

شکل ۱-۶: موتور القائی با رتور سیم پیچی شده با اتصال ستاره استاتور و رتور

الکترومغناطیسی تولید نمی شود . با اعمال ولتاژ متعادل سه فاز با فرکانس خط f_1 به سیم پیچی استاتور ، میدان دواری تولید می شود این میدان دوار هادی های ساکن استاتور و رتور را در سرعت سنکرون قطع می کند (دربرمی گیرد) و در نتیجه نیروی محرکه الکتریکی با فرکانس خط f_1 در آنها القاء می کند . مقدار فازی نیروی محرکه الکتریکی E_1 که در سیم پیچی استاتور القاء می شود از معادله ۲۶-۳ به صورت زیر است :

$$E_1 = \sqrt{2}\,\pi\, f_1 k_{w1} N_1 \phi \qquad (۶-۱)$$

N_1 = تعداد دور سری هر فاز استاتور

k_{w1} = ضریب سیم پیچی استاتور

بهمین ترتیب نیروی محرکه الکتریکی E_2 القائی در سیم پیچ رتور در حال سکون عبارتست از :

$$E_2 = \sqrt{2}\,\pi\, f_1\, k_{w2}\, N_2\, \phi \qquad (۶-۲)$$

N_2 = تعداد دور سری هر فاز رتور

k_{w2} = ضریب سیم پیچی رتور

فرکانس خط f_1 در عبارت E_2 نیز ظاهر شده است زیرا رتور در حال سکون است . در اینجا ϕ شار منتجه فاصله هوائی برای هر قطب است . نسبت تبدیل نیروهای محرکه الکتریکی یا ولتاژ از معادلات ۱-۶ و ۲-۶ به صورت زیر بدست می آید :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = \frac{N'_1}{N'_2} \qquad (۶-۳)$$

N'_1 و N'_2 را به ترتیب تعداد دور موثر سری هر فاز استاتور و رتور می نامند . معادله (۳-۶) مشابه نسبت تبدیل ولتاژ ترانسفورماتور است (معادله (۱۱-۱) را ببینید) . بنابراین موتور القائی رتور سیم پیچی شده در حال سکون مشابه ترانسفورماتور بی بار است . بعلاوه ، شار متقابل حاصله در یک ترانسفورماتور ناشی از ترکیب نیروهای محرکه مغناطیسی اولیه و

ثانویه است ، در ماشینهای القائی نیز شار دوار فاصله هوائی که با سرعت سنکرون می چرخد (یا شار متقابل) ناشی از ترکیب نیروهای محرکه مغناطیسی استاتور و رتور است . در ماشین القائی شار دوار فاصله هوائی نیروی ضد محرکه الکتریکی E_1 را در سیم پیچی استاتور تولید می کند که مشابه نیروی ضد محرکه الکتریکی القائی (توسط شار متقابل) در سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور است . همانطور که در ترانسفورماتور بار شده نیروی محرکه مغناطیسی جریان ثانویه روی اولیه واکنش نشان می دهد تا قدرت بیشتری از منبع جریان متناوب بکشد ، بهمین ترتیب نیز با افزایش بار محور نیروی محرکه مغناطیسی رتور روی استاتور واکنش نشان می دهد تا قدرت بیشتری از منبع a.c گرفته شود . با توجه به این تشابهات یک ماشین القائی را ترانسفورماتور جامع می نامند ، باین دلیل که سیم پیچی استاتور ماشین القائی مانند اولیه و سیم پیچی رتور مانند ثانویه عمل می کند . باین دلیل اندیس های ۱ و ۲ را به ترتیب مانند ترانسفورماتور برای نمایش کمیات استاتور و رتور به کار می برند . نسبت تبدیل ولتاژ ماشین القائی حاوی ضرایب سیم پیچی k_{w1} و k_{w2} نیز هست . زیراسیم پیچی های استاتور و رتور در محیط فاصله هوائی توزیع شده اند . سیم پیچی های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور به علت متمرکز بودن به ضرایب سیم پیچی نیاز ندارند . در معادلات ۱-۶ و ۲-۶ ϕ مقدار متوسط شار دوار بر قطب است . در معادلات emf ترانسفورماتور (۴-۱) و (۷-۱) مقدار حداکثر شار هسته به کار برده می شود .

فرق دیگر بین موتورهای القائی و ترانسفورماتور اینست که جریان بی بار موتورهای القائی از ۳۰٪ تا ۵۰٪ جریان بار کامل تغییر می کند ، در حالی که حدود تغییرات جریان بی بار در ترانسفورماتور از ۲ تا ۶٪ جریان بار کامل آنست ، و این باین خاطر است که شار متقابل در ترانسفورماتور مسیر خود را از هسته آهنی با مقاومت مغناطیسی کم می بندد ، در حالی که شار متقابل در موتور القائی مجبور است از فاصله هوائی بین استاتور و رتور عبور کند . برای ولتاژ ثابت اعمال شده به موتور شار متقابل اساساً ثابت می ماند . از آنجا که مقاومت مغناطیسی مسیر شار متقابل در موتور القائی بیشتر ناشی از فاصله هوائی است ، برای اینکه شار متقابل ($\frac{\text{m.m.f}}{\text{مقاومت مغناطیسی}}$) ثابت باشد m.m.f مغناطیس کننده بیشتری لازم است و بنابراین جریان مغناطیس کننده بیشتر خواهد بود . در موتور القائی جریان مغناطیس کننده (که حدود ۹۰° نسبت به ولتاژ اعمالی عقب است) قسمت اعظم جریان بی بار را تشکیل می دهد . باین دلیل است که موتورهای القائی در حالت بی بار در ضریب توان

پائین کار می‌کنند . معمولاً ضریب توان موتورالقائی در حالت بی‌بار در حوالی ۰/۱۵ است . اثر پائین بودن ضریب توان بی بار موتور القائی کاهش ضریب توان بار کامل آنست . از اینرو برای پائین نگهداشتن جریان مغناطیس کننده موتور القائی و در نتیجه بهتر شدن ضریب توان بار کامل و بی بار فواصل هوائی در موتورهای القائی را تا حد امکان کوچک می سازند .

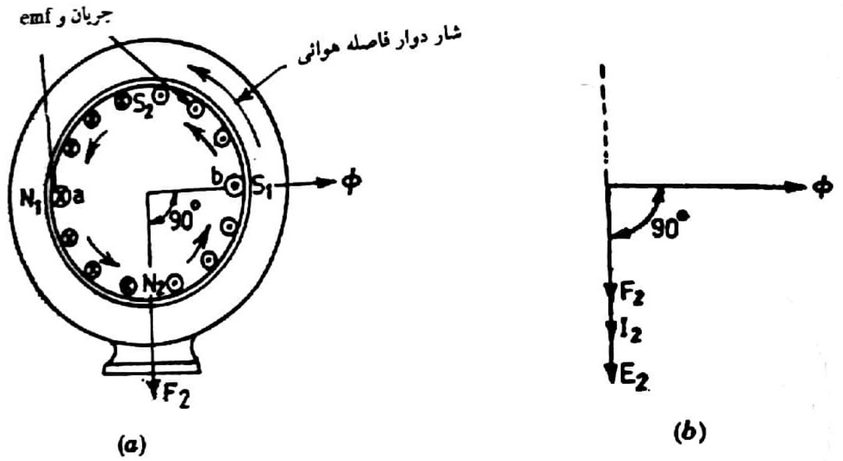
۲-۶ بردارهای شار و نیروی محرکه مغناطیسی در موتور القائی

وقتی ولتاژ چند فاز به سیم پیچی چند فاز موتور القائی اعمال شود ، میدان مغناطیسی دوّار با دامنه ثابت تولید می شود . سرعت این میدان دوّار سرعت سنکرون نامیده می شود و با تعداد قطبهای استاتور و فرکانس آن تعیین می شود ، معادله (۶۴-۳) و (۶۵-۳) را ببینید . نیروهای محرکه مغناطیسی تولیدی توسط استاتور و رتور در یک جهت با سرعت سنکرون می چرخند . ترکیب این دو نیروی محرکه مغناطیسی نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوائی یا موج چگالی شار را نتیجه می دهد که در سرعت سنکرون می چرخد . چون سرعت نسبی بین نیروی محرکه مغناطیسی رتور و موج چگالی شار منتجه صفر است ، گشتاور پایداری در اثر متقابل آنها تولید می گردد . هدف این بخش آنست که نشان دهد ، رتور در جهت میدان مغناطیسی دوّار می چرخد و گشتاور الکترومغناطیسی بستگی جزئی به پارامترهای مدار رتور دارد . ابتدا موتورهای القائی قفس سنجابی مورد بررسی قرار می گیرد و سپس موتور القائی با رتور سیم پیچی شده تحلیل می شود .

شکل ۲-۶ موتور القائی قفس سنجابی ساده سه فاز دو قطب راکه رتورش ساکن است نشان می دهد . دو قطب N_1 و S_1 توسط موج چگالی شار منتجه تولید شده است که در جهت خلاف ساعت با سرعت سنکرون می چرخد . این دو قطب گردان میله های ساکن رتور را در سرعت سنکرون قطع می کنند . در میله های a و bکه در مراکز قطب قرار دارند حداکثر نیروی محرکه الکتریکی القاء می شود که با نقطه * و ضربدر بزرگتر در شکل ۲-۶(a) نمایش داده شده اند . میله های دور از مراکز قطب نیروی محرکه الکتریکی تولیدی کمتری دارند که با نقطه و ضربدرهای کوچکتر (متغیر) نشان داده شده اند . اگر مدار رتور اهمی خالص فرض شود . جریان در هر میله همفاز با نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در آن میله است که در شکل ۲-۶ (a) نشان داده شده است . وجود جریان در مدار رتور نیروی

* جهت نیروی محرکه الکتریکی e.m.f در میله ها با نقطه و ضربدر نشان داده می شود . که در پاورقی بخش ۱۵-۵ آمده است .

محرکه مغناطیسی m.m.f رتور ، F_2 را ایجاد می کند که باندازه زاویه فاز فضائی ۹۰° نسبت به شار فاصله هوائی ϕ عقب است . نیروی محرکه مغناطیسی رتور باعث ایجاد قطبهای N_2 و S_2 رتور می شود که طبق شکل ۲-۶(a) به طور سنکرون می چرخند . قابل توجه است که سرعت نسبی بین قطبهای N_1 و S_1 و قطبهای رتور N_2 و S_2 صفر است . قطب گردان N_1 قطب N_2 را دفع می کند و S_2 را جذب می نماید . قطب گردان دیگر S_1 نیز S_2 را دفع و N_2 را جذب می کند . در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی در اثر متقابل شار فاصله هوائی ϕ و نیروی محرکه مغناطیسی رتور (F_2) در همان جهت میدان مغناطیسی دوار تولید می شود . لذا رتور باید در جهت گردش میدان مغناطیسی شروع بگردش کند .



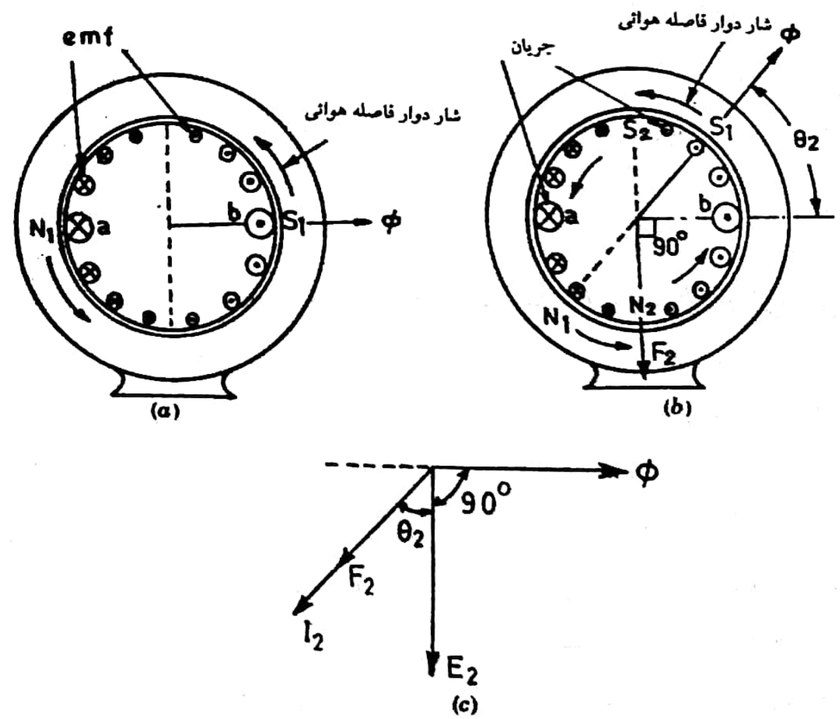
شکل ۲-۶ : موتور القائی قفس سنجابی (a) e.m.f و جریان تولیدی همفازند (b) نمودار برداری با فرض مقاومت القائی پراکندگی رتور $x_2 = 0$

زاویه فضائی بین F_2 و ϕ را زاویه بار می نامند که در اینجا ۹۰° است (شکل ۲-۶(a)) . طبق معادله (b) ۸۶-۳ مقدار گشتاور برابر است با :

$$T_e = \frac{\pi}{8} p^2 \phi F_2 \sin 90° = \frac{\pi}{8} p^2 \phi F_2 \qquad (۶-۴)$$

این رابطه نشان می دهد که اگر مدار رتور مقاومتی خالص باشد زاویه بار مقدار بهینه ۹۰° را دارد . در این شرایط نمودار برداری در شکل ۲-۶(b) رسم شده است . نیروی محرکه الکتریکی رتور E_2 نسبت به شار فاصله هوائی ϕ ، ۹۰° عقب است . جریان رتور I_2 و E_2 همفازند زیرا مدار رتور مقاومتی خالص فرض شده است . نیروی محرکه مغناطیسی رتور F_2 باید با I_2 که آنرا تولید کرده است همفاز و متناسب باشد .

عملاً میله ها در هسته رتور قرار دارند و لذا مدار رتور مقاومت القائی پراکندگی قابل ملاحظه ای دارد . با توجه به این نکته جریان رتور در هر میله نسبت به نیروی محرکه الکتریکی القائی در آن باندازه زاویه ضریب توان رتور $\theta_2 = \text{tg}^{-1}\frac{x_2}{r_2}$ عقب است . برای مثال میله های a و b زیر قطبها طبق شکل (a)۳-۶ حداکثر نیروی محرکه الکتریکی تولیدی را دارند . با در نظر گرفتن مقاومت القائی پراکندگی رتور جریان میله های a و b تنها وقتی حداکثرند که قطبها N_1 و S_1 از وضعیت e.m.f حداکثر شکل (a)۳-۶ باندازه زاویه θ_2 حرکت کرده باشند که در شکل (b)۳-۶ نشان داده شده است . جریانهای رتور mmf رتور F_2 را تولید می کنند و از شکل (b)۳-۶ دیده می شود که F_2 در فضا نسبت به شار فاصله هوائی ϕ باندازه زاویه بار $\theta_2 + 90$ فاصله دارد . قطبهای N_1 و S_1 تولیدی توسط شار منتجه با قطبهای رتور N_2 و S_2 واکنش نشان داده و گشتاور الکترومغناطیسی در جهت میدان مغناطیسی دوار طبق شکل (b)۳-۶ تولید می کند . شکل (b)۲-۶ به رسم نمودار برداری شکل (c)۳-۶ کمک می کند که در آن شار ϕ برای راحتی افقی در نظر گرفته شده است .



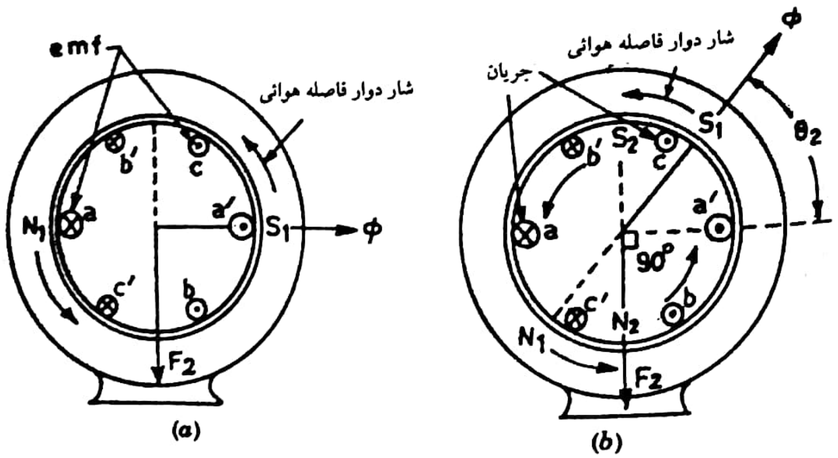
شکل ۳-۶ : موتور القائی قفس سنجابی (a) جهت نیروی محرکه الکتریکی تولیدی رتور (b) جهت جریانهای رتور (c) نمودار برداری با $x_2 \neq 0$ و در حال سکون

در این نمودار برداری E_2 نسبت به ϕ باندازه ۹۰° عقب است ، I_2 نسبت به E_2 باندازه زاویه ضریب توان رتور θ_2 عقب است و F_2 باندازه زاویه بار $\theta_2 + 90$ نسبت به ϕ عقب است . گشتاور الکترومغناطیسی T_e برابر است با :

$$T_e = \frac{\pi}{\lambda} p^2 \phi F_2 \sin(90 + \theta_2) \qquad (۶-۵)$$

زاویه ضریب توان رتور θ_2 معادل $\text{tg}^{-1}\frac{x_2}{r_2}$ است . x_2 مقاومت القائی پراکندگی هر فاز رتور در حال سکون و r_2 مقاومت اهمی هر فاز رتور است . هرچه مقدار x_2 بزرگتر باشد زاویه بار از مقدار بهینه ۹۰° بیشتر منحرف شده ولذا مقدار گشتاور راه‌اندازی کمتر می شود . در حال سکون θ_2 در حدود ۷۰ تا ۸۰° است . از اینرو برای تولید گشتاور راه اندازی بالا θ_2 باید تا حد امکان کوچک شود تا زاویه بار به مقدار بهینه ۹۰° نزدیکتر شود این شرایط را می توان با کاهش x_2 یا افزایش r_2 بدست آورد .

