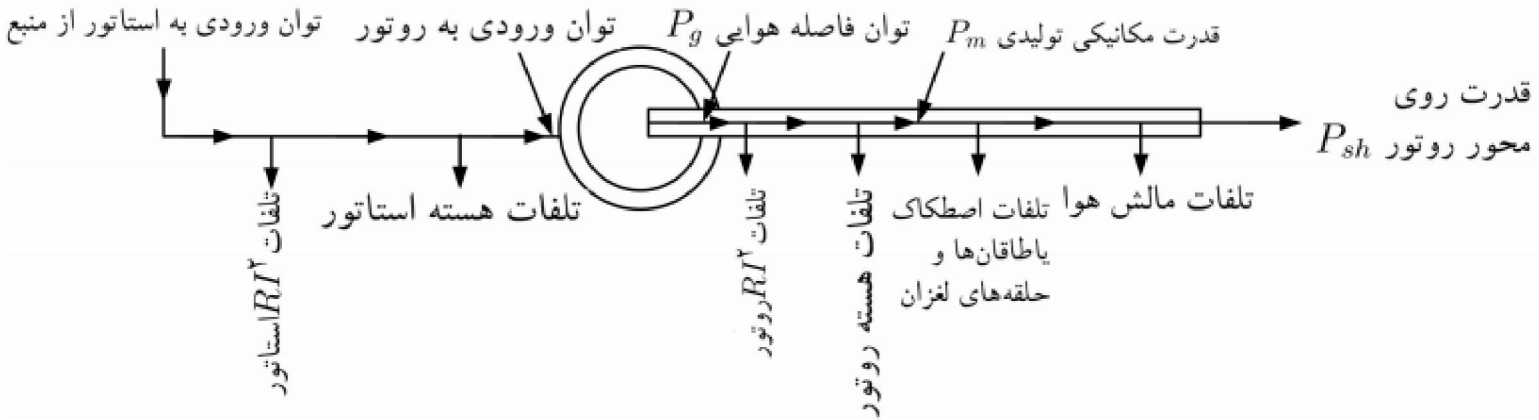
$$P_{in} = ۳V_۱I_۱cos\theta_۱ \qquad (۴۵.۲)$$

تلفات اهمی یا مسی استاتور به شرح زیر است:

$$P_۱ = ۳I_۱^۲R_۱ \qquad (۴۶.۲)$$

استاتور حاوی تلفات هسته نیز می‌باشد که مجموع تلفات هیسترزیس و جریان گردابی است. لذا پس از آن که توان ورودی تلفات استاتور اعم از تلفات هسته و تلفات مسی را تامین نمود، مابقی از فاصله هوایی می‌گذرد (۱۳.۲). به توان عبوری از فاصله هوایی P_g اطلاق می‌شود. بخشی از این توان به صورت گرما و تلفات مسی در روتور هدر می‌رود، یعنی:

$$P_۲ = ۳I_۲^۲R_۲ \qquad (۴۷.۲)$$



شکل ۱۳.۲: نمودار پخش توان در موتور القایی

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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (۴۸.۲)$$

اگر از کل تلفات به جز تلفات مسی روتور صرف‌نظر کنیمریال داریم:

$$P_g = P_{in}$$

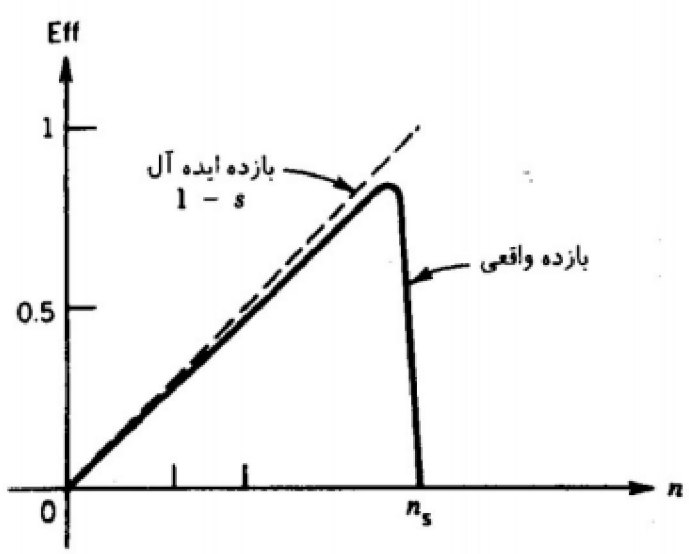
$$P_۲ = sP_g \qquad (۴۹.۲)$$

$$P_{out} = P_{mech} = P_g(۱ - s)$$

لذا بازده ایده‌آل این چنین تعریف می‌شود:

$$\eta_{\text{ایده‌آل}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = ۱ - s \qquad (۵۰.۲)$$

به بازده ایده‌آل گاهی بازده داخلی نیز گفته می‌شود، زیرا در این بازده نسبت توان خروجی و توان عبوری از فاصله هوایی مطرح است. شکل ۱۴.۲تغییرات بازده برحسب سرعت را برای موتورهای القایی نشان می‌دهد و در این شکل بازده ایده‌آل با 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 موتورها عمدتا 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. معمولا بازده موتورهای القایی سه‌فاز در شرایط اسمی حدود ۹۵ درصد است.



