موتورهای القایی و کنترل آن‌ها

این ماشین دارای دو بخش روتور و استاتور است. سیم‌پیچی تحریک یک سیم‌پیچی سه‌فاز متعادل است که برروی استاتور بسته شده است. چنانچه این سیم‌پیچی‌ها از منبع ولتاژ سه‌فاز متفارن تغذیه شوند، جریان سه‌فاز سینوسی درون این سیم‌پیچی‌ها جاری می‌شود:

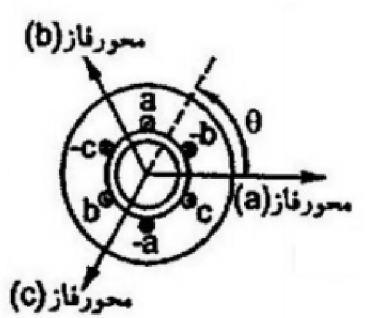
$$
\begin{aligned}
i_a &= I_m cos(\omega_s t + \phi) \\
i_b &= I_m cos(\omega_s t + \phi - \frac{۲\pi}{۳}) \\
i_c &= I_m cos(\omega_s t + \phi + \frac{۲\pi}{۳})
\end{aligned}
\qquad (۱.۲)
$$

در اثر عبور این جریان‌های سه‌فاز سینوسی، سه میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز خواهند داشت. با توجه به شکل ۱.۲ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf [۲]) تولید شده توسط هر فاز در زاویه θ برابر است با:

$$\begin{aligned} F_a &= k_p i_a cos\theta \\ F_b &= k_p i_b cos(\theta - \frac{۲\pi}{۳}) \\ F_c &= k_p i_c cos(\theta + \frac{۲\pi}{۳}) \end{aligned} \quad (۲.۲)$$

k_p ضریب ثابتی است که به تعداد دور سیم‌پیچی و ضریب سیم‌پیچی بستگی دارد. با جایگذاری روابط (۱.۲) در روابط (۲.۲) نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} F_a &= k_p I_m cos(\omega_s t + \phi) cos\theta \\ F_b &= k_p I_m cos(\omega_s t + \phi - \frac{۲\pi}{۳}) cos(\theta - \frac{۲\pi}{۳}) \\ F_c &= k_p I_m cos(\omega_s t + \phi + \frac{۲\pi}{۳}) cos(\theta + \frac{۲\pi}{۳}) \end{aligned} \quad (۳.۲)$$



۱.۲: نیروی محرکه مغناطیسی در یک ماشین سه‌فاز

میدان برآیند در زاویه θ برابر است با:

$$F_{eq} = F_a + F_b + F_c = \frac{۳}{۲} k_p I_m cos(\omega_s t + \phi - \theta) = \frac{۳}{۲} F_m cos(\omega_s t + \phi - \theta) \quad (۴.۲)$$

رابطه (۴.۲) نشان می‌دهد که مقدار دامنه میدان برآیند ثابت است و با سرعت ثابت ω_s (سرعت سنکرون) در حال گردش است. به این میدان برآیند، میدان گردان می‌گویند.

[2] Magnetomotive force

روتور موتورهای القایی سه‌فاز از نظر ساختمان بر دو نوع است:

۱. اگر درون شیارهای روتور، سیم‌پیچی مسی یا آلومینیومی جاسازی شود، روتور سیم‌بندی شده خواهیم داشت. این سیم‌پیچی شبیه سیم‌پیچی استاتور سه‌فاز می‌باشد. بنابراین در روتور سیم‌بندی شده با سه سیم‌پیچی مواجه‌ایم و در نتیجه شش پایانه خواهیم داشت. سه پایانه را در درون ماشین به هم متصل می‌کنند و سه پایانه دیگر را از ماشین خارج کرده به سه حلقه لغزان برروی محور موتور وصل می‌کنیم. برروی این سه حلقه لغزان سه جاروبک ساکن وجود دارد و توسط این جاروبک‌ها می‌توان مدار روتور را به مدارهای دیگر از قبیل رئوستا جهت کنترل سرعت متصل نمود.

۲. اگر درون شیارهای روتور میله‌های آلومینیومی یا مسی تعبیه شود، روتور قفس سنجابی خواهیم داشت. این میله‌ها از هر دو سمت به هم متصلند. به عبارت دیگر میله‌ها از هر دو سمت اتصال کوتاه شده‌اند. بنابراین در روتورهای قفس سنجابی حلقه لغزانی نداریم و هیچ‌گونه پایانه‌ای از روتور خارج نمی‌شود.