برای تشریح تولید گشتاور در موتور القائی رتور سیم پیچی شده (با حلقه های لغزان) موتور القائی سه فاز ۲ قطب شکل (a)۴-۶ را در نظر می گیریم . دو قطب N_1 و S_1 تولیدی توسط شار دوّار فاصله هوائی هادیهای ساکن رتور را در سرعت سنکرون قطع می کنند . فاز a دارای حداکثر e.m.f تولیدی است . زیرا پیچک a-a′ نماینده فاز a زیر مراکز قطب N_1 و S_1 است. رتور در حال‌سکون مقاومت‌القائی پراکندگی‌قابل ملاحظه‌ای‌دارد. بنابراین‌جریان رتور فاز a نسبت به e.m.f تولیدی باندازه زاویه ضریب توان رتور θ_2 عقب است . در نتیجه جریان فاز a تنها وقتی حداکثر است که قطبهای N_1 و S_1 باندازه زاویه θ_2 نسبت به وضعیت e.m.f حداکثرشکل (a)۴-۶ باندازه θ_2 حرکت‌کرده‌باشدکه درشکل(b)۴-۶ نشان داده‌شده‌است .



شکل ۴-۶ : گشتاور راه اندازی موتور القائی با حلقه های لغزان

لازم به یادآوری است که m.m.f منتجه در راستای محور فازی است که جریان آن حداکثر است . با توجه به این مطلب m.m.f منتجه رتور F_2 در شکل (b)۶-۴ در امتداد محور فاز a است . زیرا این فاز حداکثر جریان را در لحظه مورد نظر حمل می کند . m.m.f رتور F_2 نسبت به ϕ باندازه زاویه بار $\theta_2 + 90°$ اختلاف فاز دارد . نمودار برداری در این حالت مشابه شکل (c)۶-۳ است . قطبهای گردان N_1 و S_1 که با شار فاصله هوائی تولید می شوند با قطبهای رتور N_2 و S_2 اثر متقابل داشته و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی در جهت میدان مغناطیسی دوّار تولید می گردد . این تشابه بین رتورهای قفسی و سیم پیچی شده ازنقطه نظر واکنش رتور روی استاتور می باشد . m.m.f رتور نیز m.m.f آرمیچر یا m.m.f واکنش آرمیچر خوانده می شود، زیرا در یک موتور القائی سیم پیچی های استاتور و رتور به ترتیب سیم پیچی های میدان و آرمیچر خوانده می شوند .

سیم پیچی قفس سنجابی می تواند خود را با هر تعداد قطب استاتور تنظیم کند . اما در موتور القائی رتور سیم پیچی شده سیم پیچی های استاتور و رتور هر دو باید برای یک تعداد قطب پیچیده شوند اگرچه تعداد فازهای استاتور و رتور ممکن است متفاوت باشد .

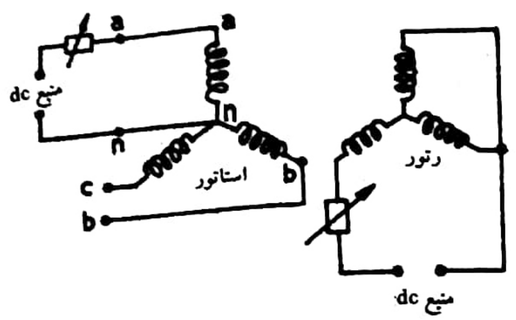
سیم پیچی قفس سنجابی روی خودش اتصال کوتاه است و لذا نمی توان مقاومت خارجی در مدار رتور قرار داد . رتور سیم پیچی شده از طریق حلقه های لغزان قابل دسترسی است و بنابراین مقاومت خارجی را می توان در مدار رتور قرار داد . یعنی زاویه بار $\theta_2 + 90°$ تنها در موتور القائی رتور سیم پیچی شده قابل کنترل است . برای مثال گشتاور راه اندازی را می توان در موتور القائی رتور سیم پیچی شده کنترل کرد نه در موتور قفس سنجابی .

مثال ۶.۱

یک موتورالقائی سه فاز رتور سیم پیچی شده با اتصال ستاره طبق شکل ۵-۶ از منبع dc تغذیه می شود . جریانهای سیم پیچی های استاتور و رتور در حد مطمئن نگهداشته می شود . اگر سرهای منبع dc از سیم پیچی فاز a به سیم پیچی فاز b استاتور تغییر کند ، رتور چند درجه مکانیکی حرکت می کند در حالی که موتور الف : دو قطب ب : ۴ قطب ج : ۶ قطب داشته باشد .

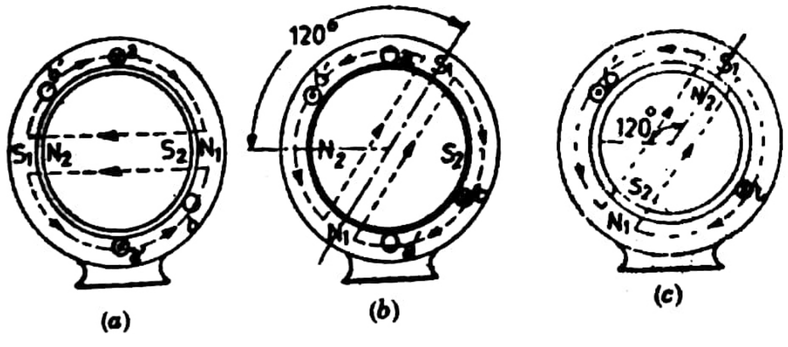
حل :

الف : در شکل (a)۶-۶ پیچک aa′ نماینده سیم پیچی فاز a است . وقتی جهت جریان



شکل ۵-۶: مدار مثال ۱-۶

مستقیم در فاز a با ضربدر در a و نقطه در a′ نشان داده شود ، قطبهای S_1 و N_1 استاتور تولید می‌شوند . جریان dc در سیم‌پیچی های رتور نیزدو قطب N_2 و S_2 طبق شکل تولید می کنند . در شکل (a) ۶-۶ فرض بر اینست که قطب S_2 نزدیک N_1 و قطب N_2 نزدیک S_1 است زیرا قطبهای غیر همنام یکدیگر را جذب می کنند . وقتی دو سر منبع از فاز a به سیم پیچی فاز b تغییر می یابد ، استاتور قطبهای N_1 و S_1 را تولید می کند که ۱۲۰° الکتریکی طبق شکل (b)۶-۶ چرخیده است . دراین شکل N_2 توسط S_1 جذب شده وتوسط N_1 دفع می شود . بهمین ترتیب S_2 توسط N_1 جذب و توسط S_1 دفع می گردد . در نتیجه این اثر متقابل رتور ۱۲۰° چرخیده و طبق شکل (c)۶-۶ وضعیت نهائی دائمی خود را پیدا می کند .



شکل ۶-۶: مربوط به مثال ۱-۶

برای ماشین دو قطب $\theta_{\text{مکانیکی}} = \theta_{\text{الکتریکی}}$ و لذا رتور ۱۲۰ درجه مکانیکی یعنی $\frac{1}{3}$ دور می چرخد .

ب : برای ماشین p قطب

$$\theta_e = \frac{p}{2}\,\theta_m$$

برای ماشین ۴ قطب وقتی منبع از سیم پیچی فاز a به سیم پیچی فاز b تغییر می یابد رتور

دوباره ۱۲۰ درجه الکتریکی می چرخد .

$$\theta_m = \frac{۲}{۴}(۱۲۰°) = ۶۰°$$

بنابراین در ماشین ۴ قطب با تغییر منبع dc از یک فاز به فاز مترادف بعدی رتور ۶۰ درجه مکانیکی (یعنی $\frac{۱}{۶}$ دور) می چرخد .

ج : برای ماشین ۶ قطب

$$\theta_m = \frac{۲}{۶}(۱۲۰°) = ۴۰°$$

لذا در ماشین ۶ قطب با تغییر منبع dc از یک فاز به فاز مجاور رتور ۴۰ درجه مکانیکی (یعنی $\frac{۱}{۹}$ دور) می چرخد .

۶-۳ فرکانس رتور

دیدیم که رتور در جهت میدان مغناطیسی دوّار شروع به گردش می کند . در حال سکون هادیهای رتور توسط موج شار دوّار با سرعت سنکرون n_s قطع می شود ، بنابراین فرکانس e.m.f و جریان رتور $f_۲$ معادل فرکانس خط $f_۱$ است .

وقتی رتور در سرعت n_r دور بر ثانیه در جهت موج شار دوّار می چرخد ، سرعت نسبی بین شار دوار سنکرون و هادیهای رتور $(n_s - n_r)$ دور بر ثانیه خواهد بود .

$$\text{فرکانس e.m.f رتور} = \frac{\text{(سرعت نسبی بین شار دوار و رتور به r.p.s) (قطبها)}}{۲} \quad \text{(۶-۶ a)}$$

$$= \frac{p\,(n_s - n_r)}{۲} \quad \text{(۶-۶ b)}$$

لغزش که قبلاً با معادله (۳-۲۹ b) تعریف شده بود :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$$n_s - n_r = sn_s$$

فرکانس رتور :

(۶-۷)

$$f_۲ = \frac{psn_s}{۲} = sf_۱$$

بنابراین فرکانس e.m.f و جریان رتور در موتور القائی از حاصلضرب لغزش s و فرکانس خط $f_۱$ بدست می آید . باین دلیل است که $f_۲$ را فرکانس لغزش نیز می گویند . در حال سکون فرکانس رتور همان $f_۱$ است و میدان حاصل از جریانهای رتور در سرعتی معادل $\frac{\text{فرکانس رتور} \times ۲}{\text{تعداد قطبهای رتور}}$ یعنی $(\frac{۲f_۱}{p} = n_s)$ نسبت به رتور می چرخد .

وقتی رتور در سرعت n_r می چرخد ، فرکانس رتور $sf_۱$ بوده و میدان حاصله رتور با سرعت $n_s = \frac{۲(sf_۱)}{p}$ نسبت به رتور می چرخد . اما رتور با سرعت مکانیکی n_r نسبت به استاتور می چرخد . لذا سرعت میدان رتور نسبت به استاتور معادل مجموع سرعت مکانیکی رتور n_r و سرعت میدان رتور sn_s نسبت به رتور است . باین ترتیب سرعت میدان رتور نسبت به استاتور برابر است با :

$$n_r + sn_s = n_s(۱ - s) + sn_s = n_s \quad \text{r.p.s}$$

اما سرعت میدان استاتور نسبت به استاتور برابر سرعت سنکرون n_s است . نتیجه اینست که میدانهای استاتور و رتور نسبت به یکدیگر در تمام سرعتهای ممکن رتور ساکنند . از آنجا که سرعت نسبی بین میدانهای استاتور و رتور صفر است گشتاور پایداری در اثر متقابل آنها تولید شده و گردش ادامه پیدا می کند .

رتور یک موتور القائی هرگز نمی تواند به سرعت سنکرون برسد . در صورتی که سرعت رتور به مقدار سنکرون برسد ، هادیهای رتور نسبت به میدان مغناطیسی دوار سنکرون ساکن خواهند بود . در نتیجه در هادیهای رتور e.m.f نیروی محرکه الکتریکی القاء نمی شود و لذا m.m.f رتور صفر خواهد بود . از آنجا که وجود m.m.f رتور طبق معادله (۵-۶) برای تولید گشتاور لازم است لذا سرعت رتور موتور القائی هرگز نمی تواند به سرعت سنکرون برسد .

مثال ۶.۲

یک موتور القائی سه فاز ۵۰ Hz سرعت بار کامل ۱۴۴۰ r.p.m دارد . برای این موتور مطلوبست محاسبه :

الف : تعداد قطبها

ب : لغزش بار کامل و فرکانس رتور

ج : سرعت میدان – استاتور نسبت به ۱ – استاتور ۲ – رتور

د : سرعت میدان رتور نسبت به ۱ – رتور ۲ – استاتور ۳ – میدان استاتور

حل :

الف : با استفاده از سرعت بار کامل ۱۴۴۰ r.p.m در معادله (۳-۶۵) خواهیم داشت :

$$۱۴۴۰ = \frac{۱۲۰f_۱}{p}$$

$$= \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{p}$$

$$p = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۱۴۴۰} = ۴\frac{۱}{۶}$$ قطب

چون تعداد قطب باید عدد صحیح و زوج باشد لذا موتور القائی ۴ قطب است و رتور در سرعتی کمی کمتر از سرعت سنکرون می چرخد .

ب : سرعت سنکرون

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

$$\text{لغزش } s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$= \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۴$$

$$\text{فرکانس موتور } f_۲ = sf_۱ = ۰/۰۴ \times ۵۰ = ۲ \text{ Hz}$$

ج : ۱ - سرعت میدان استاتور نسبت به استاتور

$$= N_s = ۱۵۰۰ \text{ r.p.m}$$

۲ - سرعت میدان استاتور نسبت به رتور گردان

$$= ۱۵۰۰ - ۱۴۴۰ = ۶۰ \text{ r.p.m}$$

د : ۱ - سرعت رتور نسبت به رتور

$$= \frac{\text{فرکانس موتور} \times ۱۲۰}{\text{قطبها}}$$

$$= \frac{۱۲۰ \times ۲}{۴} = ۶۰ \text{ r.p.m}$$

۲ - سرعت رتور نسبت به استاتور

سرعت میدان رتور نسبت به رتور + سرعت مکانیکی رتور =

$$= ۱۴۴۰ + ۶۰$$

$$= ۱۵۰۰ \text{ r.p.m}$$

۳ - از آنجاکه میدانهای استاتور و رتور در سرعت سنکرون ۱۵۰۰ r.p.m نسبت به استاتور می چرخند ، سرعت میدان رتور نسبت به میدان استاتور صفر است . لذا میدانهای استاتور و رتور نسبت به یکدیگر ساکنند .

مثال ۶.۳

یک گالوانومتر درست شنت شده با صفر وسط در مدار رتور یک موتور القائی با رتور

سیم پیچی شده ۶ قطب ۵۰ Hz وصل شده است . اگر گالوانومتر ۹۰ نوسان کامل در یک دقیقه نشان دهد ، سرعت رتور را محاسبه کنید .

حل :

یک نوسان کامل گالوانومتر متناظر با یک سیکل فرکانس رتور است .

فرکانس رتور :

$$f_۲ = sf_۱ = \frac{۹۰}{۶۰} = ۱/۵ \text{ Hz}$$

$$\text{لغزش } s = \frac{f_۲}{f_۱} = \frac{۱/۵}{۵۰} = ۰/۰۳$$

$$\text{سرعت رتور} = N_s (۱ - s)$$

$$= \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۶} (۱ - ۰/۰۳) = ۹۷۰ \text{ r.p.m}$$

مثال ۶.۴

استاتور موتور القائی با رتور سیم پیچی شده سه فاز ۴ قطب به منبع ۵۰Hz وصل است و رتور آن از منبع ۲۰Hz تغذیه می کند . دو سرعت بی بار ممکن موتور را تعیین کنید . از تمام تلفات صرفنظر کنید .

حل :

سرعت میدان استاتور نسبت به استاتور :

$$= \frac{۱۲۰ \times ۵}{۴} = ۱۵۰۰ \text{ r.p.m}$$

سرعت میدان رتور نسبت به رتور :

$$= \frac{۱۲۰ \times ۲۰}{۴} = ۶۰۰ \text{ r.p.m}$$

اگر میدان رتور در جهت میدان استاتور شروع به گردش کند ، رتور باید در سرعتی بچرخد که سرعت نسبی بین میدانهای استاتور و رتور صفر باشد . برای تحقق این شرط رتور باید در سرعت ۹۰۰ r.p.m = ۶۰۰ - ۱۵۰۰ در جهت میدان استاتور بچرخد . در حالتی که میدان رتور در خلاف میدان استاتور می چرخد ، سرعت رتور باید ۲۱۰۰ r.p.m = ۶۰۰ + ۱۵۰۰ در جهت میدان استاتور باشد به طوریکه سرعت نسبی بین میدانهای استاتور و رتور صفر باشد . بنابراین در سرعت ممکن حالت بی بار رتور ۹۰۰ r.p.m و ۲۱۰۰ r.p.m اند .

۶-۴ جریان ، نیروی محرکه الکتریکی و قدرت رتور

در حال سکون سرعت نسبی بین میدان مغناطیسی دوار و هادیهای رتور سرعت سنکرون n_s است . در این شرایط نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در هر فاز رتور E_2 است . وقتی سرعت رتور مثلاً $0/4\ n_s$ باشد لغزش ۰/۶ و سرعت نسبی بین میدان دوار و هادیهای رتور $0/6\ n_s$ است . در این حالت نیروی محرکه تولیدی هر فاز $0/6\ E_2$ $= 0/6n_s \frac{E_2}{n_s}$ خواهد شد . در سرعت رتور $0/8n_s$ لغزش ۰/۲ و سرعت نسبی بین میدان دوار و هادیهای رتور $0/2n_s$ است . بنابراین نیروی محرکه الکتریکی تولیدی هر فاز در این شرایط $0/2n_s \times \frac{E_2}{n_s} = 0/2\ E_2$ است . به طور کلی بازاء هر مقدار لغزش s نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در هادیهای رتور برابر است با sE_2.

(ضریب القاء پراکندگی رتور l_2) (فرکانس رتور) 2π = راکتانس پراکندگی رتور

$= 2\pi f_1 l_2 = x_2\ \Omega$ = مقاومت القائی پراکندگی رتور در حال سکون

مقاومت القائی پراکندگی رتور در هر لغزش s

$= 2\pi f_2 l_2 = 2\pi (sf_1) l_2 = sx_2\ \Omega$

مقاومت ظاهری پراکندگی رتور در حال سکون

$= \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$

در هر لغزش s مقاومت ظاهری پراکندگی رتور :

$= \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}$

نیروی محرکه الکتریکی هر فاز تقسیم بر مقاومت ظاهری پراکندگی هر فاز رتور جریان هر فاز رتور را بدست می دهد .

جریان هر فاز رتور در حال سکون $= \dfrac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}$

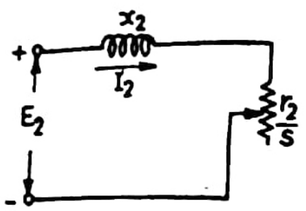
$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۸)$$ جریان هر فاز رتور در هرلغزش s

جریان رتور I_2 نسبت به ولتاژ رتور E_2 باندازه زاویه ضریب توان رتور θ_2 عقب است :

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1} \frac{sx_2}{r_2}$$

معادله (۸-۶) را می توان طبق شکل ۷-۶ با یک مدار سری ساده نمایش داد . ازین مدار دیده می شود که قدرت هر فاز ورودی رتور برابر است با :

$$P_g = E_2 I_2 \cos\theta_2$$



شکل ۷-۶: مدار معادل رتور یک موتور القائی

اما :

$$\cos\theta_2 = \frac{\text{مقاومت اهمی هر فاز رتور}}{\text{مقاومت ظاهری هر فاز رتور}}$$

$$= \frac{r_2/s}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2}}$$

$$P_g = \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2}} I_2 \frac{r_2}{s} = I_2^2 \frac{r_2}{s} \qquad (۶-۹)$$

از شکل ۷-۶ نیز پیداست که قدرت ورودی هر فاز رتور معادل $I_2^2 \frac{r_2}{s}$ است زیرا مقاومت القائی x_2 قدرتی مصرف نمی کند .