شکل ۱۴.۲: تغییرات بازده برحسب سرعت

مثال: یک موتور القایی سه‌فاز $۵۰Hz$، $۴۰۰V$ چهار قطب با اتصال ستاره دارای ثابت‌های فاز زیر برحسب اهم ارجاع شده به استاتور می‌باشد:

$$r_۱ = ۰/۱۵, x_۱ = ۰/۴۵, r_۲ = ۰/۱۲, x_۲ = ۰/۴۵, X_\phi = ۲۸/۹,$$

$$۴۰۰W = \text{تلفات ثابت (تلفات هسته، اصطکاک و مالش هوا)}$$

جریان استاتور، سرعت روتور، گشتاور خروجی و بازده را وقتی موتور در ولتاژ و فرکانس نامی در لغزش ۴ درصد کار می‌کند، محاسبه کنید.

حل: از مدار معادل القایی طبق شکل ۵.۲ مقاومت ظاهری دیده شده از سمت ولتاژ منبع برابر است با:

$$\overline{Z}_{AB} = r_1 + jx_1 + \frac{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)(jX_\phi)}{\frac{r_2}{s} + j(x_2 + X_\phi)} = r_1 + jx_1 + R_f + jX_f$$

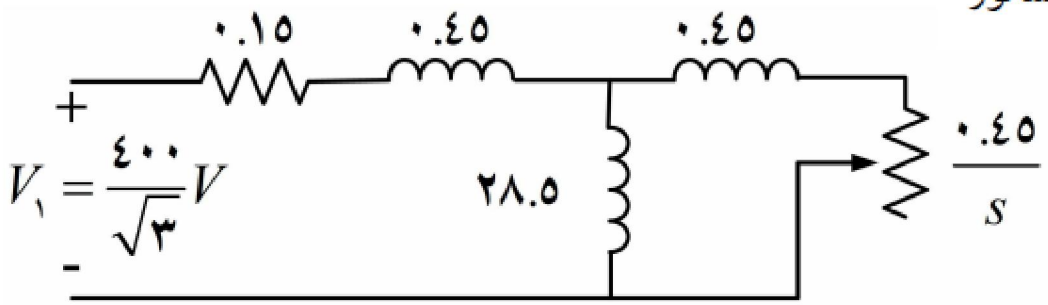
$$= ۰/۱۵ + j۰/۴۵ + \frac{\left(\frac{۰/۱۲}{۰/۰۴} + j۰/۴۵\right)(j۲۸/۵)}{\frac{۰/۱۲}{۰/۰۴} + j(۰/۴۵ + ۲۸/۵)} = ۰/۱۵ + j۰/۴۵ + ۲/۸۷ + j۰/۷۳۸$$

$$= ۳/۰۲ + j۱/۱۸۸ = ۳/۲۵\angle ۲۱/۴۷°$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{AB}} = \frac{۲۰۰\angle ۰}{\sqrt{۳}(۳/۲۵)۲۱/۴۷°} = ۷۱/۰۶\angle -۲۱/۴۷°$$

پس‌فاز ۰/۹۳ $= \cos ۲۱/۴۷° =$ ضریب توان

توان ورودی استاتور $= \sqrt{۳}V_1 I_1 \cos\phi = \sqrt{۳}(۴۰۰)(۷۱/۰۶)(۰/۹۳) = ۴۵/۷۸۴kW$



شکل ۵.۲: مدار معادل موتور القایی مثال

قدرت کل فاصله هوایی:

$$P_g = ۳I_۱^۲R_f = ۳(۷۱/۰۶)^۲(۲/۸۷) = ۴۳/۴۷۶kW$$

$$\text{سرعت سنکرون} = n_s = \frac{۲f_s}{P} = \frac{۲ \times ۵۰}{۴} = ۲۵\text{r.p.s}$$

$$\text{سرعت روتور} = n_r = (۱ - s)n_s = ۰/۹۶ \times ۲۵ = ۲۴\text{r.p.s} \quad \text{یا } ۱۴۴۰\text{r.p.m}$$

$$\omega_s = ۲\pi n_s = ۵۰\pi \frac{\text{rad}}{s}$$

$$\text{قدرت مکانیکی تولیدی} = P_m = (۱ - s)P_g = ۰/۹۶ \times ۴۳/۴۷۶ = ۴۱/۷۳۷kW$$

$$\text{قدرت خروجی} = P_{sh} = P_m - \text{تلفات ثابت} = ۴۱/۷۳۷ - ۰/۴ = ۴۱/۳۳۷kW$$

$$\text{گشتاور خروجی} = \frac{P_{sh}}{\omega_r} = \frac{۴۱۳۳۷}{(۱ - s)\omega_s} = \frac{۴۱۳۳۷}{۰/۹۶ \times ۵۰\pi} = ۲۷۵/۱۲N.m.$$