اگر تعداد قطب‌های ماشین القایی p و فرکانس ولتاژ اعمالی به استاتور f_s باشد، آنگاه سرعت سنکرون برحسب دور بر دقیقه (r.p.m) برابر است با:

$$n_s = \frac{۱۲۰ f_s}{p} \qquad (۵.۲)$$

سرعت سنکرون برحسب رادیان بر ثانیه ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$) برابر است با:

$$\omega_s = \frac{۴\pi f_s}{p} \qquad (۶.۲)$$

وقتی روتور ساکن است، میدان گردان با سرعت n_s سیم‌پیچی‌های روتور را قطع می‌کند اما اگر روتور با سرعت n_r در جهت میدان مغناطیسی گردان بچرخد، میدان گردان با سرعت $n_s - n_r$ سیم‌پیچی‌های روتور را قطع می‌کند. بنابراین ولتاژ القا شده به سرعت نسبی بین میدان گردان و روتور بستگی دارد. از این رو کمیتی به نام لغزش را برای یک ماشین القایی تعریف می‌کنند:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \qquad (۷.۲)$$

در لحظه راه‌اندازی ($n_r = ۰$)، $s = ۱$ و در سرعت سنکرون ($n_r = n_s$)، $s = ۰$ است. فرکانس ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های (یا میله‌های) روتور برابر است با:

$$f_r = s f_s \qquad (۸.۲)$$

بنابراین سرعت میدان گردان روتور نسبت به روتور به صورت مقابل خواهد بود:

$$n_r = \frac{۱۲۰ f_r}{p} = \frac{۱۲۰ s f_s}{p} = s n_s \qquad (۹.۲)$$

وقتی روتور در سرعت n_r می‌چرخد، فرکانس روتور sf_s بوده و میدان حاصله روتور با سرعت $= \frac{۱۲۰sf_s}{p}$ sn_s نسبت به روتور می‌چرخد. اما روتور با سرعت مکانیکی n_r نسبت به استاتور می‌چرخد. لذا سرعت میدان روتور نسبت به استاتور معادل مجموع سرعت مکانیکی روتور n_r و سرعت میدان روتور sn_s نسبت به روتور است. به این ترتیب سرعت میدان روتور نسبت به استاتور برابر است با:

$$n_r + sn_s = n_s(۱ - s) + sn_s = n_s \qquad (۱۰.۲)$$

اما سرعت میدان استاتور نسبت به استاتور برابر سرعت سنکرون n_s است. نتیجه این است که میدان‌های استاتور و روتور نسبت به یکدیگر در تمام سرعت‌های ممکن روتور ساکنند. از آنجا که سرعت نسبی بین میدان‌های استاتور و روتور صفر است، گشتاور پایداری در اثر متقابل آن‌ها تولید شده و گردش ادامه پیدا می‌کند [۴].

روتور یک موتور القایی هرگز نمی‌تواند به سرعت سنکرون برسد. در صورتی که سرعت روتور به مقدار سنکرون برسد، هادی‌های روتور نسبت به میدان مغناطیسی گردان ساکن خواهد بود و در نتیجه در هادی‌های روتور e.m.f [۱] نیروی محرکه الکتریکی القا نمی‌شود و لذا m.m.f روتور صفر خواد بود و بنابراین گشتاوری بوجود نخواهد آمد [۴]. لذا بایستی همواره سرعت گردش روتور از سرعت سنکرون کمتر باشد تا گشتاور تولید شود.

مثال: یک موتور القایی سه‌فاز ۵۰ هرتز، سرعت بارکامل ۱۴۴۰ r.p.m دارد. برای این موتور مطلوبست محاسبه [۴]:

۱. تعداد قطب‌ها

۲. لغزش بارکامل و فرکانس روتور

۳. سرعت میدان استاتور نسبت به استاتور

۴. سرعت میدان استاتور نسبت به روتور

۵. سرعت میدان روتور نسبت به روتور

۶. سرعت میدان روتور نسبت به استاتور

۷. سرعت میدان روتور نسبت به میدان گردان استاتور.

۱. چون سرعت بار کامل کمی از سرعت سنکرون کمتر است، بنابراین می‌توان از آن اه جای سرعت سنکرون استفاده نمود:

$$n_s = \frac{۱۲۰ f_s}{p} \Rightarrow ۱۴۴۰ = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{p} \Rightarrow p = ۴/۱۷$$

چون تعداد قطب‌ها باید عدد صحیح زوج باشد بنابراین $p = ۴$ است.

۲.