P_g قدرت انتقالی از استاتور به رتور از طریق فاصله هوائی می باشد . باین جهت P_g را قدرت فاصله هوائی می نامند . عبارت P_g را می توان به صورت زیر نوشت :

$$P_g = I_2^2 \frac{r_2}{s} = I_2^2 r_2 + I_2^2 r_2 (\frac{1-s}{s})$$

$=$ (تلفات اهمی رتور) + P_m قدرت مکانیکی تولیدی رتور

$$= sP_g + (1-s) P_g \qquad (۶-۱۰a)$$

$$P_m = (1-s) P_g = I_2^2 r_2 (\frac{1-s}{s}) \qquad (۶-۱۰b)$$

$$(\frac{s}{1-s}) P_m = s P_g \qquad (۶-۱۰c)$$ = تلفات اهمی رتور

معادله (۹-۶) نشان می دهد که تلفات اهمی رتور :

$= I_2^2 r_2 = sP_g$

(۶-۱۱) $= s$ (قدرت ورودی رتور)

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

$$T_e = \frac{\text{قدرت مکانیکی داخلی تولیدی رتور}}{\text{سرعت رتور به رادیان مکانیکی بر ثانیه}}$$

(۶-۱۲) $$= \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1 - s)P_g}{(1 - s)\,\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s}$$

در این رابطه $\omega_s = 2\pi n_s$ سرعت سنکرون به رادیان مکانیکی بر ثانیه است . گشتاور الکترومغناطیسی T_e برابر است :

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{I_2^2 r_2}{s} = \frac{\text{تلفات اهمی رتور}}{\text{لغزش}\,\omega_s}$$

(۶-۱۳) $$= \frac{1}{2\pi n_s} I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

قدرت محور را می توان از P_g به صورت زیر بدست آورد :

تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک ومالش هوا) $- P_m = P_{sh}$ قدرت خروجی یا قدرت محور یا :

تلفات اصطکاک و مالش هوا $-$ تلفات اهمی رتور $- P_g = P_{sh}$

گشتاور محور یا گشتاور خروجی :

(۶-۱۴) $$T_{sh} = \frac{P_{sh}}{\text{سرعت رتور}} = \frac{P_{sh}}{(1 - s)\omega_s}$$

اگر قدرت ورودی استاتور معلوم باشد ، قدرت فاصله هوائی P_g چنین خواهد بود .

تلفات هسته استاتور $-$ تلفات I^2R استاتور $-$ قدرت ورودی استاتور $= P_g$

۶-۵ تلفات بازده

تلفات در موتور القائی سه فاز عبارتند از (۱) تلفات ثابت و (۲) تلفات متغیر .

تلفات ثابت

این تلفات مرکب از (الف) : تلفات هسته و (ب) : تلفات اصطکاک یاطاقانها و (ج) تلفات اصطکاک جاروها در موتور القائی رتور سیم پیچی شده و (د) تلفات مالش هوا (بادخوری) می باشد . این تلفات در حدودکار نرمال موتور القائی ثابت می باشد . تلفات اصطکاک کمی با بارو سرعت تغییر می کند . اما این تلفات نیز به علت اینکه سرعت در حدود کار نرمال موتور تغییرات کمی دارد ثابت در نظر گرفته می شود .

یک موتور القائی سه فاز در شرایط کار معمولش دارای جریان کم فرکانس در مدار رتور

است . در نتیجه تلفات هسته رتور تقریبا" متناسب با مجذور فرکانس بوده و صرفنظر کردنی است . تلفات ثابت یا تلفات گردشی (شامل تلفات اصطکاک ، مالش هوا و تلفات هسته) را می توان مستقیما" از اجرای ازمایش بی بار بر روی موتور القائی بدست آورد .

تلفات I^2R استاتور بی بار $-$ توان ورودی بی بار $=$ تلفات ثابت

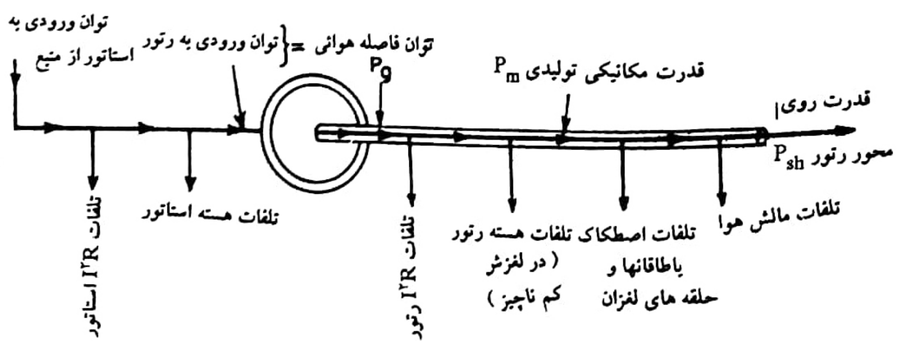
تلفات متغیر

این تلفات مرکب از (الف) تلفات اهمی استاتور (ب) تلفات اهمی رتور (ج) تلفات تماسی جارو برای موتورهای القائی رتور سیم پیچی شده و (د) تلفات سرگردان بار می باشد . تلفات اهمی استاتور و رتور را می‌توان در حالتی که مقاومتهای استاتور و رتور معلوم باشند مستقیما" بدست آورد . تلفات اهمی کل با اجرای آزمایش رتور قفل شده روی موتور القائی بدست می آید . تلفات اهمی در موتور القائی قفس سنجابی را تنها با کم کردن تلفات اهمی استاتور را از تلفات اهمی کل در آزمایش رتور قفل شده بدست آورد .

ولت ۱ × جریان حلقه های لغزان = تلفات تماسی جارو در موتور القائی رتور سیم پیچی شده

تلفات سرگردان بار در هسته و در هادیها ایجاد می شود . اندازه گیری آنها خیلی پیچیده است و معمولا" آنها را باین صورت لحاظ می کنند که بازده را در بار کامل ۰/۵ درصد کمتر از مقدار محاسبه شده در نظر می گیرند . و برای دیگر بارها نیز به نسبت عمل می کنند .

شکل ۸-۶ نمودار بخش توان را در موتور القائی سه فاز بدست می دهد . این نمودار بوضوح چگونگی توزیع قدرت ورودی استاتور را در موتور القائی سه فاز نشان می دهد . توان ورودی رتور یا توان فاصله هوائی با توان ورودی استاتور باندازه تلفات کل استاتور تفاوت دارد . در شرایط کار نرمال از تلفات هسته رتور صرفنظر می شود . توان روی محور رتور با توان مکانیکی تولیدی باندازه تلفات اصطکاک و مالش هوا اختلاف دارد .



شکل ۸-۶: نمودار پخش توان در موتور القائی سه فاز

بازده موتور القائی سه فاز برابر است با :

$$\eta = \frac{P_{sh}}{P_{sh} + P_f + P_{oh}} \times ۱۰۰$$

که در آن :

P_{sh} = توان محور

P_f = تلفات ثابت = تلفات هسته + تلفات اصطکاک یاطاقانها و مالش هوا

P_{oh} = تلفات اهمی استاتور و رتور + تلفات اصطکاک جارو (در صورت وجود)

مثال ۶.۵

یک موتور القائی سه فاز ۴ قطب ۵۰Hz ، ۱۴۴۰r.p.m دارای سیم پیچی رتور با اتصال ستاره دارای مقاومت اهمی ۰/۲ Ω/ph و مقاومت القائی پراکندگی حالت سکون هر فاز ۱Ω است . وقتی استاتور با ولتاژ فرکانس نامی تغذیه می شود ، نیروی محرکه الکتریکی القائی هر فاز رتور در حال سکون ۱۲۰V است .

الف : جریان رتور ، ضریب توان رتور و گشتاور را در حالت راه اندازی و بار کامل محاسبه کرده و نتایج را مقایسه کنید .

ب : اگر مقاومت خارجی هر فاز ۱Ω در مدار رتور قرار گیرد . جریان رتور ، ضریب توان رتور و گشتاور راه اندازی را محاسبه کنید .

حل :

سرعت سنکرون :

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

جریان رتور در راه اندازی

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

$$= \frac{۱۲۰}{۱/۰۱۹۸} = ۱۱۷/۶۷ \text{ V}$$

ضریب توان رتور در راه اندازی :

$$= \frac{r_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + x_۲^۲}} = \frac{۰/۲}{\sqrt{۰/۲^۲ + ۱^۲}}$$

$$= ۰/۱۹۶$$

سرعت سنکرون به رادیان بر ثانیه

$$\omega_s = \frac{۲\pi N_s}{۶۰}$$

$$= \frac{۲\pi \times ۱۵۰۰}{۶۰} = ۵۰\pi \text{ rad/sec}$$

گشتاور راه اندازی :

$$T_{est} = \frac{۳}{\omega_s} I_{۲st}^{۲} \frac{r_۲}{۱}$$

$$= \frac{۳}{۵۰\pi} (۱۱۷/۶۷)^{۲} \, ۰/۲ = ۵۲/۹ \text{ N.m}$$

سرعت نامی ۱۴۴۰ r.p.m یا سرعت بار کامل موتور است .

لغزش بار کامل $s = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۴$

جریان رتور در بار کامل

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

$$= \frac{۴/۸}{۰/۲۰۴} = ۲۳/۵۳ \text{ A}$$

ضریب توان رتور در بار کامل :

$$= \frac{r_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + (sx_۲)^۲}} = \frac{۰/۲}{۰/۲۰۴} = ۰/۹۸$$

گشتاور بار کامل

$$T_{efl} = \frac{۱}{\omega_s} ۳ (I_{۲fl})^{۲} \frac{r_۲}{s}$$

$$= \frac{۱}{۵۰\pi} ۳ (۲۳/۵۳)^{۲} \frac{۰/۲}{۰/۰۴} = ۵۲/۸۷ \text{ N.m}$$

نسبت جریان راه اندازی به جریان بار کامل

$$= \frac{۱۱۷/۶۷}{۲۳/۵۳} = ۵$$

نسبت گشتاور راه اندازی به گشتاور بار کامل

$$= \frac{۵۲/۹}{۵۲/۸۷} = ۱$$

ب : وقتی مقاومت خارجی در مدار رتور قرار گیرد . مقاومت کل مدار رتور ۰/۲ + ۱ = ۱/۲ Ω/ph خواهد شد .

$$I_{۲st} = \frac{۱۲۰}{\sqrt{۱/۲^۲ + ۱^۲}} = \frac{۱۲۰}{۱/۵۶۲} = ۷۶/۸۲ \text{ A}$$

ضریب توان در حالت راه اندازی موتور :

$$= \frac{۱/۲}{\sqrt{۱/۲^۲ + ۱^۲}} = \frac{۱/۲}{۱/۵۶۲} = ۰/۷۶۸$$

$$T_{est} = \frac{۱}{۵۰\pi}\ ۳(۷۶/۸۲)^۲\ \frac{۱/۲}{۱} = ۱۳۵/۲۵\ Nm$$

این مثال نشان می دهد با قرار دادن مقاومت خارجی در مدار رتور $I_{۲st}$ و T_{est} هر دو افزایش می یابند و ضریب توان رتور در راه اندازی تصحیح می شود . اینها مزایای اصلی موتور القائی رتور سیم پیچی شده بر موتور القائی قفس سنجابی است .

مثال ۶.۶

یک موتور القائی سه فاز ۶ قطب ۵۰Hz سرعت بار کامل ۹۶۰r.p.m را با اتصال کوتاه حلقه های لغزان دارد . این موتور بار با گشتاور ثابت را می چرخاند . اگر سرعت رتور با قرار دادن مقاومت خارجی در مدار رتور الف : به ۸۰۰ r.p.m ب : ۴۰۰ r.p.m برسد تلفات اهمی رتور را در این دو سرعت در بار کامل مقایسه کنید .

حل :

گشتاور بار ثابت نیاز به گشتاور الکترومغناطیسی T_e ثابت دارد . معادله (۱۲-۶) نشان می دهد که برای گشتاور ثابت T_e قدرت فاصله هوائی P_g ثابت می ماند زیرا سرعت سنکرون (بسته به تعداد قطبها و فرکانس) ثابت است . معادله (۱۱-۶) نشان می دهد که برای P_g ثابت تلفات اهمی رتور متناسب با لغزش است یعنی

لغزش ∝ تلفات اهمی رتور

$$\text{لغزش در بار کامل} = \frac{۱۰۰۰ - ۹۶۰}{۱۰۰۰} = ۰/۰۴$$

$$\text{لغزش در ۸۰۰ r.p.m} = \frac{۱۰۰۰ - ۸۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۲$$

$$\text{لغزش در ۴۰۰ r.p.m} = \frac{۱۰۰۰ - ۴۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۶$$

$$\frac{\text{تلفات اهمی رتور در ۸۰۰ r.p.m}}{\text{تلفات اهمی رتور در بار کامل}} = \frac{\text{لغزش در ۸۰۰ r.p.m}}{\text{لغزش بار کامل}} = \frac{۰/۲}{۰/۰۴} = ۵$$

$$\frac{\text{تلفات اهمی رتور در ۴۰۰ r.p.m}}{\text{تلفات اهمی رتور در بار کامل}} = \frac{۰/۶}{۰/۰۴} = ۱۵$$

مثال ۶.۷

یک موتور القائی ۱۰ kW و ۴۰۰ V سه فاز ۴ قطب ، ۵۰Hz با اتصال مثلث در حالت بی بار با جریان خط ۸ A و قدرت ورودی ۶۶۰ W می چرخد . در بار کامل جریان خط ۱۸A و قدرت ورودی ۱۱/۲kW است . مقاومت مؤثر استاتور هر فاز ۱/۲Ω و تلفات اصطکاک و مالش هوا ۴۲۰W است برای تلفات اهمی رتور ناچیز در حالت بی بار مطلوبست محاسبه :

الف : تلفات هسته استاتور

ب : تلفات کل رتور در بار کامل

ج : تلفات اهمی رتور در بار کامل

د : سرعت بار کامل

ه : گشتاور داخلی ، گشتاور محور و بازده موتور

حل :

الف : در حال بی بار قدرت کل ورودی مساوی مجموع تلفات هسته استاتور و تلفات اصطکاک و مالش هوا ، تلفات $I^۲R$ بی بار استاتور بوده و تلفات هسته رتور ناچیز است .

تلفات اهمی بار کامل استاتور - تلفات اصطکاک و مالش هوا - توان ورودی بی بار = تلفات هسته استاتور

$$= ۶۰۰ - ۴۲۰ - ۳\ (\frac{۸}{\sqrt{۳}})\ (۱/۲) = ۱۶۳/۲\ W$$

ب : توان فاصله هوائی در بار کامل

تلفات اهمی بار کامل استاتور - تلفات هسته استاتور - توان ورودی بار کامل استاتور = P_g

$$= ۱۱۲۰۰ - ۱۶۳/۲ - ۳\ (\frac{۱۸}{\sqrt{۳}})^۲\ (۱/۲)$$

$$= ۱۰۶۴۸\ W$$

قدرت محور = توان ورودی رتور P_g - تلفات کل رتور

$$= ۱۰۶۴۸ - ۱۰۰۰۰ = ۶۴۸\ W$$

ج : تلفات کل رتور شامل تلفات اهمی رتور و تلفات اصطکاک و مالش هوا است .

$$\text{تلفات اهمی رتور} = ۳\ I_۲^۲ r_۲ = ۶۴۸ - ۴۲۰ = ۲۲۸\ W$$

د :

$$۳\ I_۲^۲\ \frac{r_۲}{s} = P_g$$

یا:

$$۳\ (I_۲^۲ r_۲) = sP_g$$

$$۲۲۸ = s_{fl}\ P_g = s_{fl}\ (۱۰۶۴۸)$$

لغزش بار کامل

$$s_{fl} = \frac{۲۲۸}{۱۰۶۴۸} = ۰/۰۲۱۲$$

سرعت بار کامل رتور :

$$N_r = N_s (۱ - s) = ۱۵۰۰ (۱ - ۰/۰۲۱۲)$$
$$= ۱۴۶۸/۲ \text{ r.p.m}$$

ه: گشتاور داخلی

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{۱۰۶۴۸}{۵۰\pi} = ۶۷/۷۹ \text{ N.m}$$

گشتاور محور $T_{sh} = \frac{P_{sh}}{\omega_s (۱ - s)} = \frac{۱۰۰۰}{۵۰\pi (۱ - ۰/۰۲۱۲)} = ۶۵/۰۴ \text{ N.m}$

بازده $= \frac{P_{sh}}{\text{توان ورودی}} = \frac{۱۰۰۰۰}{۱۱۲۰۰}$
$= ۰/۸۹۲$ یا ۸۹/۲ ٪

مثال ۶.۸

یک موتور القائی با بار ۴۵kW بازده ۰/۹ دارد . در این بار تلفات مس استاتور و تلفات مس رتور معادل تلفات آهن است . تلفات مکانیکی یک سوم تلفات بی بار است . از تلفات مس در بی بار صرفنظر می گردد . لغزش را محاسبه کنید .