تلفات مختلف موتور القایی به شرح زیر است:

$$\text{تلفات اهمی استاتور} = ۳I_۱^۲r_۱ = ۳(۷۱/۰۶)^۲(۰/۱۵) = ۲۲۷۲/۳W$$

$$\text{تلفات اهمی روتور} = sP_g = ۰/۰۴(۴۳۴۷۶) = ۱۷۳۹W$$

$$\text{تلفات ثابت} = ۴۰۰W \Rightarrow \text{کل تلفات} = ۴۴۱۱/۳W$$

$$\text{قدرت ورودی} = P_{sh} + \text{تلفات کل} = ۴۱/۳۳۷ + ۴/۴۱۱ = ۴۵/۷۴۸kW$$

$$\text{بازده} = ۱ - \frac{\text{تلفات}}{\text{ورودی}} = ۱ - \frac{۴/۴۱۱}{۴۵/۷۴۸} = ۰/۹۰۳۶ \quad \text{یا} \quad ۹۰/۳۶٪$$

مثال: یک موتور ۴۶۰ ولتی، ۶۰ هرتزی، چهارقطبی مفروض است و روتور آن از نوع قفس سنجابی می‌باشد. سرعت اسمی موتور ۱۷۱۰ دور بر دقیقه است. جریان راه‌اندازی این موتور چهار برابر جریان اسمی می‌باشد [۵].

۱. گشتاور راه‌اندازی چند درصد گشتاور اسمی است.

۲. در چه سرعت و لغزشی گشتاور ماکزیمم رخ می‌دهد.

۳. گشتاور ماکزیمم چند درصد گشتاور اسمی است.

۱. سرعت سنکرون به قرار زیر است:

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times ۶۰}{۴} = ۱۸۰۰ \text{ r.p.m}$$

$$s_{FL} = \frac{۱۸۰۰ - ۱۷۱۰}{۱۸۰۰} = ۰/۰۵$$

$$T = \frac{R_۲ I_۲^۲}{s\omega_s} \propto \frac{R_۲ I_۲^۲}{s} \Rightarrow \frac{T_{st}}{T_{FL}} = \left(\frac{I_{۲st}}{I_{۲FL}}\right)^۲ s_{FL}$$

$$T_{st} = ۶^۲ \times ۰/۰۵ \times T_{FL} = ۱/۸ T_{FL} = ۱۸۰ \,\% \, T_{FL}$$

۲.

$$\frac{T_{st}}{T_{max}} = \frac{۲ s_{T_{max}}}{۱ + s_{T_{max}}^۲}, \quad \frac{T_{FL}}{T_{max}} = \frac{۲ s_{T_{max}} s_{FL}}{s_{T_{max}}^۲ + s_{FL}^۲}$$

$$\Rightarrow \frac{T_{st}}{T_{FL}} = \frac{s_{T_{max}}^۲ + s_{FL}^۲}{s_{T_{max}}^۲ \times s_{FL} + s_{FL}} \Rightarrow ۱/۸ = \frac{s_{T_{max}}^۲ + ۰/۰۰۲۵}{۰/۰۵ + ۰/۰۵ \times s_{T_{max}}^۲}$$

$$s_{T_{max}}^۲ + ۰/۰۰۲۵ = ۰/۰۹ + ۰/۰۹ s_{T_{max}}^۲ \Rightarrow s_{T_{max}} = \sqrt{\left(\frac{۰/۰۸۷۵}{۰/۹۱}\right)} = ۰/۳۱$$

$$(\text{سرعت تحت گشتاور ماکزیمم}) = (۱ - ۰/۳۱) \times ۱۸۰۰ = ۱۲۴۲ \text{ r.p.m}$$

۳.

$$T_{max} = \frac{۱ + s_{T_{max}}^۲}{۲ s_{T_{max}}} T_{st} = \frac{۱ + ۰/۳۱^۲}{۲ \times ۰/۳۱} \times ۱/۸ T_{FL} = ۳/۱۸ T_{FL} = ۳۱۸ \,\% \, T_{FL}$$

مثال: در مثال قبل گشتاور داخلی حداکثر را در شرایط زیر بدست آورید [۴]:

۱. ۵۰Hz و ۲۳۰V/ph

۲. ۵۰Hz و ۱۱۵V/ph

۳. ۲۵Hz و ۱۱۵V/ph

۴. ۵Hz و ۲۳V/ph

پارامترهای مدار معادل تونن در ۵۰Hz از مثال قبل برابرند با:

$$Z_{th} = \frac{(r_1 + jx_1)(jX_\phi)}{r_1 + jx_1 + jX_\phi} = \frac{(0.15 + j0.45)(j28.5)}{0.15 + j28.95} = \frac{(0.15 + j0.45)(j28.5)}{j28.95}$$

$$R_{th} = \frac{0.15 \times j28.5}{j28.95} = 0.1476, \quad X_{th} = \frac{0.45 \times j28.5}{j28.95} = 0.443$$

$$r_2 = 0.12, \quad x_2 = 0.45, \quad V_{th} = \frac{28.5}{28.95} V_1 = 0.9845 V_1, \quad \omega_s = \frac{4\pi f}{P} = \pi f$$

برای $f = ۵۰\text{Hz}$ داریم:

$$T_{max} = \frac{۳}{۲\omega_s} \frac{V_{th}^۲}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^۲ + (X_{th} + x_۲)^۲}} = \frac{۳}{۲ \times ۵۰\pi} \frac{V_{th}^۲}{۰/۱۴۷۶ + \sqrt{۰/۱۴۷۶^۲ + ۰/۸۹۳۲}}$$
$$= ۹/۰۷۱ \times ۱۰^{-۳} V_{th}^۲$$

۱. وقتی ولتاژ منبع ۵۰Hz و ۲۳۰V/ph باشد.

$$V_{th} = ۰/۹۸۴۵ \times ۲۳۰ = ۲۲۶/۴\,V, \quad T_{max} = ۹/۰۷۱ \times ۱۰^{-۳} \times ۲۲۶/۴۴^۲ = ۴۶۵/۱۲\,\text{N.m}$$

۲. وقتی ولتاژ منبع ۵۰Hz و ۱۱۵V/ph باشد.

$$V_{th} = ۰/۹۸۴۵ \times ۱۱۵ = ۱۱۳/۲۲\,V, \quad T_{max} = ۹/۰۷۱ \times ۱۰^{-۳} \times ۱۱۳/۲۲^۲ = ۱۱۶/۲۸\,\text{N.m}$$

چنانچه انتظار می‌رفت گشتاور حداکثر $\frac{۱}{۴}$ گشتاور حداکثر بدست آمده در بند ۱ است.

۳. وقتی ولتاژ منبع ۲۵Hz و ۱۱۵V/ph باشد.

$$V_{th} = ۰/۹۸۴۵ \times ۱۱۵ = ۱۱۳/۲۲\,V, \quad R_{th} = ۰/۱۴۷۶,$$

$$X_{th} = \frac{(\frac{۱}{۲} \times ۰/۴۵)(\frac{۱}{۲} \times ۲۸/۵)}{\frac{۱}{۲} \times ۲۸/۹۵} = ۰/۲۲۱۵, \quad x_۲ = \frac{۱}{۲} \times ۰/۴۵ = ۰/۲۲۵$$

$$T_{max} = \frac{۳}{۲ \times ۵۰\pi} \frac{۱۱۳/۲۲^۲}{۰/۱۴۷۶ + \sqrt{۰/۱۴۷۶^۲ + ۰/۴۴۶۵^۲}} = ۳۹۶/۲۴\,\text{N.m}$$

۴. وقتی ولتاژ منبع ۵Hz و ۲۳V/ph باشد.

$$V_{th} = ۰/۹۸۴۵ \times ۲۳ = ۲۲/۶۴۴\,V, \quad R_{th} = ۰/۱۴۷۶,$$

$$X_{th} = \frac{۱}{۱۰} \times ۰/۴۴۳ = ۰/۰۴۴۳, \quad x_۲ = \frac{۱}{۱۰} \times ۰/۴۵ = ۰/۰۴۵$$

$$T_{max} = \frac{۳}{۲ \times ۵۰\pi} \frac{۲۲/۶۴۴^۲}{۰/۱۴۷۶ + \sqrt{۰/۱۴۷۶^۲ + ۰/۰۸۹۳^۲}} = ۱۵۲/۹۶\,\text{N.m}$$

این مثال نشان می‌دهد که اگر $\frac{V}{f}$ ثابت نگه‌داشته شود، گشتاور حداکثر در فرکانس پایین‌تر کاهش می‌یابد.

مثال: روتور یک موتور القایی سه‌فاز دارای مقاومت اهمی $۰/۰۴ \frac{\Omega}{ph}$ و مقاومت القایی حالت سکون $۰/۲ \frac{\Omega}{ph}$ است. چه مقاومت خارجی در مدار روتور باید قرار داد تا در راه‌اندازی نصف گشتاور حداکثر بدست آید. از مقاومت ظاهری استاتور صرف‌نظر کنید. این مقاومت خارجی جریان و ضریب توان حالت راه‌اندازی را چند درصد تغییر می‌دهد؟

$$\frac{T_{est}}{T_{max}} = \frac{۱}{۲} = \frac{۲}{\frac{s_{mT}}{۱} + \frac{۱}{s_{mT}}} \Rightarrow s_{mT}^{۲} - ۴s_{mT} + ۱ = ۰ \Rightarrow s_{mT} = ۳/۷۳ \text{ یا } ۰/۲۷$$