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

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۴$$

$$f_r = s f_s = ۰/۰۴ \times ۵۰ = ۲ \, Hz$$

۳. سرعت میدان گردان استاتور نسبت به استاتور $n_s = ۱۵۰۰$ r.p.m است.

۴. $n_s - n_m = ۱۵۰۰ - ۱۴۴۰ = ۶۰$ r.p.m

۵. $sn_s = \frac{۱۲۰ f_r}{p} = \frac{۱۲۰ \times ۲}{۴} = ۶۰$ r.p.m

۶. $n_r + sn_s$ r.p.m

۷. از آنجایی که میدان‌های استاتور و روتور در سرعت سنکرون ۱۵۰۰ r.p.m نسبت به استاتور می‌چرخند، سرعت میدان روتور نسبت به میدان استاتور صفر است.

مدار معادل یک موتور القایی

مدار معادل روتور

مدار معادل روتور یک موتور القایی در شکل ۲.۲ نشان داده شده است. جریان هر فاز روتور در لغزش s از معادله زیر بدست می‌آید:

$$I_۲ = \frac{sE_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + (sx_۲)^۲}} = \frac{E_۲}{\sqrt{(\frac{r_۲}{s})^۲ + x_۲^۲}} \qquad (۱۱.۲)$$

جریان روتور نسبت ولتاژ روتور به اندازه زاویه ضریب توان روتور $\theta_۲$ عقب است:

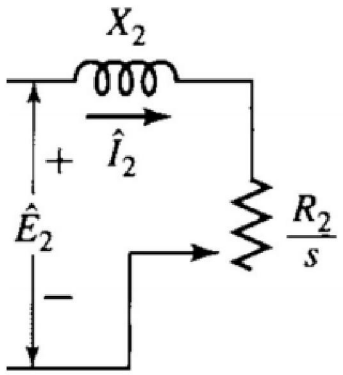
$$\theta_۲ = tan^{-۱}\frac{sx_۲}{r_۲} \qquad (۱۲.۲)$$

از مدار شکل ۲.۲ دیده می‌شود که قدرت هر فاز ورودی روتور برابر است با:

$$P_g = E_۲ I_۲ cos\theta_۲ \qquad (۱۳.۲)$$

اما داریم:

$$cos\theta_۲ = \frac{\text{مقاومت اهمی هر فاز روتور}}{\text{مقاومت ظاهری هر فاز روتور}} = \frac{\frac{r_۲}{s}}{\sqrt{(\frac{r_۲}{s})^۲ + x_۲^۲}} \qquad (۱۴.۲)$$



شکل ۲.۲: مدار معادل روتور یک موتور القایی

پس قدرت هر فاز روتور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_g = \frac{E_۲}{\sqrt{(\frac{r_۲}{s})^۲ + x_۲^۲}} I_۲ \frac{r_۲}{s} = I_۲^۲ \frac{r_۲}{s} \qquad (۱۵.۲)$$

از شکل نیز پیداست که قدرت ورودی هر فاز رتور معادل $I_۲^۲ \frac{r_۲}{s}$ است زیرا مقاومت القایی $x_۲$ قدرتی مصرف نمی‌کند [۴].

P_g قدرت انتقالی از استاتور به روتور از طریق فاصله هوایی می‌باشد. به این جهت P_g را قدرت فاصله هوایی می‌نامند. عبارت P_g را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} P_g &= I_۲^۲ \frac{r_۲}{s} = I_۲^۲ r_۲ + I_۲^۲ r_۲ (\frac{۱ - s}{s}) \\ &= \text{قدرت مکانیکی تولیدی روتور} P_m + \text{(تلفات اهمی روتور)} \\ &= sP_g + (۱ - s)P_g \end{aligned} \qquad (۱۶.۲)$$

$$P_m = (۱ - s)P_g = I_۲^۲ r_۲ (\frac{۱ - s}{s}) \qquad (۱۷.۲)$$

$$\text{تلفات اهمی روتور} = (\frac{s}{1-s})P_m = sP_g \qquad (18.2)$$

گشتاور داخلی (ناخالص) تولیدی هر فاز برابر است با:

$$T_e = \frac{\text{قدرت مکانیکی داخلی تولیدی روتور}}{\text{سرعت روتور به رادیان بر ثانیه}} = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_g}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s} \qquad (19.2)$$

در این رابطه $\omega_s = 2\pi n_s$ سرعت سنکرون به رادیان بر ثانیه است. قدرت محور را می‌توان از P_g بدست آورد:

$$P_{sh} = P_m - \text{(تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک و مالش هوا}) \text{قدرت خروجی یا قدرت محور} \qquad (20.2)$$