حل : تلفات در ۴۵kW

$$= (\frac{۱}{۰/۹} - ۱) \times ۴۵۰۰۰ = ۵۰۰۰ \text{ W}$$

(۱) تلفات مکانیکی + تلفات $I^۲R$ رتور + تلفات هسته‌استاتور+تلفات $I^۲R$ استاتور = تلفات کل

در حالت بی بار تلفات شامل تلفات مکانیکی (اصطکاک و مالش هوا) تلفات هسته استاتور و تلفات کوچک $I^۲R$ در استاتور و رتور است . با صرفنظر کردن از تلفات $I^۲R$ در حالت بی بار داریم :

(۲) تلفات مکانیکی + تلفات هسته استاتور = تلفات بی بار

تلفات مکانیکی $\frac{۱}{۳}$ تلفات بی بار داده شده و یا تلفات بی بار ۳ برابر تلفات مکانیکی در نظر گرفته شده است . بنابراین از معادله (۲) داریم :

تلفات مکانیکی + تلفات هسته استاتور = (تلفات مکانیکی) ۳

تلفات هسته استاتور $\frac{۱}{۲}$ = تلفات مکانیکی

اگر تلفات $I^۲R$ استاتور (= تلفات $I^۲R$ رتور = تلفات هسته استاتور) A باشد از معادله ۱

داریم :

$$\text{تلفات کل} = A + A + A + \frac{A}{۲}$$
$$۵۰۰۰ = \frac{۷A}{۲}$$

یا :

$$\text{تلفات مس رتور} = A = ۱۴۲۸/۵۷ \text{ W}$$

توان فاصله هوائی $P_g = ۴۵۰۰۰ + ۱۴۲۸/۵۷ + \frac{۱۴۲۸/۵۷}{۲}$
$= ۴۷۱۴۲/۸۶ \text{ W}$

$$\text{لغزش} = \frac{\text{تلفات } I^۲R \text{ رتور}}{P_g} = \frac{۱۴۲۸/۵۷}{۴۷۱۴۲/۸۶} = ۰/۰۳۰۳$$

۶-۶ نمودار فاز برداری موتور القائی

چنانکه شکل (c)۶-۳ نشان می دهد نیروی محرکه مغناطیسی رتور $F_۲$ با زاویه $۹۰ + \theta_۲$ نسبت به شار فاصله هوائی عقب است . نیروی محرکه مغناطیسی رتور با استاتور واکنش نشان می دهد و مؤلفه جبران کنند بار جریان استاتور $I'_۱$ را طلب می کند به طوریکه :

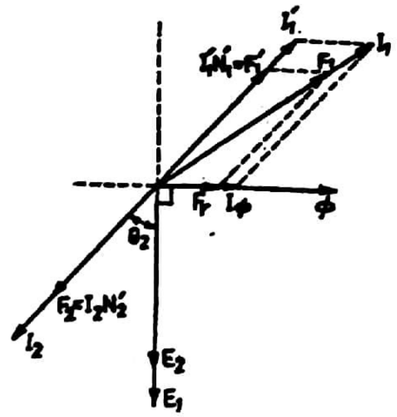
نیروی محرکه مغناطیسی رتور $F'_۱ = F_۲$ مؤلفه نیروی محرکه مغناطیسی استاتور

$$I'_۱ N'_۱ = I_۲ N'_۲$$

یا :

$$I'_۱ = I_۲ \frac{N'_۲}{N'_۱} \qquad (۶-۱۵)$$

$N'_۱$ و $N'_۲$ به ترتیب تعداد دور مؤثر استاتور و رتور می باشند . در شکل ۶-۹ نیروی محرکه مغناطیسی بار $F'_۱ = I'_۱ N'_۱$ که مؤلفه نیروی محرکه مغناطیسی کل استاتور $F_۱$ است با نیروی



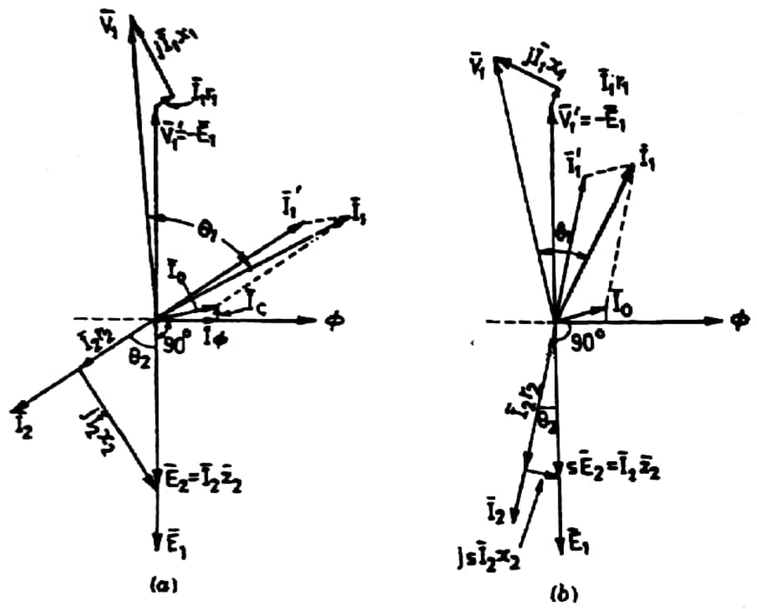
شکل ۶-۹: نمودار فاز برداری موتور القائی

محرکه مغناطیسی رتور F_2 مخالف است . بهمین ترتیب مؤلفه جریان بار I'_1 از جریان کل استاتور I_1 مخالف جریان رتور I_2 است در شکل ۹-۶ نیروی محرکه الکتریکی القائی هر فاز رتور E_2 نسبت به ϕ با زاویه زمانی ۹۰° طبق شکل (c)۳-۶ عقب است .

اگر از پس ماند صرفنظر شود ، شار فاصله هوائی ϕ با نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوائی F_r همفاز است . مانند ترانسفورماتور نیروی محرکه مغناطیسی مغناطیس کننده بی بار با نیروی محرکه مغناطیسی منتجه فاصله هوائی F_r تفاوت ندارد . باین دلیل جریان مغناطیس کننده I_ϕ در شکل ۹-۶ همفاز با F_r است . مجموع برداری F'_1 و F_r نیروی محرکه مغناطیسی کل استاتور F_1 را بدست می دهد . بهمین ترتیب مجموع برداری مؤلفه جریان بار استاتور I'_1 و جریان مغناطیس کننده موتور I_ϕ جریان کل استاتور I_1 را طبق شکل ۹-۶ بدست می دهد . همانند ترانسفورماتور نیروی محرکه الکتریکی القائی استاتور (یا اولیه) E_1 و نیروی محرکه الکتریکی القائی رتور (یا ثانویه) E_2 ۹۰° نسبت به ϕ عقب است .

شکل (a)۱۰-۶ نمودار فاز برداری کامل موتور القائی در حال سکون نشان می دهد ، که در آن نیروهای محرکه مغناطیسی برای سادگی نشان داده نشده اند . در حال سکون E_2 معادل $I_2 (r_2 + jx_2)$ است . مؤلفه تلفات هسته جریان استاتور I_c همفاز با $\bar{V}'_1$ یا $-\bar{E}_1$ است در حال سکون تلفات اصطکاک و مالش هوا صفر است . جریان بی بار استاتور $\bar{I}_0 = \bar{I}_\phi + \bar{I}_c$ و جریان بار استاتور $\bar{I}_1 = \bar{I}'_1 + \bar{I}_0$ می باشد . ولتاژ اعمالی به استاتور V_1 باید با نیروی ضد محرکه الکتریکی استاتور V'_1 (=$-\bar{E}_1$) و افت ولتاژ روی مقاومت ظاهری پراکندگی استاتور $\bar{I}_1 (r_1 + jx_1)$ طبق شکل (a)۱۰-۶ در تعادل باشد . زاویه ضریب توان θ_1(بین V_1 و I_1) در سرهای استاتور خیلی بزرگ است یعنی ضریب توان استاتور در لحظه راه اندازی موتور القائی سه فاز خیلی پائین است .

درسرعت عادی کار لغزش s کوچک است و معادله ولتاژ رتور $s\bar{E}_2 = \bar{I}_2 (r_2 + sx_2)$ خواهد شد که در نمودار برداری شکل (b)۱۰-۶ نمایش داده شده است . در این شکل $\bar{I}_0 = \bar{I}_\theta + \bar{I}_{fc}$ که I_{fc} مؤلفه تلفات هسته واصطکاک و مالش هوای جریان استاتور است . بقیه این نمودار مشابه شکل (a)۱۰-۶ رسم می شود . از شکل (b)۱۰-۶ معلوم می شود که ضریب توان بارکامل در سرهای استاتور به طور قابل ملاحظه ای نسبت به راه اندازی اصلاح شده است . (۰/۸ تا ۰/۹ پس فاز)



شکل ۱۰-۶: نمودار فاز برداری موتور القائی (a) در حال سکون (b) در بارکامل با لغزش s

۶-۷ مدار معادل

نشان دادیم که موتور القائی معادل یک ترانسفورماتور است . طبیعتاً مدار معادل موتور القائی باید مشابه مدار معادل ترانسفورماتور باشد . تنها اختلاف اینست که سیم پیچی ثانویه (یعنی سیم پیچی رتور) موتور القائی می چرخد و لذا با تولید قدرت مکانیکی سروکار دارد . استخراج مدار معادل موتور القائی مشابه ترانسفورماتور صورت می گیرد . تمام پارامترهای مدار معادل مقادیر فازی دارند .

مدار معادل استاتور

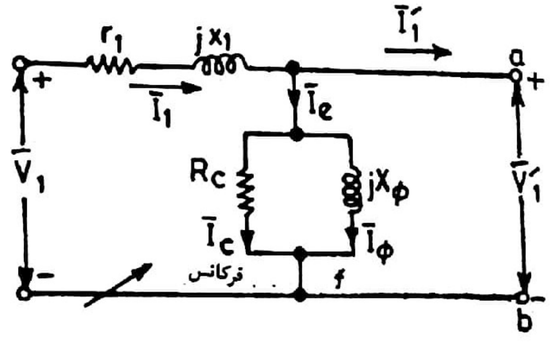
موج شارگردان فاصله هوائی نیروی ضد محرکه الکتریکی در سیم پیچی سه فاز استاتور (یا اولیه) تولید می کند . ولتاژ سرهای استاتور V_1 با نیروی ضد محرکه V'_1 ($-E_1$ =) و افت مقاومت ظاهری پراکندگی $\bar{I}_1 (r_1 + jx_1)$ در تعادل است . لذا همانند ترانسفورماتور ولتاژ استاتور یا اولیه برابر است با :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}'_1 + \bar{I}_1 (r_1 + jx_1) \qquad (۶-۱۶)$$

همانند ترانسفورماتور ، جریان استاتور I_1 از دومؤلفه تشکیل شده است . یک مولفه I'_1 مؤلفه بار است که نیروی محرکه مغناطیسی رتور $I_2N'_2$ را به طور کامل خنثی می کند (معادله ۱۵-۶ را ببینید) . مؤلفه دیگر جریان تحریک I_e است که وظیفه آن تولید شار

فاصله هوائی ϕ و تامین تلفات هسته است . همانند ترانسفورماتور ، جریان تحریک I_e را می توان به دو مؤلفه تجزیه کرد ، مؤلفه تلفات هسته I_c همفاز با V'_1 و مؤلفه مغناطیس کننده I_ϕ که ۹۰° نسبت به V'_1 پس فاز دارد . در ترانسفورماتور جریان تحریک را جریان بی بار نیز می گویند اما در یک موتور القائی سه فاز اینطور نیست ، زیرا جریان بی بار I_e در یک موتور القائی سه فاز طبق شکل ۱۰-۶ باید شار فاصله هوائی ϕ را ایجادکرده و تلفات بی بار را تامین کند (= تلفات هسته + تلفات اصطکاک یاطاقانها ، تلفات مالش هوا و تلفات I^2R استاتور و رتور) در حالی که عمل I_e در یک ترانسفورماتور ایجاد ϕ و تامین تلفات هسته است .

در یک موتور القائی سه فاز حاصلضرب $V'_1 I_c$ تلفات هسته را نشان می دهد (= تلفات بی بار ، تلفات اصطکاک و مالش هوا و تلفات کوچک I^2R استاتور و رتور در حالت بی بار) . در مدار معادل I_c و I_ϕ با یک شاخه موازی شامل مقاومت نماینده تلفات هسته ($R_c = \frac{V'_1}{I_c}$) موازی با مقاومت القائی مغناطیس کننده ($= \frac{V'_1}{I_\phi}$) طبق شکل ۱۱-۶ در نظر گرفته می شوند .



شکل ۱۱-۶: مدار معادل استاتور موتور القائی چند فاز

با محاسبه R_c و X_ϕ تحت شرایط کار عادی ، این پارامتر ثابت می مانند حتی اگر نیروی ضد محرکه V'_1 یا E_1 (دو سر R_c و X_ϕ) کمی از شرایط کار عادی منحرف شود .

مدار معادل رتور

جریان هر فاز رتور با معادله (۸-۶) داده شده است که در اینجا به صورت فاز برداری تکرار می شود :

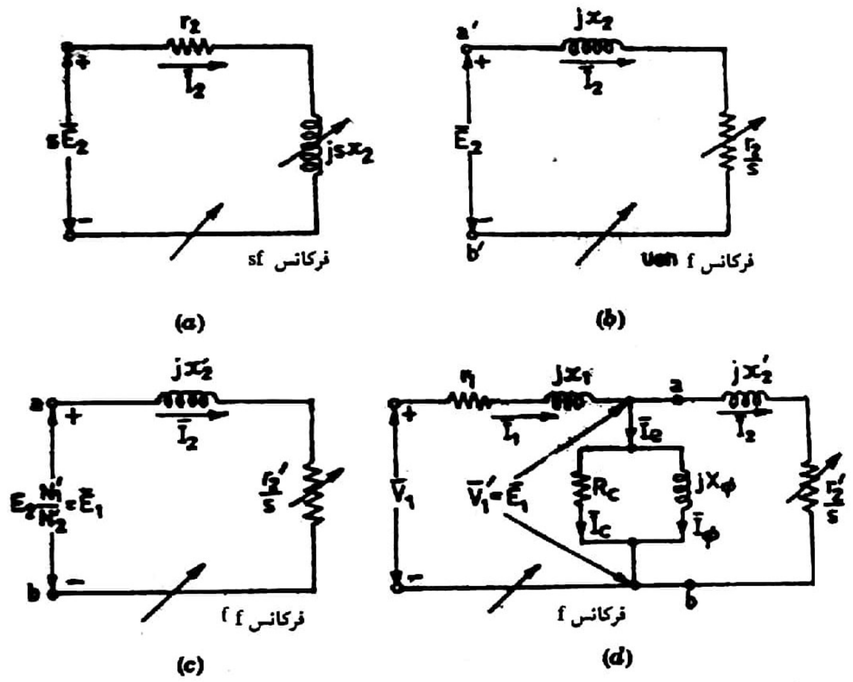
(۶-۱۷)

$$\bar{I}_2 = \frac{s\bar{E}_2}{r_2 + jsx_2}$$

از تقسیم صورت و مخرج بر s داریم :

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} \qquad (۶-۱۸)$$

باید توجه داشت که مقدار و فاز I_2 که از معادلات (۱۷-۶) و (۱۸-۶) بدست می آید مساویند . اما تفاوت قابل ملاحظه ای بین این دو معادله مشاهده می شود . در معادله (۱۷-۶) نیروی محرکه الکتریکی تولیدی فرکانس لغزش sE_2 که بر $r_2 + jsx_2$ تقسیم



شکل ۱۲-۶: (a) مدار واقعی رتور (b) مدار معادل رتور (c) مدار معادل رتور ارجاع شده به استاتور (d) مدار معادل دقیق موتور القائی

می شود ، جریان فرکانس لغزش را می دهد . اما در معادله (۱۸-۶) نیروی محرکه الکتریکی فرکانس خط E_2 وقتی بر $\frac{r_2}{s} + jx_2$ تقسیم می شود جریان فرکانس خط را بدست می دهد . مدارهای معادل شکل (b) و (a)۱۲-۶ بترتیب از معادلات (۱۷-۶) و (۱۸-۶) بدست می آیند .

مدار معادل کامل

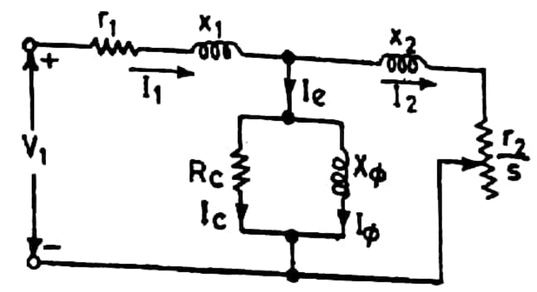
نیروی محرکه الکتریکی فرکانس خط E_2 اعمال شده به مدار رتور طبق شکل (b)۱۲-۶ با مقدار E_1 یا V'_1 همانند ترانسفورماتور با نسبت تبدیل اختلاف دارد . بنابراین ولتاژ رتور E_2 باید به استاتور یا اولیه ارجاع داده شود .

ولتاژ رتور ارجاع شده به استاتور $= \frac{E_2}{N'_2} N'_1 = E_1$

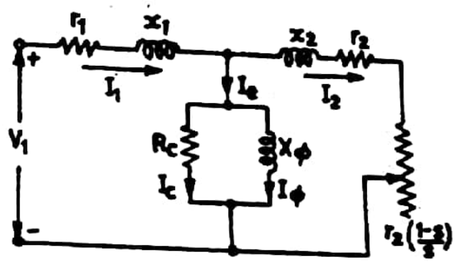
بهمین ترتیب مقاومت ظاهری پراکندگی رتور ارجاع شده به استاتور :

$$= \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)\left(\frac{N'_1}{N'_2}\right)^2 = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$$

ولتاژ ظاهر شده دو سر ab شکل ۶-۱۲(c) با فرکانس خط بوده و همان مقدار ولتاژ دو سر ab شکل ۶-۱۱ را دارد . این چهار سر را می توان بهم وصل کرد تا مدار معادل کامل موتور القائی شکل ۶-۱۲(d) بدست آید . قابل توجه است که در این شکل کمیات رتور به



(a)



(b)

شکل ۶-۱۳: (a) مدار معادل موتور القائی چند فاز (b) شکل اصلاح شده مدار معادل موتور القائی

طرف استاتور (به عنوان اولیه) ارجاع داده شده اند . مدار معادل کلی تر موتور القائی در شکل (a) ۶-۱۳ رسم شده است که برای سادگی :

(۱) علامت پریم برای کمیات ارجاع شده حذف شده

(۲) نشانه‌های مختلط (علامت بردار روی I و j برای مقاومتهای القائی و ....) برداشته شده اند .

باید بخاطر داشت که در شکل (a) ۶-۱۳ تمام کمیات رتور به طرف استاتور ارجاع داده شده است . و تمام کمیات شکل (a) ۶-۱۳ در فرکانس استاتورند . شکل دیگر مدار معادل در شکل (b) ۶-۱۳ نشان داده شده است که در آن مقاومت $\frac{r_2}{s}$ به r_2 و $(\frac{1-s}{s})r_2$ تقسیم شده

است یعنی :

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + r_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$$

این مدار معادل بر مشابهت مدارهای معادل ترانسفورماتور و موتور القائی تاکید دارد . برای مثال در حال سکون $s = 1$ مدار شکل (b) ۶-۱۳ مدار معادل اتصال کوتاه ترانسفورماتور دو سیم پیچه خواهد شد . در حالت $s = 0$ (در سرعت سنکرون) مدار معادل ترانسفورماتور مدار باز خواهد بود .