مقدار بزرگتر ۳/۷۳ قابل‌قبول نیست لذا $s_{mT} = ۰/۲۷$ است. برای مقاومت ظاهری ناچیز استاتور داریم:

$$\frac{r_۲'}{s_{mT}} = x_۲ \Rightarrow r_۲' = ۰/۲ \times ۰/۲۷ = ۰/۰۵۴$$

مقاومت خارجی که باید در مدار روتور قرار گیرد برابر است با:

$$= r_۲' - r_۲ = ۰/۰۵۴ - ۰/۰۴ = ۰/۰۱۴$$

جریان و ضریب توان بدون مقاومت خارجی:

$$I_{st} = \frac{V}{\sqrt{۰/۰۴^{۲} + ۰/۲^{۲}}} = ۴/۹۰۳V, \quad cos\theta = \frac{۰/۰۴}{\sqrt{۰/۰۴^{۲} + ۰/۲^{۲}}} = ۰/۱۹۶$$

جریان و ضریب توان با مقاومت خارجی:

$$I_{st} = \frac{V}{\sqrt{۰/۰۵۴^{۲} + ۰/۲^{۲}}} = ۴/۸۲۷V, \quad cos\theta = \frac{۰/۰۵۴}{\sqrt{۰/۰۵۴^{۲} + ۰/۲^{۲}}} = ۰/۲۶۱$$

$$\text{درصد کاهش در جریان راه‌اندازی} = \frac{۴/۹۰۳ - ۴/۸۲۷}{۴/۹۰۳} \times ۱۰۰ = ۱/۵۵٪$$

$$\text{درصد اصلاح ضریب توان} = \frac{۰/۲۶۱ - ۰/۱۹۶}{۰/۱۹۶} \times ۱۰۰ = ۳۳/۱۶٪$$

کنترل سرعت

اگر موتور القایی سه‌فاز 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 تقریبا از نوع موتورهای سرعت ثابت فرض می‌شوند. اما در برخی از صنایع لازم است مه سرعت موتور در یک محدوده و طیف نسبتا 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 دارد. ولی برعکس موتورهای القایی بویژه از نوع قفس سنجابی آن ارزان و محکم بوده و کموتاتور نیاز ندارد و لذا برای سرعت‌های زیاد بسیار مناسب‌اند. امروزه با پیشرفت علم الکترونیک قدرت و پیدایش کنترل‌کننده‌های حالت جامد، کنترل سرعت یا کنترل دور موتورهای القایی رو به تکامل است. اما این کنترل‌کننده‌ها نسبتا گران بوده و زمان می‌طلبد تا به صورت ارزان در دسترس عموم قرار بگیرند [۵].

تغییر قطب‌ها

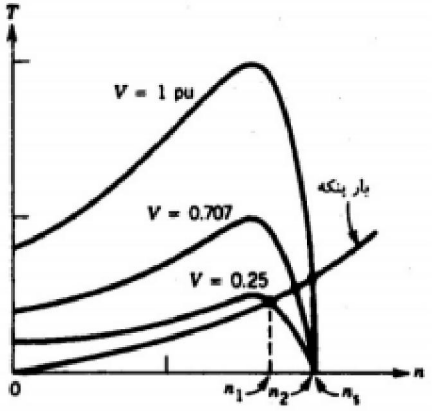
می‌دانیم سرعت موتور خیلی به سرعت سنکرون نزدیک است و داریم:

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P}$$

لذا اگر n_s را تغییر دهیم، سرعت چرخش محور نیز تغییر می‌نماید. برای تغییر n_s می‌توان از تغییر تعداد قطب‌ها استفاده نمود. این امر توسط تغییر اتصالات کلاف‌های استاتور امکان‌پذیر است. معمولا تغییر تعداد قطب‌ها تز نسبت ۱ به ۲ تبعیت می‌کند و لذا در این روش دو سرعت سنکرون متفاوت حاصل می‌گردد. گفتنی است در برخی از موتورها استاتور دارای دو سیم‌پیچ سه‌فاز جداگانه و مستقل است و هرکدام دو سرعت سنکرون مهیا می‌سازند. پس با چهار سرعت سنکرون مواجه خواهیم بود. در روتورهای سیم‌بندی شده در هنگام تغییر تعداد قطب‌های استاتور، باید آرایش سیم‌پیچ روتور را تغییر داد و همواره باید تعداد قطب‌های روتور و استاتور یکسان باشد. اما موتور قفس سنجابی کار ماشین کماکان فقط با تغییر قطب‌های استاتور ادامه خواهد یافت و به تغییر بافت روتور نیاز نداریم. با تغییر تعداد قطب‌های استاتور، سرعت به صورت پله‌ای تغییر می‌کند و اینگونه موتورهای سه‌فاز عمدتا گران هستند [۵].