یا

$$P_{sh} = P_g - \text{تلفات اهمی روتور} - \text{تلفات اصطکاک و مالش هوا} \qquad (21.2)$$

گشتاور محور یا گشتاور خروجی:

$$T_{sh} = \frac{P_{sh}}{\text{سرعت روتور}} = \frac{P_{sh}}{(1-s)\omega_s} \qquad (22.2)$$

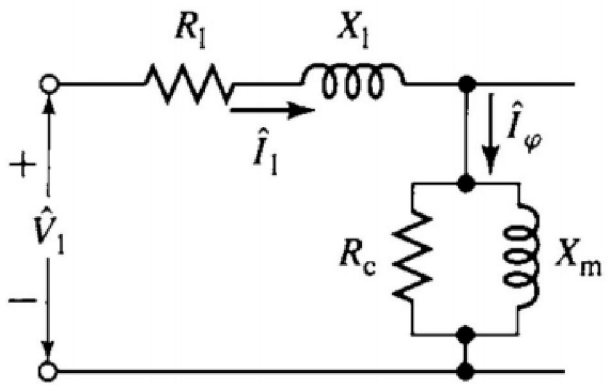
اگر قدرت ورودی استاتور معلوم باشد، قدرت فاصله هوایی P_g چنین خواهد بود:

$$P_g = \text{قدرت ورودی استاتور} - \text{تلفات اهمی استاتور} - \text{تلفات هسته استاتور} \qquad (23.2)$$

مدار معادل استاتور

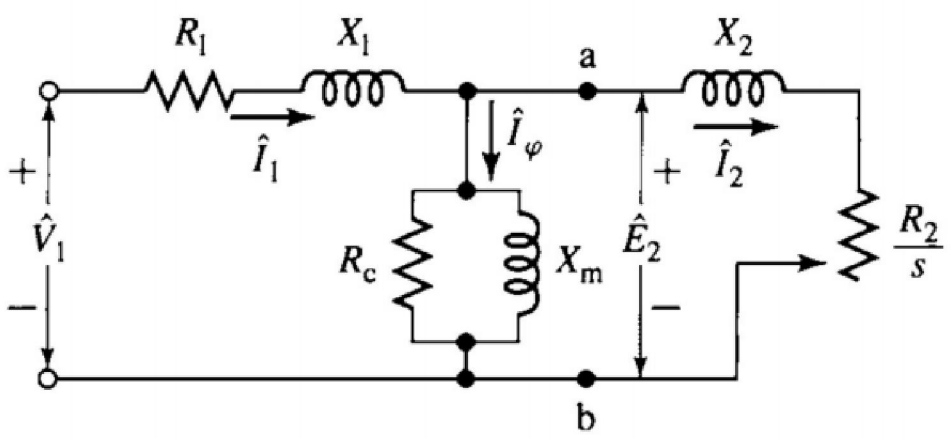
مدار معادل استاتور یک موتور القایی در شکل ۳.۲ نشان داده شده است. همانند ترانسفورماتور، جریان استاتور $I_۱$ از دو مولفه تشکیل شده است. یک مولفه، مولفه بار است. مولفه دیگر جریان تحریک I_e است که وظیفه تولید شار در فاصله هوایی و تامین تلفات هسته را دارد. همانند ترانسفورماتور، جریان تحریک I_e را می‌توان به دو مولفه تجزیه کرد، مولفه تلفات هسته I_c همفاز با ولتاژ خروجی و مولفه مغناطیس‌کننده I_ϕ که ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ خروجی پس‌فاز است [۴].

در یک موتور القایی سه‌فاز حاصل‌ضرب ولتاژ خروجی در جریان I_c تلفات هسته را نشان می‌دهد.



مدار معادل کامل

با ارجاع سمت روتور به سمت استاتور مدار معادل کامل یک موتور القایی مانند شکل ۴.۲ بدست می‌آید.
جهت انتقال روتور به سمت استاتور تمام پارامترهای سمت روتور در نسبت تبدیل $\frac{N_1}{N_2}$ ضرب می‌شوند. همچنین



شکل ۴.۲: مدار معادل کامل یک موتور القایی

مقاومت ظاهری پراکندگی روتور ارجاع شده به استاتور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{امپدانس ظاهری ارجاع داده شده به سمت استاتور} = (\frac{r_2}{s} + jx_2)(\frac{N_1}{N_2})^2 \qquad (۲۴.۲)$$

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.