در شکل (b) ۶-۱۳ ، r_2 مقاومت واقعی رتور (ارجاع شده به استاتور) است در حالی که مقاومت متغیر $(\frac{1-s}{s})r_2$ مشابه الکتریکی بار مکانیکی متغیر می باشد .

استفاده از مدار معادل

در لحظه راه اندازی در سیم پیچی های استاتور و رتور جریان زیادی عبور می کند . این جریانهای هجومی بزرگ باعث اشباع مغناطیسی شده و در نتیجه آن مقاومتهای القائی پراکندگی کمتر از مقدار شان در شرایط بار کامل است . فرکانس رتور از فرکانس خط در راه اندازی تامقدار کم فرکانس لغزش در سرعت بار کامل تغییر می کند . بنابراین توزیع جریان در هادیهای رتور در فرکانسهای بالا و پائین رتور تفاوت می کند . در نتیجه مقاومت رتور در این حدود سرعت تغییر قابل ملاحظه ای دارد . براین اساس پارامترهای مدار معادل باید در مقادیری از فرکانس و جریان رتور تعیین شود که محاسبات عملکرد موتور با استفاده از این مدار معادل انجام پذیرد .

باید توجه داشت که R_c در مدار معادل موتور القائی تلفات بی بار را نمایش نمی دهد . بلکه تنها تلفات هسته موتور القائی را نشان می دهد .

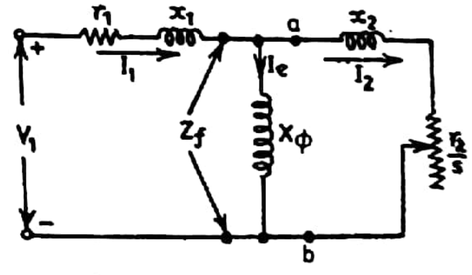
۶-۸ تحلیل مدار معادل

تمام مشخصه های مهم عملکرد موتور را می توان از مدار معادل تعیین کرد . عبارات قدرت فاصله هوائی P_g ، قدرت مکانیکی داخلی P_m تولید شده در رتور قبلاً" در بخش ۶-۴ بدست آمده اند .

استفاده از مدار معادل دقیق شکل (b) ۶-۱۳ کار زیاد می برد . از اینرو در این مدار معادل ساده سازیهائی انجام می شود . در ترانسفورماتور تحلیل مدار معادل با صرفنظر کردن از شاخه موازی شامل R_c و X_ϕ یا با انتقال این شاخه موازی به دو سر اولیه انجام

می گیرد . این ساده سازی در مورد مدار معادل موتور القائی مجاز نیست ، زیرا جریان تحریک در ترانسفورماتور از ۲ تا ۶ درصد جریان بار کامل تغییر می کند و مقاومتهای القائی پراکندگی نسبی اولیه کوچکتر است اما در موتورهای القائی جریان تحریک از ۳۰ تا ۵۰ درصد جریان بار کامل تغییر می کند و مقاومتهای القائی پراکندگی نسبی (p.u) استاتور نسبتاً بزرگند . باین خاطر با صرفنظر کردن شاخه موازی یا اتصال آن به دو سر استاتور خطای بزرگی در محاسبه قدرت و گشتاور وارد می شود .

در شرایط عادی کار یعنی ولتاژ و فرکانس ثابت ، تلفات هسته موتورهای القائی معمولاً ثابت است . با توجه به این واقعیت ، تلفات هسته R_c که نمایش دهنده تلفات هسته است می تواند از مدار معادل شکل (b)۶-۱۳ حذف شود ، اما برای تعیین قدرت محور یا گشتاور محور تلفات ثابت هسته را باید همراه با تلفات اصطکاک و مالش هوا و تلفات بار سرگردان در نظر گرفت . با این ساده سازی مدار معادل شکل ۶-۱۴ بدست می آید که با تقریب خوب قابل قبول است . مدار معادل شکل (b)۶-۱۳ مجدداً در شکل ۶-۱۵ رسم شده و در آن تلفات مختلف موتور القائی سه فاز نشان داده شده است . قدرت محور مساوی قدرت مکانیکی تولیدی در $r_2 (1 - s) / s$] منهای تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک و مالش هوا) می باشد . در شکل ۶-۱۴ از R_c صرفنظر شده اما تلفات با R_c نمایش داده می شود یعنی در محاسبه عملکرد ماشینی که از این مدار معادله استفاده می شود ، تلفات هسته همراه با تلفات اصطکاک ومالش هوا باید در نظر گرفته شود . تمام کمیات مورد استفاده در مدارهای معادل کمیات فازی اند .

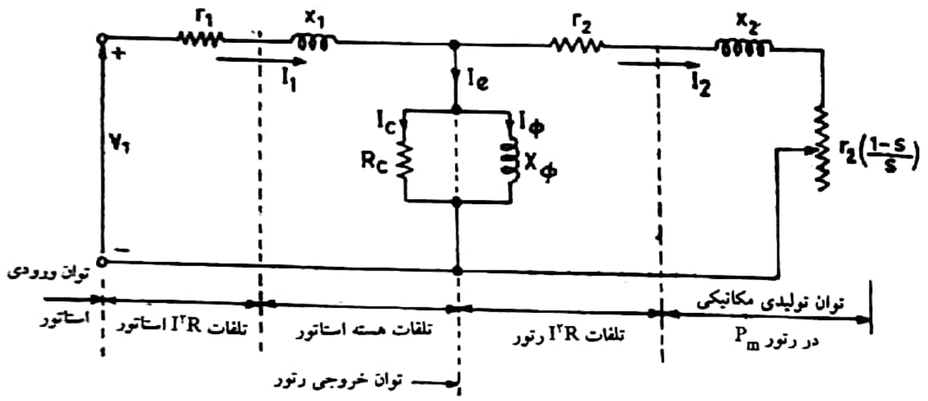


شکل ۶-۱۴: مدار معادل موتور القائی بدون تلفات هسته

پارامترهای عملکرد حالت دائمی موتور القائی مانند جریان ، سرعت ، گشتاور ، تلفات و غیره را می توان از مدار معادل شکل ۶-۱۴ محاسبه کرد . در این شکل Z_f مقاومت ظاهری فازی است که توسط میدان دوار فاصله هوائی به استاتور عرضه می شود . باید توجه داشت

که Z_f شامل اثر منعکس شده مقاومت ظاهری پراکندگی رتور $\frac{r_2}{s} + jx_2$ و مقاومت القائی مغناطیس کننده X_ϕ می باشد . از شکل ۶-۱۴ داریم :

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{(\frac{r_2}{s} + jx_2)(jX_\phi)}{\frac{r_2}{s} + j(x_2 + X_\phi)}$$



شکل ۶-۱۵: توزیع قدرت در موتور القائی سه فاز

مقاومت ظاهری Z_1 که از طرف ولتاژ اعمال شده به استاتور V_1 دیده می شود عبارتست از :

$$Z_1 = r_1 + jx_1 + Z_f$$

$$\text{جریان استاتور} \quad I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$$

قدرت تلف شده کل در ترکیب موازی $\frac{r_2}{s} + jx_2$ و jX_ϕ . $I_2^2 \frac{r_2}{s}$ است . از آنجا که $Z_f = R_f + jX_f$ قدرت تلف شده در Z_f معادل $I_1^2 R_f$ بوده که باید مساوی $I_2^2 \frac{r_2}{s}$ باشد .

قدرت هر فاز فاصله هوائی :

$$P_g = I_2^2 \frac{r_2}{s} = I_1^2 R_f \qquad (۶-۱۹)$$

وقتی قدرت فاصله هوائی معین شد ، قدرت خروجی محور ، گشتاور ، بازده و غیره را می توان با مراجعه به بخش ۶-۴ تعیین کرد .

مثال ۶.۹

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz ، ۴۰۰V چهار قطب با اتصال ستاره دارای ثابتهای فازی زیر بر حسب Ω اهم ارجاع شده به استاتور می باشند :

$$r_1 = ۰/۱۵ \;,\; x_1 = ۰/۴۵ \;,\; r_2 = ۰/۱۲ \;,\; x_2 = ۰/۴۵ \;,\; X_\phi = ۲۸/۹$$

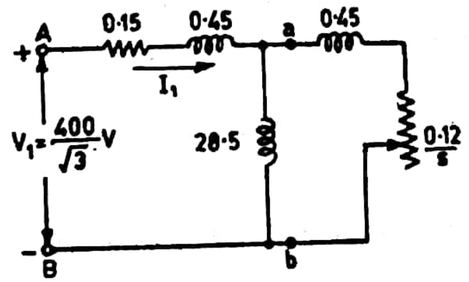
تلفات ثابت (تلفات هسته ، اصطکاک و مالش هوا) = ۴۰۰ W

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

حل :

از مدار معادل موتور القائی طبق شکل ۱۶-۶ مقاومت ظاهری عرضه شده به ولتاژ منبع برابر است با :

$$\bar{Z}_{AB} = r_1 + jx_1 + \frac{(\frac{r_2}{s} + jx_2)(jX_q)}{\frac{r_2}{s} + j(x_2 + X_\phi)}$$



شکل ۱۶-۶: مدار معادل موتور القائی مثال ۹-۶

$$= r_1 + jx_1 + R_f + jX_f$$

$$= 0/15 + j0/45 + \frac{(\frac{0/12}{0/04} + j0/45)(j28/5)}{3 + j\,28/95}$$

$$= 0/15 + j0/45 + 2/87 + j0/738$$

$$= 3/02 + j1/188 = 3/25 \angle 21/47^\circ$$

نتیجه :

$$R_f = 2/87\ \Omega$$

جریان استاتور :

$$I_1 = \frac{400 \angle 0}{\sqrt{3}\,(3/25) \angle 21/47^\circ} = 71/06 \angle -21/47^\circ$$

پس فاز $= \cos 21/47^\circ = 0/93$ = ضریب توان

توان ورودی استاتور $= \sqrt{3}\,(400)\,(71/06)\,(0/93) = 45/784$ kW

از معادله (۱۹-۶) قدرت کل فاصله هوائی :

$$P_g = m\,I_1^2\,R_f = 3\,(71/06)^2\,(2/87)\ W$$

$$= 43/476\ kW$$

سرعت سنکرون

$$n_s = \frac{2f}{p} = \frac{2 \times 50}{4} = 25\ \ r.p.s$$

سرعت رتور :

$$n_r = (1 - s)\,n_s = 0/96 \times 25 = 24\ r.p.s \quad \text{یا} \quad 1440\ r.p.m$$

$$\omega_s = 2\pi \times 25 = 50\pi\ \ rad/sec$$

قدرت مکانیکی تولیدی

$$P_m = (1 - s)\,P_g$$

$$= 0/96 \times 43/476 = 41/737\ kW$$

قدرت خروجی :

$$P_{sh} = P_m - \text{تلفات ثابت}$$

$$= 41/737 - 0/4 = 41/337\ kW$$

$$\text{گشتاور خروجی} = \frac{P_{sh}}{\omega_r} = \frac{41337}{(1 - s)\,\omega_s} = \frac{41337}{0/96 \times 50\pi} = 274/12\ Nm$$

تلفات مختلف موتور القائی بشرح زیر است :

$$\text{تلفات اهمی استاتور} = 3\,I_1^2 r_1 = 3\,(71/06)^2\,(0/15) = 2272/3\ W$$

$$\text{تلفات اهمی رتور} = sP_g = 0/04\,(43476) = 1739\ W$$

$$\text{تلفات ثابت} = 400\ W$$

$$\text{تلفات کل} = 4411/3\ W$$

توان خروجی $P_{sh} = 41/337$ kW

$$\text{قدرت ورودی} = P_{sh} + \text{تلفات کل}$$

$$= 41/337 + 4/411 = 45/748\ kW$$

$$\text{بازده} = 1 - \frac{\text{تلفات}}{\text{ورودی}} = 1 - \frac{4/411}{45/748}$$

$$= 0/9036 \text{ یا } 90/36\ \%$$

۶-۸-۱ مشخصه های گشتاور - لغزش

هنگامی که مشخصه گشتاور - لغزش یا قدرت - لغزش لازم باشد ، کاربرد قضیه تونن در موردمدارمعادل موتورالقائی شکل ۶-۱۴ محاسبات رابه‌طورقابل‌ملاحظه‌ای‌کاهش‌می دهد.

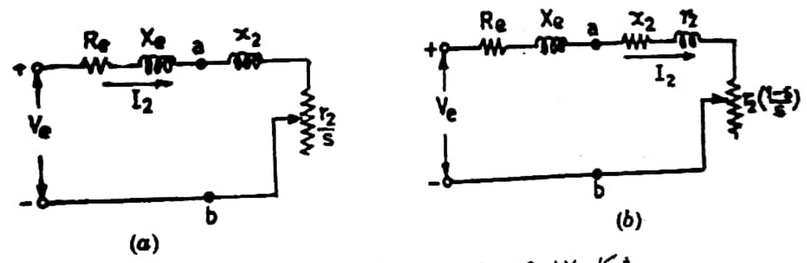
برای اعمال قضیه تونن به شکل ۶-۱۴ دو نقطه a و b آن را در نظر بگیرید . از این دو نقطه به منبع ولتاژ V_1 نگاه می کنیم . طبق قضیه تونن مدار مرکب از r_1 و x_1 و X_ϕ و منبع ولتاژ V_1 را می توان با منبع ولتاژ معادل V_e و مقاومت ظاهری معادل $Z_e = R_e + jX_e$ طبق شکل ۶-۱۷ جایگزین کرد.

به طوریکه :

$$V_e = \frac{V_1 (jX_\phi)}{r_1 + j (x_1 + X_\phi)} \qquad (۶-۲۰)$$

و

$$Z_e = \frac{(r_1 + jx_1)(jX_\phi)}{r_1 + j (x_1 + X_\phi)} \qquad (۶-۲۱)$$



شکل ۶-۱۷: مدارهای معادل تونن موتور القائی

V_e ولتاژ ظاهر شده دو سر a و b است که مدار رتور از این دو نقطه قطع شده است . مقاومت ظاهری معادل استاتور Z_e مقاومت ظاهری دیده شده از نقاط a و b به طرف منبع ولتاژ است در حالی که منبع ولتاژ اتصال کوتاه شده است . برای اغلب موتورهای القائی $(x_1 + X_\phi)$ خیلی بزرگتر از r_1 است . با توجه این نکته r_1 را می توان در مخرج هر دو معادله (۶-۲۰) و (۶-۲۱) حذف کرد . بدون اینکه خطای قابل ملاحظه ای ایجاد شود .

لذا :

(۶-۲۲)

$$V_e = \frac{V_1 X_\phi}{x_1 + X_\phi} = \frac{V_1 X_\phi}{X_1}$$

و

$$Z_e = R_e + jX_e = \frac{r_1 X_\phi}{x_1 + X_\phi} = \frac{jx_1 X_\phi}{x_1 + X_\phi}$$

(۶-۲۳)

$$= \frac{r_1 X_\phi}{X_1} + j \frac{x_1 X_\phi}{X_1}$$

در اینجا $X_1 = x_1 + X_\phi$ مقاومت خود القائی هر فاز استاتور است . از مدار معادل شکل ۶-۱۷ (a) جریان رتور برابر است با :

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_e}{(R_e + \frac{r_2}{s}) + j (x_2 + X_e)} \qquad (۶-۲۴ a)$$

و از معادله (۶-۱۳) گشتاور کل برابر است با :

$$T_e = \frac{m}{\omega_s} \frac{V_e^2}{(R_e + \frac{r_2}{s})^2 + (x_2 + X_e)^2} \frac{r_2}{s} \text{ N.m} \qquad (۶-۲۴ b)$$

m تعداد فازهای استاتور است .

برای راحتی معادله (۶-۲۴b) به صورت زیر بازنویسی می شود :

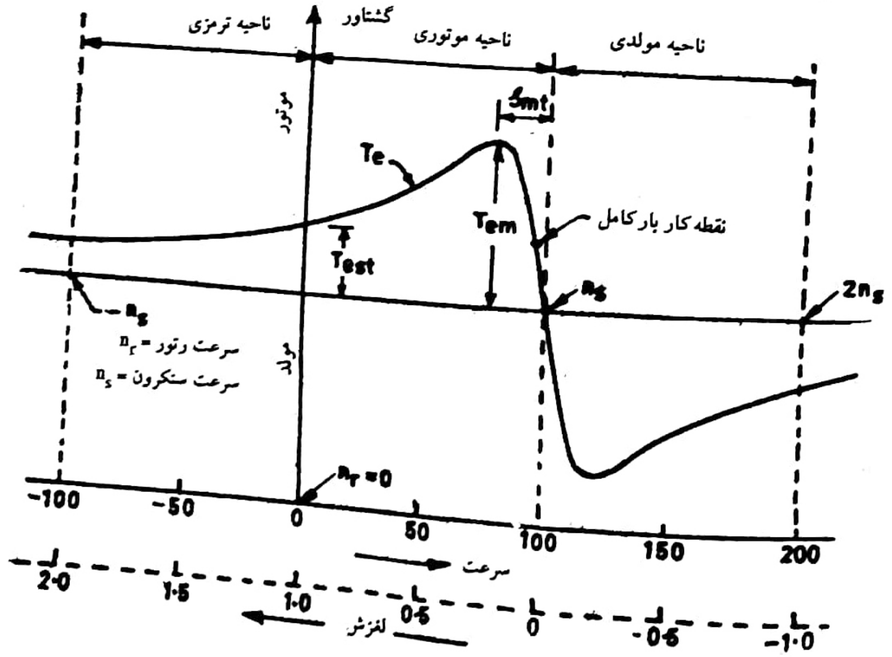
$$T_e = \frac{K_t}{(R_e + \frac{r_2}{s})^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s} \text{ N.m} \qquad (۶-۲۵)$$

که در آن

$$K_t = \frac{mV_e^2}{\omega_s} = \frac{mV_e^2}{2\pi n_n}$$

و

$$X = x_2 + X_e$$



شکل ۶-۱۸: منحنی گشتاور - لغزش ماشین القائی در مناطق کار ترمزی ، موتوری و مولدی

تغییرات گشتاور با لغزش یا سرعت موتور القائی را می توان از معادله (۲۴-۶) برای مقادیر مختلف لغزش s درحالی‌که موتوربه‌منبع‌ولتاژ با فرکانس ثابت وصل است رسم نمود .