کنترل ولتاژ

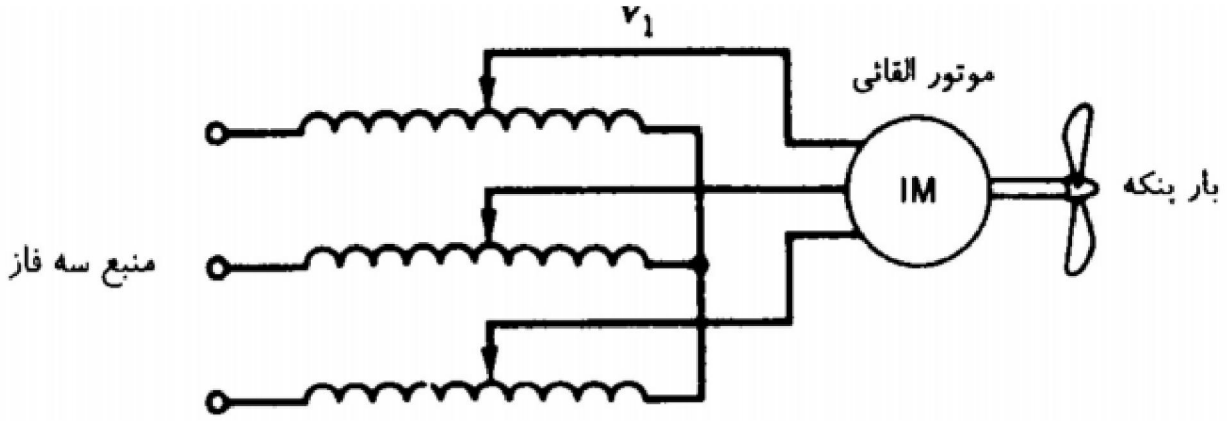
از مباحث قبلی دریافتیم که گشتاور موتور القایی سه‌فاز با مجذور ولتاژ متناسب است. شکل ۱۶.۲ مشخصه‌های گشتاور سرعت موتور القایی سه‌فاز را تحت ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد. بار این موتور یک پنکه است. با توجه به شکل با تغییر ولتاژ اعمال به استاتور می‌توان پنکه را در سرعت‌های n_1 تا n_2 چرخاند. محل تلاقی مشخصه‌های گشتاور سرعت و گشتاور بار، نقطه کار [1] را مشخص می‌سازد [۵].



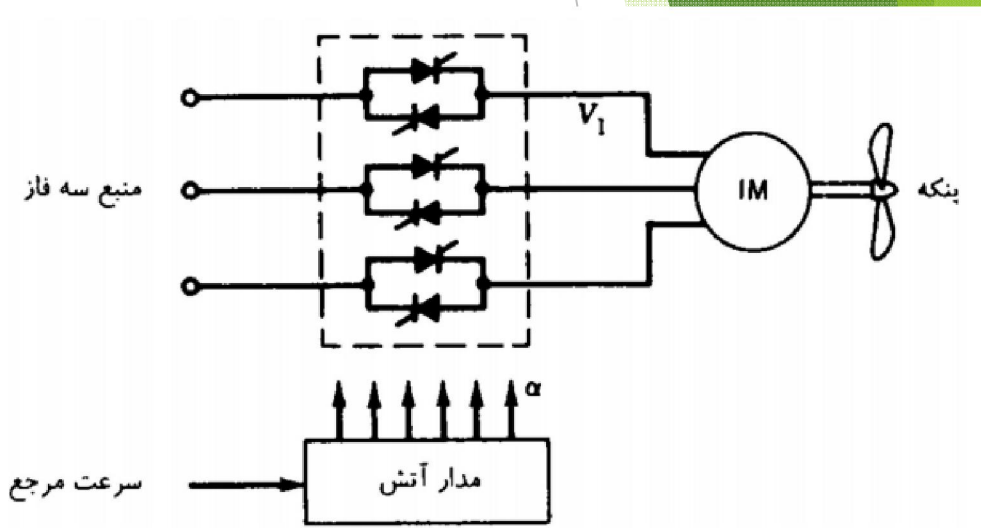
شکل ۱۶.۲: مشخصه گشتاور سرعت تحت ولتاژهای گوناگون

[1] Operating point

تغییر ولتاژ پایانه استاتور می‌تواند توسط اتوترانسفورماتور با خروجی متغیر انجام گیرد (شکل ۱۷.۲). یکی دیگر از روش‌های تغییر ولتاژ استفاده از کنترل‌کننده‌های حالت جامد یا الکترونیکی است (شکل ۱۸.۲). اتوترانسفورماتور به ماشین ولتاژ سینوسی اعمال می‌کند، اما کنترل‌کننده‌های حالت جامد ولتاژ غیرسینوسی برای موتور فراهم می‌نمایند. در ماشین‌های کوچک می‌توان مستقیما آن‌را به کنترل‌کننده حالت جامد که یک کنترل‌کننده تریستوری است متصل نمود. اما در موتورهای بزرگ بین کنترل‌کننده تریستوری و موتور باید فیلتر قرار داد، زیرا در غیر این صورت جریان‌های با هارمونیک بالا در خط تغذیه موتور براه می‌افتد [۵].