شکل عمومی منحنی گشتاور - سرعت یا گشتاور - لغزش در شکل ۱۸-۶ نشان داده شده است . بسته به مقدار لغزش ، موتور القائی می تواند نواحی کار یا وضعیت های کاری زیر را داشته باشد :

الف : حالت موتوری : $1 \geq s \geq 0$

تحت شرایط کار عادی ، رتور در جهت گردش میدان دوار ناشی از جریانهای استاتور می چرخد . بدین لحاظ لغزش از یک در حال سکون تا صفر در سرعت سنکرون تغییر می کند یعنی $1 \geq s \geq 0$. مقادیر متناظر سرعت صفر ($s = 1$) و سرعت سنکرون ($s = 0$) می باشند .

ب : حالت مولدی : $s < 0$

برای این حالت کار ، لغزش منفی است $s < 0$. موتور القائی در این ناحیه تنها وقتی کار می کند که استاتور آن به منبع ولتاژ با فرکانس ثابت وصل بوده و رتور آن توسط چرخاننده در سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون بچرخد . اتصال استاتور به منبع ولتاژ برای ساختن میدان دوار فاصله هوائی در سرعت سنکرون اساسی است . چنانچه استاتور از منبع ولتاژ قطع شود و رتور توسط چرخاننده با سرعت فوق سنکرون بچرخد عمل تولید صورت نمی گیرد .

ج : حالت ترمزی $s > 1$

برای این حالت کار لغزش بزرگتر از ۱ است . لغزش پیش از یک را می توان با چرخاندن رتور توسط چرخاننده در جهت خلاف میدان دوار بدست آورد . اما چنین استفاده ای در عمل نادر است . استفاده عملی از لغزش بیش از یک توقف سریع رتور با عمل ترمزی است که Plugging نام دارد . برای بدست آوردن $s > 1$ یا عمل ترمزی دو سر استاتور با هم عوض می شوند . با این کار ترادف فاز معکوس شده و لذا جهت گردش میدان مغناطیسی دوار ناگهان مخالف جهت گردش رتور خواهد شد . گشتاور الکترومغناطیسی T_e در جهت خلاف گردش رتور عمل می کند و موتور را ترمز می کند . لذا موتور را می توان سریعا" به حالت توقف در آورد . اما استاتور باید قبل از شروع گردش رتور در خلاف جهت از منبع قطع گردد .

هر سه ناحیه کار ماشین (ناحیه ترمزی $s = 2$ تا $s = 1$ ناحیه کار موتوری $s = 1$ تا $s = 0$ و

ناحیه کار مولدی $s = 0$ تا $s = -1$ در شکل ۱۸-۶ نشان داده شده است .

گشتاور داخلی حداکثر

این گشتاور نیز بنامهای گشتاور بازدارنده [1] ، گشتاور نامیزانی [2] یا گشتاور شکست [3] T_{em} خوانده می شود . شرایط گشتاور داخلی حداکثر را می توان با استفاده از قضیه انتقال توان حداکثر از تئوری مدار بدست آورد . همانند معادله (۱۳-۶) گشتاور وقتی حداکثر است که $I_2^2 \frac{r_2}{s}$ حداکثر باشد . یعنی وقتی قدرت تحویلی به $\frac{r_2}{s}$ حداکثر باشد . با اعمال این قضیه به شکل (a)۱۷-۶ توان جذب شده بوسیله $\frac{r_2}{s}$ وقتی حداکثر است که $\frac{r_2}{s}$ مساوی مقدار مقاومت ظاهری دیده شده بوسیله $\frac{r_2}{s}$ بطرف منبع ولتاژ V_e باشد یعنی وقتی :

$$\frac{r_2}{s_{mT}} = \sqrt{R_e^2 + (X_e + x_2)^2}$$

$$= \sqrt{R_e^2 + X^2}$$

که $X = x_2 + X_e$ است .

لذا لغزش s_{mT} که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد برابر است با :

$$s_{mT} = \frac{r_2}{\sqrt{R_e^2 + X^2}} \qquad (۲۶-۶)$$

با جانشین کردن $\frac{r_2}{s_{mT}}$ بجای $\frac{r_2}{s}$ در معادله (۲۵-۶) گشتاور حداکثر T_{em} چنین است :

$$T_{em} = \frac{K_t [\sqrt{R_e^2 + X^2}]}{[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2}]^2 + X^2}$$

$$= \frac{K_t [\sqrt{R_e^2 + X^2}]}{[R_e^2 + R_e^2 + X^2 + 2R_e \sqrt{R_e^2 + X^2} + X^2}$$

1- Stalling torque

2- Pull-out torque

3- Breakdown torque

$$= \frac{K_t \left[\sqrt{R_e^2 + X^2} \right]}{2 \sqrt{R_e^2 + X^2} \left[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2} \right]}$$

$$T_{em} = \frac{K_t}{2 \left[R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2} \right]} \qquad (۶-۲۷)$$

معادله (۶-۲۶) نشان می دهد که لغزشی که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد متناسب با مقاومت رتور r_2 است ، اما معادله (۶-۲۷) نشان می دهد که گشتاور حداکثر T_{em} مستقل از r_2 است . این بآن معنی است که اگر r_2 با قرار دادن مقاومت خارجی در مدار رتور موتور القائی با رتور سیم پیچی شده افزایش یابد مقدار حداکثر گشتاور داخلی بی تاثیر است اما لغزشی که در آن گشتاور حداکثر رخ می دهد متناسبا" تغییر می کند .

حال ($K_t \propto V_e^2$) K_t متناسب با مجذور ولتاژ استاتور V_1 است . R_e متناسب با مقاومت استاتور r_1 و X متناسب با x_1 و x_2 است . با توجه باین واقعیت ها بررسی معادله (۶-۲۷) نشان می دهد که :

۱ – T_{em} با مجذور ولتاژ استاتور تناسب مستقیم دارد .

۲ – T_{em} با افزایش مقاومت استاتور r_1 (یعنی R_e) کاهش می یابد .

۳ – T_{em} با افزایش مقاومت القائی پراکندگی استاتور x_1 و مقاومت القائی پراکندگی رتور x_2 کاهش می یابد .

برای بدست آوردن گشتاور حداکثر بالاتر فاصله هوائی تا حد امکان کوچک نگهداشته می شود . فاصله هوائی کوچکتر شار بیشتری را اجازه می دهد که به طور متقابل بین سیم پیچی های استاتور و رتور وجود داشته باشد . در نتیجه شار پراکندگی و راکتانس پراکندگی کاهش یافته و مقدار گشتاور حداکثر بیشتر خواهد شد .

نمونه منحنی های گشتاور – لغزش موتور القائی با مقاومت متغیر مدار رتور در شکل ۶-۱۹(a) نشان داده شده است . برای منحنی گشتاور بار T_L طبق شکل بازاء مقاومت مدار رتور r_2 سرعت n_1 است ، بازاء $r'_2 > r_2$ سرعت به n_2 کاهش می یابد . شکل ۶-۱۹(a) نشان می دهد که برای مقاومت مدار رتور r''_2 بدست آوردن گشتاور حداکثر در حالت موتوری غیر ممکن است . لکن با این مقدار مقاومت رتور می توان گشتاور حداکثر را در حالت ترمزی ماشین القائی بدست آورد . از منحنی های گشتاور – لغزش شکل ۶-۱۹(a) می توان نتیجه گرفت که برای موتور القائی رتور سیم پیچی شده :

۱ – سرعت موتور را می توان با تغییر مقاومت مدار رتور کنترل کرد اما گشتاور حداکثر بدون تغییر می ماند .

۲ – گشتاور راه اندازی را می توان با تغییر مقاومت رتور تغییر داد .

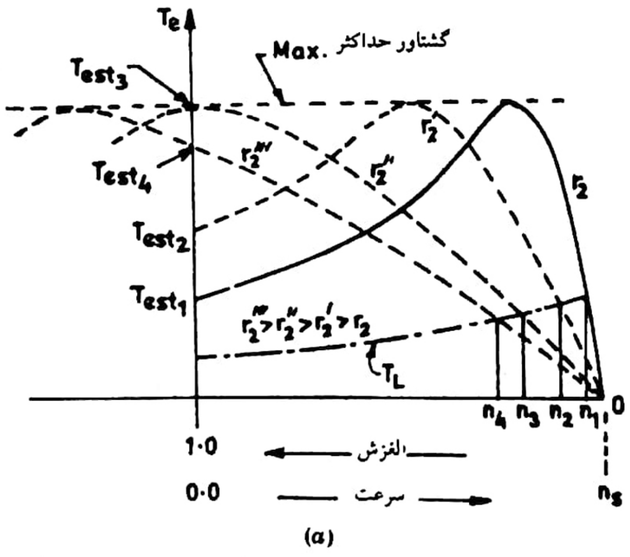
۳ – جریان خط گرفته شده بوسیله موتور نیز باید با مقاومت مدار رتور تغییر کند شکل ۶-۱۹(b) اثر مقاومت مدار رتور را بر جریان ورودی استاتور به صورت تابعی از لغزش نشان می دهد .

۴ – ضریب توان در راه اندازی نیز متاثر از مقاومت رتور است .

برای داشتن عملکرد بهتر موتور القائی ، گشتاور راه اندازی با قرار دادن مقاومت خارجی مناسب در مدار رتور در لحظه راه اندازی افزایش می یابد . با شتاب گرفتن موتور ، مقاومت خارجی مرحله به مرحله از مدار خارج می شود به طوری که گشتاور حداکثر در دوره شتاب گرفتن ثابت بماند . در نهایت مقاومت خارجی به صفر می رسد و رتور سرعت عادی خود را بدست می آورد .

گشتاور راه اندازی

درراه‌اندازی لغزش $s = 1$ بوده واز معادله (۶-۲۵) گشتاور راه‌اندازی T_{est} عبارتست از :

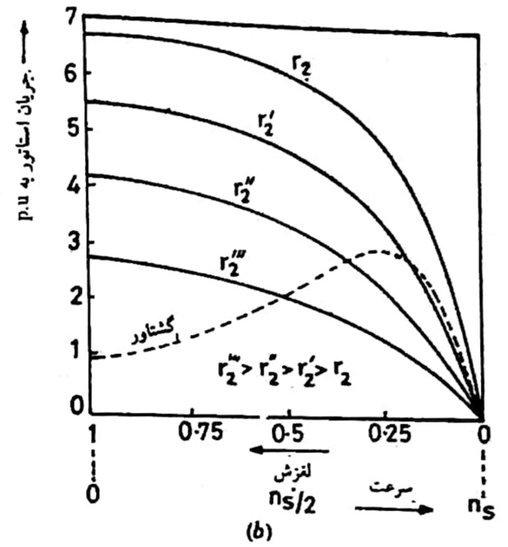


(a)

شکل (a)۶-۱۹ : منحنی های گشتاور – لغزش موتور القائی با مقادیر مختلف مقاومت مدار رتور

$$T_{est} = \frac{K_t}{(R_e + r_2)^2 + X^2} r_2 \qquad (۶-۲۸)$$

گشتاور راه اندازی T_{est} را می توان با تغییر مقاومت مدار رتور طبق شکل ۶-۱۹ کنترل کرد . برای بدست آوردن گشتاور راه اندازی حداکثر ، مقاومت مدار رتور طبق معادله ۶-۲۶



شکل (b) ۶-۱۹: اثر مقاومت رتور بر جریان استاتور روی مشخصه های لغزش موتور القائی سه فاز

بایدبه مقدار $\sqrt{R_e^2 + X^2}$ افزایش یابد که در آن $s_{mT} = 1$ است . این مقدار جدید مقاومت مدار رتور را می توان با قرار دادن مقاومت خارجی معادل ($\sqrt{R_e^2 + X^2} - r_2$) در مدار رتور در لحظه راه اندازی بدست آورد .

کار موتور در نزدیکی سرعت سنکرون

وقتی لغزش s کوچک باشد $\frac{r_2}{s}$ در مقایسه با دیگر جملات مخرج معادله (a ۲۴-۶) بزرگ است و می توان از آنها صرفنظر نمود و لذا از معادله (a ۲۴-۶)

$$I_2 = \frac{sV_e}{r_2} \qquad (۶-۲۹)$$

و از معادله (۲۵-۶) :

$$T_e = \frac{K_t}{(\frac{r_2}{s})^2} \cdot \frac{r_2}{s} = \frac{sK_t}{r_2} \qquad (۶-۳۰\ a)$$

$$= sK \qquad (۶-۳۰\ b)$$

که در آن مقدار ثابتی است $= K = \frac{K_t}{r_2}$

بررسی شکل ۱۹-۶ (با مقاومت مدار رتور r_2) نشان می دهد که در شرایط کار عادی تحت لغزشهای کم ، مشخصه گشتاور - لغزش تقریبا" خطی است .

اگر ولتاژ ورودی متغیر باشد از معادله (a ۳۰-۶) داریم :

$$T_e = s \frac{mV_e^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{r_2}$$

$$= K' V_1^2 s \qquad (۶-۳۱)$$

که K' مقدار ثابتی است .

گشتاور موتور بر حسب T_{em}

عبارت گشتاور موتور القائی را نیز می توان بر حسب گشتاور حداکثر T_{em} و نسبت $\frac{s}{s_{mT}}$ بیان کرد . برای یافتن عبارت ساده و تقریبی از مقاومت اهمی استاتور r_1 یا مقاومت معادل استاتور R_e صرفنظر می شود . از تقسیم معادله (۲۴-۶.b) بر معادله (۲۷-۶) داریم :

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2\,[\,R_e + \sqrt{R_e^2 + X^2}\,]}{(\,R_e + \frac{r_2}{s}\,)^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s}$$

از آنجاکه از r_1 یا R_e صرفنظر شده است :

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2X}{(\,\frac{r_2}{s}\,)^2 + X^2} \cdot \frac{r_2}{s} \qquad (۶-۳۲)$$

از معادله (۲۶-۶) $r_2 = s_{mT} X$ ($R_e = 0$) . از جانشین کردن این مقدار r_2 در معادله (۳۲-۶) داریم :

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2X}{(\,\frac{s_{mT}X}{s}\,)^2 + X^2} \cdot \frac{s_{mT}X}{s}$$

یا :

$$\frac{T_e}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{s_{mT}}{s} + \frac{s}{s_{mT}}}$$

یا : $$T_e = \frac{2T_{em}}{\frac{s_{mT}}{s} + \frac{s}{s_{mT}}} \qquad (۶-۳۳)$$

۶-۸-۲ مشخصه قدرت - لغزش

قدرت مکانیکی کل داخلی تولید شده عبارتست از :

$$P_m = m\,(\,1 - s\,)\,P_g$$
$$= mI_2^2\, r_2\, \frac{1 - s}{s} \qquad W$$

یا :

$$P_m = \frac{mV_e^2}{[\,R_e + r_2 + \frac{r_2\,(1 - s)}{s}\,]^2 + X^2} \cdot r_2\, \frac{1 - s}{s}$$

با استفاده از قضیه انتقال توان حداکثر مقدار حداکثر قدرت مکانیکی داخلی تولیدی بدست می آید . از آنجاکه P_m هر فاز قدرتی است که به $\frac{r_2 (1 - s)}{s}$ تحویل داده می شود ، قدرت مکانیکی داخلی تولیدی طبق شکل (b) ۱۷-۶ وقتی حداکثر است که :

$$\frac{r_2 (1 - s_{mP})}{s_{mP}} = \sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2} \qquad (۶-۳۵a)$$

$$s_{mP} = \frac{r_2}{\sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2} + r_2} \qquad \text{یا} \qquad (۶-۳۵b)$$

برای یافتن مقدار حداکثر P_m مقدار s_{mP} را از معادله (۶-۳۵a) در معادله (۶-۳۴) جانشین می کنیم .

$$P_{mm} = \frac{mV_e^2 \sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2}}{[R_e + r_2 \sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2}] + X^2}$$

یا :

$$P_{mm} = \frac{mV_e^2}{2[R_e + r_2 \sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2} + X^2]} \qquad (۶-۳۶)$$

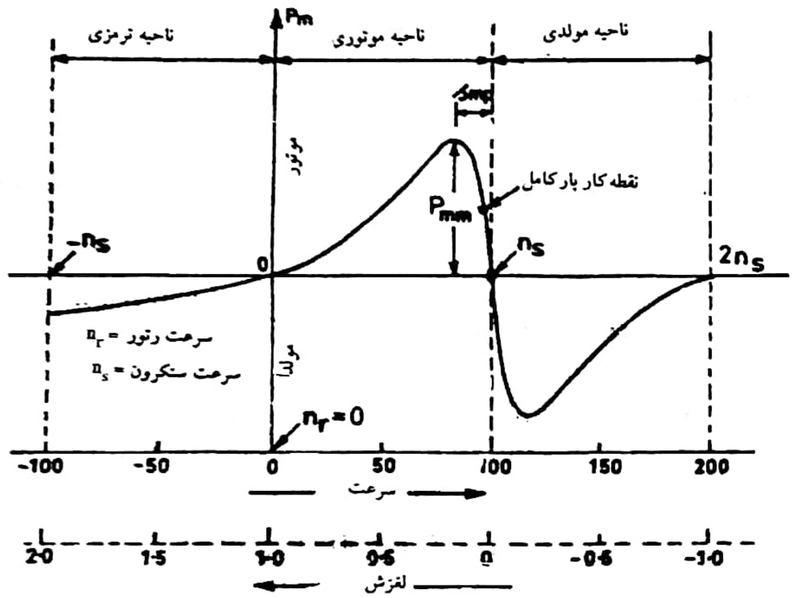
شایان ذکر است که معادله (۶-۳۶) را می توان از مخرج معادله (۶-۲۷) با جانشین کردن R_e با $R_e + r_2$ بدست آورد .

از معادله (۶-۳۶) می توان دید که P_{mm} بستگی به مقاومت رتور r_2 دارد در حالی که T_{em} مستقل از آنست .

از معادلات (۶-۲۶) و (۶-۳۵) دیده می شود که s_{mP} از نظر مقدار کمتر از s_{mT} است . معادله (۶-۳۴) نشان می دهد که در راه اندازی قدرت مکانیکی داخلی تولیدی P_m صفر است. تغییرات قدرت مکانیکی تولیدی بر حسب لغزش s در شکل ۲۰-۶ رسم شده است .

در حالت راه اندازی گرچه قدرت مکانیکی داخلی تولیدی P_m صفر است گشتاور راه اندازی T_{est} صفر نیست ، زیرا وقتی لغزش $s = 1$ است قدرت فاصله هوائی انتقالی از استاتور به رتور $I_2^2 r_2$ است که تماماً به صورت تلفات اهمی مدار رتور ظاهر شده و لذا قدرت مکانیکی تولیدی P_m صفر است . اما $T_{est} = \frac{1}{\omega_s} I_2^2 r_2$ صفر نیست .

شکل ۲۰-۶ قدرت P_m را در ناحیه ترمزی منفی نشان می دهد . به عبارت دیگر قدرت



شکل ۲۰-۶: منحنی قدرت - لغزش ماشین القائی در نواحی کار ترمزی ، موتور و مولدی

P_m در ناحیه ترمزی به منبع برمی گردد . وقتی لغزش s بیشتر از یک شود معادله (۶-۳۴) نشان می دهد که P_m منفی است . شایان ذکر است که با این حال T_e در ناحیه ترمزی مثبت است .

برای بدست آوردن قدرت خروجی حداکثر از یک مولد القائی ، مراجعه به شکل ۱۸-۶ نشان می دهد که رتور باید در سرعتی معادل :

$$n_s \left[1 + \frac{r_2}{\sqrt{(R_e + r_2)^2 + X^2} + r_2} \right]$$

بچرخد .

مثال ۶.۱۰

برای موتور مثال ۹-۶ مطلوبست تعیین الف : لغزشی که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد . گشتاور حداکثر و قدرت خروجی متناظر با آن

ب : جریان رتور و گشتاور در راه اندازی ج : مقاومت خارجی که باید در مدار رتور قرار داد تا در راه‌اندازی حداکثرگشتاور تولید شود . د : قدرت‌داخلی تولیدی‌بازاء لغزش ۰/۰۴ و ه : قدرت حداکثر داخلی تولیدی و لغزش نظیر آن : نسبت تبدیل مؤثر استاتور به رتور معادل ۱/۲ است .

حل :

الف : با تبدیل مدار معادل موتور القائی شکل ۱۶-۶ به مدار معادل تونن شکل (a) ۱۷-۶

داریم :

$$\bar{Z}_e = \frac{(0/15 + j\,0/45)(j\,28/5)}{0/15 + j\,28/95} = \frac{(0/15 + j\,0/45)(j\,28/5)}{j\,28/95}$$

$$R_e = \frac{(0/15)(j\,28/5)}{j\,28/95} = 0/1476\ \Omega$$

و :

$$X_e = \frac{(0/45)(j\,28/5)}{j\,28/95} = 0/443\ \Omega$$

از شکل (a) ۱۷-۶ گشتاور وقتی حداکثر است که :

$$\frac{r_2}{s_{mT}} = R_e + j\,(x_2 + X_e)$$

یا :

$$\frac{0/12}{s_{mT}} = 0/1476 + j\,0/893$$

یا :

$$s_{mT} = \frac{0/12}{\sqrt{0/1476^2 + 0/893^2}} = 0/1326$$

یا :

$$V_e = \frac{V_1}{\sqrt{3}}\frac{28/5}{28/95} = \frac{400}{\sqrt{3}}\frac{28/5}{28/95} = 227/4\ V$$

از معادله (۲۷-۶) گشتاور داخلی حداکثر برابر است با :

$$T_{em} = \frac{3(227/4)^2}{(50\pi)\,2[0/1476 + \sqrt{0/1476^2 + 0/893^2}]}$$

$$= 469/1\ N.m$$

گشتاور مکانیکی متناظر تولید شده برابر است با :

$$= 469/1\,(1 - 0/1326)\,(50\pi) = 63915/3W$$

توان خروجی یا توان محور :

$$= 63915/3 - 400 = 63515/3\ W$$

گشتاور حداکثر محور :

$$= \frac{63515/3}{(50\pi)\,(0/8674)} = 466/2\ Nm$$

ب : در راه اندازی s = ۱ از مدار معادل تونن جریان رتور در راه اندازی برابر است با :

$$I_{2st} = \frac{227/4}{\sqrt{0/2676^2 + 0/8932^2}} = 243/94\ A$$

گتشاور راه اندازی

$$T_{est} = 3\,(243/94)^2\,(\frac{0/12}{1})\frac{1}{50\pi} = 136/4\ N.m$$

ج : از شکل (a)۱۷-۶ برای گشتاور حداکثر در راه اندازی داریم :

$$\frac{r_2 + R}{1} = 0/1476 + j\,0/893$$

$$r_2 + R = \sqrt{1476^2 + 0/8932^2} = 0/9051\ \Omega$$

یا :

مقاومت خارجی (ارجاع شده به استاتور) که باید در مدار رتور قرار داد :

$$R = 0/9051 - 0/12 = 0/7851\ \Omega$$

مقاومت خارجی واقعی که باید در مدار رتور قرار داد برابر است با :

$$\frac{0/7851}{1/2^2} = 0/5452\ \Omega$$

د : از معادله (۳۴-۶) قدرت داخلی تولیدی بازاء لغزش ۰/۰۴ برابر است با :

$$P_m = \frac{3\times(227/4)^2}{\left[0/1476 + 0/12 + \frac{0/12\times 0/96}{0/04}\right]^2 + 0/893^2} \times 0/12\,\frac{0/96}{0/04}$$

$$= 41736/36\ W = 41/736\ kW$$

ه : لغزشی که در آن قدرت داخلی تولیدی حداکثر است از معادله (۳۵-۶) به صورت زیر بدست می اید :

$$s_{mp} = \frac{0/12}{\left[(0/1476 + 0/12)^2 + 0/893^2\right]^{1/2} + 0/12} = 0/114$$

از معادله (۳۶-۶) قدرت حداکثر داخلی تولیدی برابر است با :

$$P_{mm} = \frac{3 \times (22v/4)^2}{2\left[0/1476 + 0/12 + \sqrt{0/2676^2 + 0/8932}\right]}$$

$$= 6464v/44\ W = 64/64v\ kW$$

مثال ۶.۱۱

برای موتور القائی سه فاز مثال ۹-۶ گشتاور داخلی تولیدی حداکثر را در شرایط زیر پیدا کنید.

الف : ۵۰ Hz و ۲۳۰ V/ph ب : ۵۰ Hz و ۱۱۵ V/ph

ج : ۲۵ Hz و ۱۱۵ V/ph د : ۵ Hz و ۲۳ V/ph

حل :

پارامترهای مدارمعادل تونن در ۵۰Hz از مثال ۱۰-۶ برابرند با :

$R_e = 0/1476\ \Omega$, $X_e = 0/443\ \Omega$, $r_2 = 0/12\ \Omega$, $x_2 = 0/45\ \Omega$

$$V_e = \frac{28/5}{28/95} V_1 = 0/9845\ V_1$$

سرعت سنکرون $\omega_r = \frac{4\pi f}{p} = \pi f$ با $p = 4$

از معادله (۲۷-۶) برای $f = 50\ Hz$

$$T_{em} = \frac{3}{\pi \times 50} \cdot \frac{V_e^2}{2\left[0/1476 + \sqrt{0/1476^2 + 0/8932}\right]}$$

$$= 9/071 \times 10^{-3}\ V_e^2$$

الف : وقتی ولتاژ منبع ۵۰Hz و ۲۳۰ V باشد.

$$V_e = 0/9845 \times 230 = 226/4V$$

$$T_{em} = 9/071 \times 10^{-3} (226/44)^2 = 465/12\ Nm$$

ب : برای ۵۰Hz و $V_1 = 115\ V$

$$V_e = 0/9845 \times 115 = 113/22\ V$$

$$T_{em} = 9/071 \times 10^{-3} (113/22)^2 = 116/28\ Nm$$

چنانکه انتظار می رفت گشتاور حداکثر $\frac{1}{4}$ بدست آمده در بند الف است .

$$V_e = 0/9845 \times 115 = 113/22\ V$$

ج : برای $f = 25Hz$

$$R_e = 0/1476\Omega \qquad X_e = \frac{(\frac{1}{2} \times 0/45)(\frac{1}{2} \times 28/5)}{\frac{1}{2} \times 28/95} = 0/2215\Omega$$

$$x_2 = 0/225\ \Omega$$

$$T_{em} = \frac{3}{\pi \times 50} \cdot \frac{113/22^2}{2\left[0/1476 + \sqrt{0/1476^2 + 0/4465^2}\right]}$$

$$= 396/24\ Nm$$

د : وقتی $f = 5Hz$ است .

$$V_e = 0/9845 \times 23 = 22/644\ V$$

$$X_e = \frac{1}{10} \times 0/443 = 0/443\Omega \quad \text{و} \quad x_2 = \frac{1}{10} \times 0/45 = 0/045$$

$$T_{em} = \frac{3}{\pi \times 50} \cdot \frac{22/644^2}{2\left[0/1476 + \sqrt{0/1476^2 + 0/0893^2}\right]}$$

$$= 152/96\ Nm$$

این مثال نشان می دهد که اگر $\frac{V}{f}$ ثابت نگهداشته شود ، به عت اثر مقاومت سیم پیچی گشتاور حداکثر در فرکانس پائین تر کاهش می یابد .

مثال ۶.۱۲

از مدار معادل یک موتور القائی چند فاز روابط زیر را بدست آورید :

الف :

$$\frac{I_{2st}}{I_2} = \sqrt{\frac{s^2 + s_{mT}^2}{s^2(1 + s_{mT}^2)}}$$

ب :

$$\frac{I_{2mT}}{I_2} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[1 + \left(\frac{s_{mT}}{s}\right)^2\right]}$$

که در آن I_{2st} مؤلفه بار جریان راه اندازی استاتور و I_{2mT} مؤلفه بار جریان استاتور در گشتاور حداکثر است . از مقاومت استاتور صرفنظر نمائید .

حل :

الف : ازمدار معادل شکل (a) ۶-۱۷ مؤلفه بار استاتور جریان راه اندازی I_{2st} برابر است با :

$$I_{2st} = \frac{V_c}{\sqrt{(R_c + r_2)^2 + (X_c + x_2)^2}}$$

جریان بار استاتور I_2 در لغزش s برابر است با :

$$I_2 = \frac{V_c}{\sqrt{(R_c + \frac{r_2}{s})^2 + (X_c + x_2)^2}}$$

وقتی مقاومت استاتور r_1 صرفنظر کردنی باشد $R_c = 0$ و نسبت I_{2st} و I_2 چنین خواهد شد :

$$\frac{T_{2st}}{I_2} = \sqrt{\frac{(\frac{r_2}{s})^2 + X^2}{r_2^2 + X^2}} \qquad (۶-۳۷a)$$

از معادله (۶-۲۵) با $R_c = 0$ داریم :

$$r_2 = s_{mT} X$$

با جانشین کردن مقدار r_2 ($= s_{mT}X$) در معادله (۶-۳۷a) داریم :

$$\frac{I_{2st}}{I_2} = \sqrt{\frac{(\frac{s_{mT}}{s})^2 X^2 + X^2}{(s_{mT}X)^2 + X^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{s^2 + s_{mT}^2}{s^2 (1 + s_{mT}^2)}} \qquad (۶-۳۷)$$

ب : جریان بار استاتور I_2 با $r_1 = 0$ برابر است با :

$$I_2 = \frac{V_c}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + X^2}}$$

جریان I_{2mT} متناظر با گشتاور حداکثر برابر است با :

$$I_{2mT} = \frac{V_c}{\sqrt{(\frac{r_2}{s_{mT}})^2 + X^2}}$$

$$\frac{I_{2mT}}{I_2} = \sqrt{\frac{(\frac{r_2}{s})^2 + X^2}{(\frac{r_2}{s_{mT}})^2 + X^2}}$$

اما $r_2 = s_{mT} X$

$$\frac{I_{2mT}}{I_2} = \sqrt{\frac{(\frac{s_{mT}}{s})^2 X^2 + X^2}{(\frac{s_{mT}}{s_{mT}})^2 X^2 + X^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1 + (\frac{s_{mT}}{s})^2}{1 + 1}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}\left[1 + (\frac{s_{mT}}{s})^2\right]} \qquad (۶-۳۸)$$

مثال ۶.۱۳

یک موتور القائی رتور سیم پیچی شده ۱۰kW و ۴۰۰V و سه فاز ۴ قطب ۵۰Hz قدرت خروجی نامی (۱۰kW) را در ولتاژ و فرکانس نامی درهنگام اتصال کوتاه حلقه های لغزان تولید می کند . گشتاور حداکثر دو برابر گشتاور بار کامل است که در لغزش ۱۰٪ با مقاومت خارجی صفر در مدار رتور اتفاق می افتد . از مقاومت استاتور و تلفات گردشی صرفنظر می شود تعیین کنید :

۱ – لغزش و سرعت رتور در گشتاور بار کامل

۲ – تلفات اهمی رتور در گشتاور بار کامل

۳ – گشتاور راه اندازی در ولتاژ و فرکانس نامی

۴ – جریان راه اندازی بر حسب جریان بار کامل

۵ – جریان استاتور در گشتاور حداکثر بر حسب جریان بار کامل

۶ – بازده بار کامل

اکنون مقاومت رتور با قرار دادن مقاومت در مدار رتور سه برابر می شود . با همان

گشتاور بار کامل مطلوبست تعیین :

۷ – لغزش در گشتاور حداکثر

۸ – لغزش بار کامل و سرعت رتور

۹ – گشتاور راه اندازی

۱۰ – جریان راه اندازی بر حسب جریان بار کامل

۱۱ – تلفات I^2R رتور در گشتاور بار کامل

۱۲ – قدرت تولیدی در گشتاور بار کامل و بازده

حل :

۱ – گشتاور حداکثر

$$T_{em} = ۲ \text{ (گشتاور بار کامل } T_{efl} \text{)}$$

$$T_{em} = ۲T_{efl} \quad , \quad s_{mT} = ۰/۱$$

از معادله (۳۳–۶)

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{s_{mT}}{s_{fl}} + \frac{s_{fl}}{s_{mT}}}$$

$$\frac{۱}{۲} = \frac{۲}{\frac{۰/۱}{s_{fl}} + \frac{s_{fl}}{۰/۱}}$$

یا :

$$s_{fl}^{۲} - ۰/۴\, s_{fl} + ۰/۰۱ = ۰$$

از حل آن لغزش بار کامل بدست می آید :

$s_{fl} = ۰/۰۲۶۸$ یا ۲/۶۸ ٪

سرعت رتور :

$$N_r = ۱۵۰۰ \, (۱ - ۰/۰۲۶۸)$$

$$= ۱۴۵۹/۸ \approx ۱۴۶۰ \text{ r.p.m}$$

۲ – چون از تلفات گردشی (تلفات ثابت) صرفنظر شده است ، قدرت مکانیکی تولیدی برابر است با P_m = قدرت محور = ۱۰۰۰۰ وات .

قدمت فاصله هوائی

$$P_g = \frac{P_m}{۱ - s_{fl}}$$

$$= \frac{۱۰۰۰۰}{۱ - ۰/۰۲۶۸} = ۱۰۲۷۵/۴ \text{ W}$$

تلفات اهمی رتور در گشتاور بار کامل

$$= sP_g = ۰/۰۲۶۸ \times ۱۰۲۷۵/۴ = ۲۷۵/۴ \text{ W}$$

به طریق دیگر تلفات اهمی رتور برابر است با :

$$= P_g - P_m = ۱۰۲۷۵/۴ - ۱۰۰۰۰ = ۲۷۵/۴ \text{ W}$$

۳ – گشتاور بار کامل

$$T_{efl} = \frac{P_g}{۲\pi n_s} = \frac{۱۰۲۷۵/۴}{۲\pi \, (۲۵)} = ۶۵/۴۲ \text{ Nm}$$

حال :

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{s_{mT}}{۱} + \frac{۱}{s_{mT}}}$$

$$T_{est} = \frac{۲T_{em}}{\frac{۰/۱}{۱} + \frac{۱}{۰/۱}}$$

$$= \frac{۲(۲T_{efl})}{۱۰/۱} = \frac{۴}{۱۰/۱} \, (۶۵/۴۲) = ۲۵/۹۱ \text{ Nm}$$

۴ – از معادله (۳۷–۶)

$$\frac{I_{۲st}}{I_{۲fl}} = \sqrt{\frac{s_{fl}^{۲} + s_{mT}^{۲}}{s_{fl}^{۲} \, (۱ + s_{mT}^{۲})}}$$

$$= \sqrt{\frac{(۰/۰۲۶۸)^{۲} + ۱^{۲}}{۰/۰۲۶۸^{۲} \, (۱ + ۰/۰۱)}} = ۳/۸۴۴$$

$$I_{۲st} = ۳/۸۴۴ \, I_{۲fl}$$

۵ – از معادله (۳۸–۶)

$$\frac{I_{۲mT}}{I_{۲fl}} = \sqrt{\frac{۱}{۲} \left[۱ + \left(\frac{s_{mT}}{s_{fl}}\right)^{۲} \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{۱}{۲} \left[۱ + \left(\frac{۰/۱}{۰/۰۲۶۸}\right)^{۲} \right]} = ۲/۶۲۳$$

$$I_{2mT} = ۲/۶۲۳\ I_{2fl}$$

شایان ذکر است که جریان I_{2mT} متناظر با گشتاور حداکثر کمتر از جریان I_{2st} در راه اندازی است .

۶ – بازده :

$$\text{بازده} = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}} \times ۱۰۰ = \frac{۱۰۰۰۰}{۱۰۲۷۵/۴} \times ۱۰۰$$

$$= ۹۷/۳۲\ ٪$$

۷ – قبل از اینکه مقاومت خارجی در مدار رتور قرار گیرد ، از معادله (۶–۲۶) با $r_1 = ۰$ داریم :

$$\frac{r_2}{s_{mT}} = \sqrt{(X_e + x_2)^2} = \sqrt{X^2} = X$$

یا :

$$\frac{r_2}{X} = s_{mT} = ۰/۱$$

وقتی مقاومت مدار رتور ۳ برابر می شود :

$$\frac{۳r_2}{X} = s_{mT1}$$

مقدار جدید لغزش که درگشتاور حداکثر اتفاق می افتد برابر است با :

$$s_{mT1} = ۳\ (۰/۱)$$

$$= ۰/۳ \text{ یا } ۳۰٪$$

۸ – با افزایش مقاومت مدار رتور گشتاور حداکثر T_{em} بدون تغییر می ماند . با ثابت ماندن گشتاور بارکامل $T_{em} = ۲T_{efl}$ از معادله (۶–۳۳) داریم :

$$\frac{۱}{۲} = \frac{۲}{\frac{s_1}{۰/۳} + \frac{۰/۳}{s_1}}$$

از حل آن لغزش بارکامل بدست می آید :

$$s_1 = ۰/۰۸۰۴$$

$$N_r = ۱۵۰۰\ (۱ - ۰/۰۸۰۴) = ۱۳۷۹/۴ \text{ r.p.m}$$

۹ –

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۱}{۰/۳} + \frac{۰/۳}{۱}}$$

$$T_{est} = \frac{۲}{۳/۶۳}\ (۲T_{efl})$$

$$= \frac{۴}{۳/۶۳}\ (۶۵/۴۲) = ۷۲/۰۹ \text{ N.m}$$

۱۰ – از معادله (۶–۳۲)

$$\frac{I_{2st}}{I_{2fl}} = \sqrt{\frac{(۰/۰۸۰۴)^2 + ۰/۳^2}{(۰/۰۸۰۴)^2 + (۱ + ۰/۰۹)}} = ۳/۷$$

$$I_{2st} = ۳/۷\ I_{2fl}$$

۱۱ – هر تغییری در مقاومت رتور از طریق مقاومت $\frac{r_2}{s}$ بر استاتور اثر می گذارد . با افزایش r_2 به $۳r_2$ و لغزش بارکامل جدید $s_1 = ۳s$ مقاومت $\frac{r_2}{s}$ ثابت می ماند . نتیجه اینست که تمام پارامترهای مدار معادل ثابت می مانند و لذا استاتور از هر تغییر در مدار رتور بی تاثیر است . یعنی تا مادامیکه $\frac{r_2}{s}$ ثابت است ، جریان استاتور و ضریب توان ، قدرت فاصله هوائی و گشتاور ثابت می مانند .