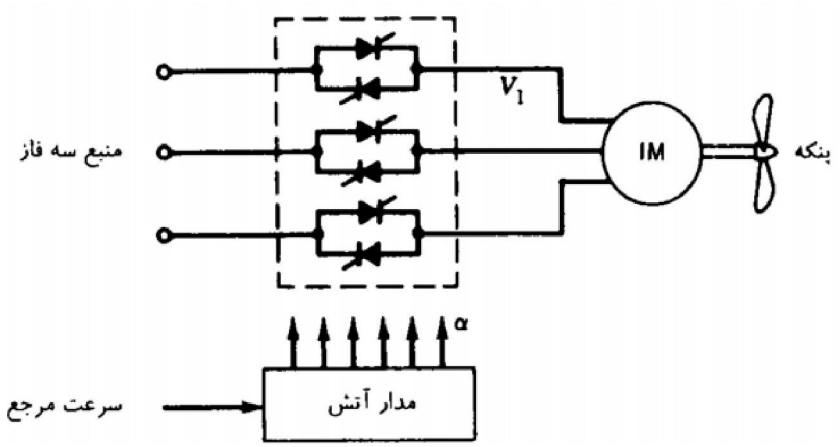


شکل ۱۷.۲: نحوه اعمال ولتاژ به استاتور توسط اتوترانسفورماتور [۵]



شکل ۱۸.۲: نحوه اعمال ولتاژ به استاتور توسط کنترل‌کننده حالت جامد (تریستوری) با حلقه باز [۵]

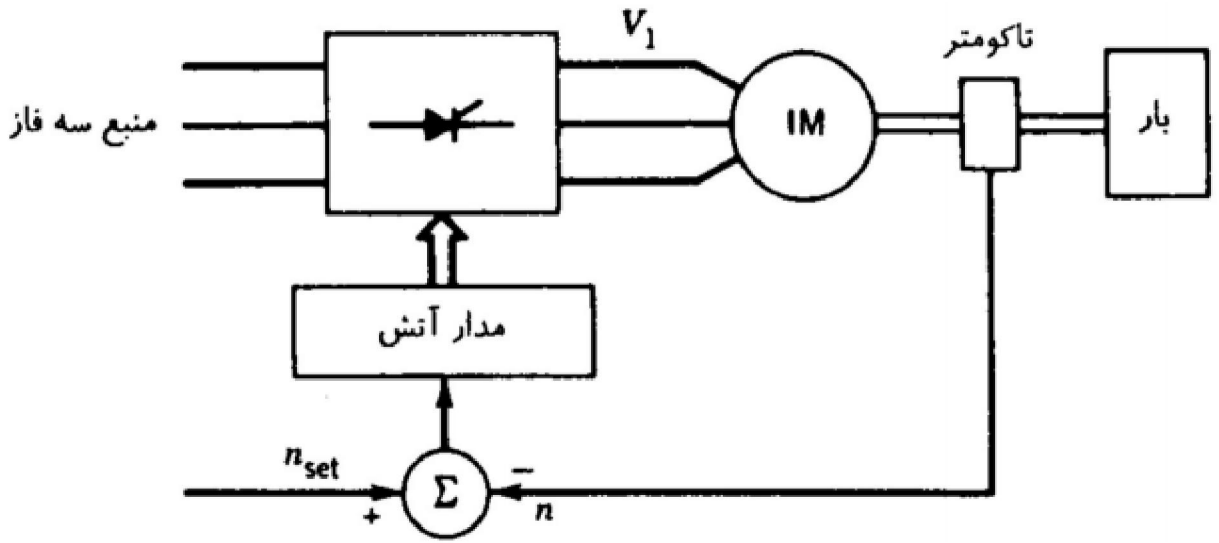
در کنترل‌کننده تریستوری شکل ۱۸.۲ سیگنال فرمان [1] برای سرعت خاص از پیش تنظیم‌شده‌ای، تریستورها را در زاویه خاص آتش می‌کند، تا ولتاژ مفروضی برای پایانه موتور حاصل گردد. به α زاویه آتش [2] گفته می‌شود. اگر سیگنال فرمانل سرعت عوض شود، زاویه آتش تریستورها تغییر کرده و ولتاژ جدیدی به موتور اعمال می‌گردد. در نتیجه، به سرعت جدیدی می‌رسیم. اگر کنترل سرعت دقیق مدنظر باشد، سیستم کنترل حلقه باز [3] در برخی کاربردها ارضا کننده نیست [۵].



شکل ۱۸.۲: نحوه اعمال ولتاژ به استاتور توسط کنترل‌کننده حالت جامد (تریستوری) با حلقه باز [۵]

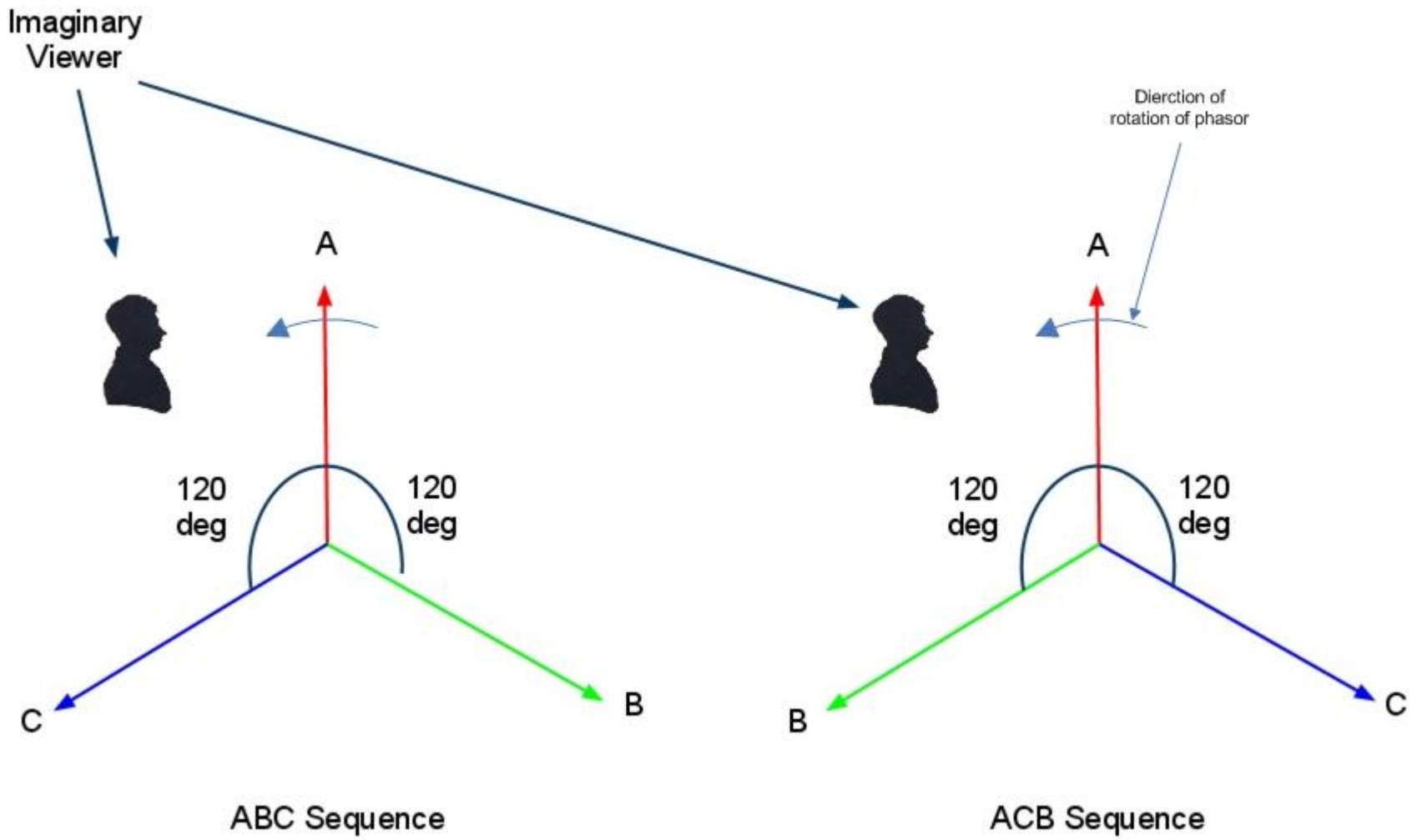
[1] Command Signal
[2] Firing angle
[3] Open loop control system

شکل ۱۹.۲ یک سیستم کنترل ولتاژ تریستوری با حلقه بسته [۴] را نشان می‌دهد. گیریم به عللی سرعت موتور افت کند، در این صورت تفاضل بین سرعت مرجع (n_{set}) و سرعت واقعی موتور (n) باعث تغییر زاویه آتش تریستورها می‌گردد. در نتیجه، ولتاژ پایانه ماشین افزایش می‌یابد. این امر باعث فزونی گشتاور شده و سرعت به مقدار قبل از اغتشاش خواهد رسید [۵].



شکل ۱۹.۲: نحوه اعمال ولتاژ به استاتور توسط کنترل‌کننده حالت جامد (تریستور) با حلقه بسته [۵]

توالی فاز مثبت و منفی



بازگشت