تلفات اهمی رتور درگشتاور بارکامل $= s_1 P_g = ۰/۸۰۴ \times ۱۰۲۷۵/۴ = ۸۲۶/۱۴ \text{ W}$

۱۲ – قدرت تولیدی درگشتاور بارکامل

$$P_{m1} = (۱ - s_1)\ P_g = (۱ - ۰/۰۸۰۴)\ (۱۰۲۷۵/۴)$$

$$= ۹۴۴۹/۲۶ \text{ W}$$

$$\text{بازده} = \frac{۹۴۴۹/۲۶}{۱۰۲۷۵/۴} \times ۱۰۰ = ۹۱/۹۶\ ٪$$

این مثال نشان می دهد که اثر وارد کردن مقاومت خارجی در مدار رتور الف : کاهش سرعت رتور ، جریان راه اندازی ، قدرت خروجی و بازده و ب : افزایش لغزشی که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد . افزایش تلفات اهمی رتور و گشتاور راه اندازی می باشد .

مثال ۶.۱۴

یک موتور القائی رتور سیم پیچی شده ۶۰kW و ۴۰۰V و سه فاز ۵۰Hz دارای لغزش بار کامل ۰/۰۴ در هنگام کار با ولتاژ نامی و فرکانس نامی و اتصال کوتاه در حلقه های لغزان می باشد . لغزش درگشتاور حداکثر ۰/۲ است از مقامت اهمی استاتور و تلفات گردشی صرفنظر می‌شود . مطلوبست تعیین الف :گشتاور حداکثر و ب : تلفات اهمی بارکامل رتور . اکنون با اضافه کردن مقاومت خارجی سری در هر فاز رتور مقاومت رتور دو برابر می شود . برای قدرت خروجی نامی ج : لغزش درگشتاور حداکثر د : لغزش بارکامل و ه:گشتاور بارکامل را محاسبه کنید .

حل : سرعت سنکرون

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104/72 \text{ rad/s}$$

سرعت رتور $\omega_s = 104/72\ (1 - 0/04) = 100/53 \text{ rad/s}$

چون از تلفات گردشی صرفنظر شده ، قدرت مکانیکی تولیدی

$$P_m = 60000 \text{ W}$$

$$\omega_r T_{efl} = 60000 \text{ W}$$

$$T_{efl} = T_1 = \frac{60000}{100/53} = 596/84 \text{ Nm}$$

الف : چون مقاومت استاتور ناچیز است :

$$\frac{T_1}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{s_{mT}}{s_1} + \frac{s_1}{s_{mT}}} = \frac{2}{\frac{0/2}{0/04} + \frac{0/04}{0/2}} = \frac{2}{5/2}$$

که s_1 = لغزش بار کامل = 0/04

$$T_{em} \text{ گشتاور حداکثر} = \frac{5}{2} \times 596/84 = 1551/8 \text{ Nm}$$

ب : تلفات اهمی بار کامل رتور

$$= s_1 P_g = (\frac{s_1}{1 - s_1})\ P_m$$

$$= (\frac{0/04}{0/96}) \times 60000 = 2500 \text{ W}$$

ج :

$$\frac{r_2}{X} = s_{mT} = 0/2$$

لغزش جدید در گشتاور حداکثر :

$$s_m T_1 = \frac{2r_2}{X} = 2 \times 0/2 = 0/4$$

د : چون از مقاومت استاتور صرفنظر می شود : $T_{em} = 1551/8 \text{ Nm}$

از معادله ۳۳-۶ :

$$\frac{T_2}{1551/8} = \frac{2}{\frac{s_2}{0/4} + \frac{0/4}{s_2}}$$

که s_2 و T_2 بترتیب لغزش بار کامل و گشتاور بار کامل می باشند .

$$T_2 = \frac{1551/8 \times 2 \times 0/4 s_2}{s_2^2 + 0/16} = \frac{1241/44\ s_2}{s_2^2 + 0/16} \qquad (1)$$

از آنجا که :

$$\omega_r T_2 = 60000 \text{ W}$$

$$T_2 = \frac{60000}{104/72\ (1 - s_2)} \qquad (2)$$

از معادلات ۱ و ۲

$$\frac{60000}{104/72\ (1 - s_2)} + \frac{1241/44 s_2}{s_2^2 + 0/16} \Rightarrow s_2^2 + 0/16 = 2/167\ (s_2 - s_2^2)$$

یا لغزش بار کامل $s_2 = 0/084$

$$3/167 s_2^2 - 2/167 s_2 + 0/16 = 0 \Rightarrow s_2 = 0/084 \quad \text{و} \quad 0/6$$

(هـ) گشتاور بار کامل $T_2 = \frac{60000}{104/72 \times 0/916} = 625/5 \text{ Nm}$

مثال ۶.۱۵

برای یک موتور القائی سه فاز گشتاور حداکثر دو برابر گشتاور بار کامل و گشتاور راه اندازی ۱/۶ برابر گشتاور بار کامل است . برای داشتن لغزش بار کامل ٪۵ ، درصد کاهش مقاومت مدار رتور را محاسبه کنید . از مقاومت ظاهری استاتور صرفنظر کنید .

حل :

از معادله (۳۲-۶)

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{1/6 T_{efl}}{2 T_{efl}} = \frac{2}{\frac{s_{mT1}}{1} + \frac{1}{s_{mT1}}}$$

یا :

$$s_{mT1}^2 - 2/5\, s_{mT1} + 1 = 0$$

از حل آن : $s_{mT1} = 0/5$ بدست می آید .

از معادله (۲۵-۶) با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور

$$\frac{r_2}{x_2} = s_{mT1} = 0/5$$

یا :

$$r_2 = 0/5\, x_2$$

برای لغزش بار کامل ۰/۰۵

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{1}{2} = \frac{2}{\frac{s_{mT2}}{0/05} + \frac{0/05}{s_{mT2}}}$$

$$s_{mT1}^2 - 0/2\, s_{mT2} + 0/0025 = 0$$

که از حل آن $s_{mT2} = 0/1866$ و از معادله (۲۵-۶) :

$$\frac{r'_2}{x_2} = 0/1866$$

مقاومت مدار رتور جهت بدست آوردن لغزش ٪۵

$$r'_2 = 0/1866\ x_2$$

لذا : کاهش در مقاومت مدار رتور :

$$= ۰/۵x_۲ - ۰/۱۸۶۶x_۲$$

و درصد کاهش در مقارمت مدار رتور

$$= \frac{۰/۵x_۲ - ۰/۱۸۶۶x_۲}{۰/۵x_۲} \times ۱۰۰$$
$$= ۶۲/۶۸\,\%$$

مثال ۶.۱۶

رتور یک موتور القائی سه فاز دارای مقاومت اهمی ۰/۰۴Ω/ph و مقاومت القائی حالت سکون ۰/۲Ω/ph است . چه مقاومت خارجی در مدار رتور باید قرار داد تا در راه اندازی نصف گشتاور حداکثر بدست آید . از مقاومت ظاهری استاتور صرفنظر کنید . این مقاومت خارجی جریان و ضریب توان حالت راه اندازی را چند درصد تغییر می دهد ؟

حل :

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{\frac{۱}{۲}T_{em}}{T_{em}}$$
$$= \frac{۲}{\frac{s_{mT}}{۱} + \frac{۱}{s_{mT}}}$$
$$s_m^۲ - ۴s_{mT} + ۱ = ۰$$

یا :

$$s_{mT} = \frac{۴ \pm \sqrt{۴^۲ - ۴}}{۲}$$
$$= ۳/۷۳ \text{ یا } ۰/۲۷$$

مقدار بزرگتر ۳/۷۳ قابل قبول نیست لذا $s_{mT} = ۰/۲۷$ است . برای مقاومت ظاهری ناچیز استاتور از معادله (۲۵-۶) داریم :

$$\frac{r'_۲}{s_{mT}} = x_۲$$
$$r'_۲ = ۰/۲ \times ۰/۲۷ = ۰/۰۵۴\ \Omega$$

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

$$= r'_۲ - r_۲ = ۰/۰۵۴ - ۰/۰۴ = ۰/۰۱۴\ \Omega$$

بدون مقاومت خارجی :

$$I_{st} = \frac{V}{\sqrt{۰/۰۴^۲ + ۰/۲^۲}} = ۴/۹۰۳\ V$$

$$\text{ضریب توان} = \frac{۰/۰۴}{\sqrt{۰/۰۴^۲ + ۰/۲^۲}} = ۰/۱۹۶$$

با مقاومت خارجی :

$$I_{st} = \frac{V}{\sqrt{۰/۰۵۴^۲ + ۰/۲^۲}} = ۴/۸۲۷\ V$$

$$\text{ضریب توان} = \frac{۰/۰۵۴}{\sqrt{۰/۰۵۴^۲ + ۰/۲^۲}} = ۰/۲۶۱$$

درصد کاهش در جریان راه اندازی

$$\frac{۴/۹۰۳ - ۴/۸۲۷}{۴/۹۰۳} \times ۱۰۰ = ۱/۵۵\,\%$$

درصد اصلاح ضریب توان

$$\frac{۰/۲۶۱ - ۰/۱۹۶}{۰/۱۹۶} \times ۱۰۰ = ۳۳/۱۶\,\%$$

مثال ۶.۱۷

یک موتور القائی سه فاز با $\frac{r_۲}{x_۲} = ۰/۵$ دارای گشتاور راه اندازی ۲۵Nm است . با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور و جریان بی بار گشتاور راه اندازی را در حالتی که مقاومت مدار رتور در هر فاز الف دو برابر شود ب : نصف شود تعیین کنید .

حل :

با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور و جریان بی بار گشتاور راه اندازی از مدار معادل موتور القائی برابر است با :

$$T_{est} = \frac{۱}{\omega_s} \frac{۳V_۱^۲}{r_۲^۲ + x_۲^۲} r_۲$$
$$= ۲۵ \text{ - Nm}$$

با $\qquad x_۲ = ۲r_۲$ یا $\frac{r_۲}{x_۲} = ۰/۵$

$$T_{est} = \frac{۱}{\omega_s} \frac{۳V_۱^۲}{r_۲^۲ + ۴r_۲^۲} r_۲ = ۲۵$$

یا

$$\frac{۱}{\omega_s} \frac{۳V_۱^۲}{r_۲} = ۲۵ \times ۵ = ۱۲۵$$

الف : وقتی مقاومت مدار رتور دو برابر می شود گشتاور راه اندازی برابر است با :

$$T_{est} = \frac{۱}{\omega_s} \frac{۳V_۱^۲}{(۲r_۲^۲) + x_۲^۲} (۲r_۲)$$

اما :

$$x_۲ = r_۲$$

$$T_{est} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{4r_2^2 + r_2^2} (2r_2)$$

لذا :

یا :

$$T_{est} = \left(\frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{r_2} \right) \frac{1}{4}$$

$$= \frac{125}{4} = 31/25 \text{ Nm}$$

ب : وقتی مقاومت مدار رتور نصف می شود ، گشتاور راه اندازی چنین خواهد شد :

$$T_{est} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{(\frac{r_2}{2})^2 + x_2^2} (\frac{r_2}{2})$$

$$= \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{\frac{r_2^2}{4} + r_2^2} \cdot \frac{r_2}{2}$$

$$= \left(\frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{r_2} \right) \frac{2}{17}$$

$$= \frac{125 \times 2}{17} = 14/706 \text{ Nm}$$

مثال ۶.۱۸

یک موتور القائی سه فاز گشتاور راه اندازی ۱۵۰٪ و گشتاور حداکثر ۲۵۰٪ گشتاور بار کامل را دارد . با صرفنظر کردن از مقاومت استاتور و فرض ثابت بودن مقاومت رتور الف : لغزش در گشتاور حداکثر ب : لغزش بار کامل و ج : جریان رتور در راه اندازی بر حسب جریان بار کامل رتور را محاسبه کنید .

حل :

الف :

$$T_{est} = 1/5\, T_{efl} \qquad T_{em} = 2/5\, T_{efl}$$

از معادله (۳۳-۶)

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{s_{mT}}{1} + \frac{1}{s_{mT}}}$$

$$\frac{1/5}{2/5} = \frac{2s_{mT}}{s_{mT}^2 + 1}$$

$$s_{mT}^2 - 3/333\, s_{mT} + 1 = 0$$

یا .

از حل آن $s_{mT} = 0/333$

ب :

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{s_{fl}}{s_{mT}} + \frac{s_{mT}}{s_{fl}}}$$

یا :

$$\frac{1}{2/5} = \frac{2}{\frac{s_{fl}}{0/333} + \frac{0/333}{s_{fl}}}$$

$$s_{fl}^2 - 1/665\, s_{fl} + 0/111 = 0$$

که از حل آن $s_{fl} = 0/0695$ بدست می آید .

ج : از معادله (۱۳-۶)

$$T_{est} = \frac{1}{\omega_s} I_{2st}^2\, r_2$$

$$T_{efl} = \frac{1}{\omega_s} I_{2fl}^2 \frac{r_2}{s_{fl}}$$

$$\frac{T_{efl}}{T_{est}} = \left(\frac{I_{2st}}{I_{2fl}}\right)^2 s_{fl}$$

$$\left(\frac{I_{2st}}{I_{2fl}}\right)^2 = \frac{1/5}{0/0695}$$

$$I_{2st} = 4/646 I_{2fl}$$

مثال ۶.۱۹

در یک موتور القائی سه فاز ، مقاومت القائی پراکندگی چهار برابر مقاومت مدارهای استاتور و رتور است . اما مقاومت القائی پراکندگی استاتور مساوی مقاومت القائی پراکندگی رتور در حال سکون ارجاع شده به استاتور است . موتور گشتاور ۲۰۰Nm را در لغزش ۰/۰۴ تولید می کند ، گشتاورهای حداکثر و راه اندازی را حساب کنید . از جریان تحریک صرفنظر نمائید .

حل :

در این مسئله $x_1 = x_2 = 4r_1 = 4r_2$

در لغزش ۰/۰۴ گشتاور از معادله (۲۴b-۶) برابر است با :

$$T_e = ۲۰۰ = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{[\,(۱+\frac{۱}{۰/۰۴})^۲ + (۴+۴)^۲\,]\,r_۲} \cdot \frac{r_۲}{۰/۰۴}$$

یا :

$$\frac{۳V^۲}{\omega_s} = ۵۹۲۰$$

$$T_{est} = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{[(۱+۱)^۲ + (۴+۴)^۲]}$$

$$= ۵۹۲۰ \frac{۱}{۲۲+۸^۲} = ۸۷/۰۶ \text{ Nm}$$

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{\sqrt{r_۱^۲ + (x_۱ + x_۲)^۲}} = \frac{۱}{\sqrt{۱+۸^۲}} = ۰/۱۲۴$$

$$T_{em} = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{(۱+\frac{۱}{۰/۱۲۴})^۲ + ۸^۲} \times \frac{۱}{۰/۱۲۴}$$

$$= ۳۲۶/۶۳ \text{ Nm}$$

گشتاور حداکثر را نیز می توان از معادله (۶-۲۷) مستقیما" و بدون محاسبه s_{mT} بدست آورد . از این معادله :

$$T_{em} = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{۲\,[\,۱ + \sqrt{۱^۲ + ۸^۲}\,]}$$

$$= ۵۹۲۰ \frac{۱}{۲\,[\,۱ + \sqrt{۶۵}\,]} = ۳۲۶/۶۳ \text{ Nm}$$

مثال ۶.۲۰

یک موتور القائی سه فاز با رتور سیم پیچی شده در لغزش ۵٪ در گشتاور بار کامل در حالی که حلقه های لغزان آن اتصال کوتاه است کار می کند . اگر مقاومت مدار رتور با قراردادن مقاومت خارجی غیر القائی در مدار رتور به چهار برابر افزایش یابد ، در گشتاور بار کامل ، پارامترهای زیر را برحسب مقادیر قبلی آنها با مقاومت رتور $r_۲$ تعیین کنید .

الف : لغزش ب : جریان رتور ، تلفات مس رتور ، ضریب توان رتور و ج : توان خروجی

حل :

اندیس A برای مقادیر با مقاومت رتور $r_۲$ و اندیس B برای مقادیر با مقاومت $۴r_۲$ است .

الف : از معادله (۶-۳۰)

$$T_e = \frac{sK_t}{r_۲}$$

$$T_{eA} = \frac{۰/۰۵K_t}{r_۲}$$

$$T_{eB} = \frac{s_BK_t}{۴r_۲}$$

$$\frac{T_{eB}}{T_{eA}} = ۱ = \frac{s_BK_t}{۴r_۲} \cdot \frac{r_۲}{۰/۰۵K_t} = \frac{s_B}{۰/۲}$$

$$s_B = ۰/۲$$

چون $s_A = ۰/۵$ است لذا :

$$s_B = ۴s_A$$

ب : از معادله (۶-۲۹)

$$I_۲ = \frac{sV}{r_۲}$$

$$I_{۲A} = \frac{۰/۰۵V}{r_۲}$$

$$I_{۲B} = \frac{۰/۲V}{۴r_۲}$$

و :

$$\frac{I_{۲B}}{I_{۲A}} = \frac{۰/۲V}{۴r_۲} \cdot \frac{r_۲}{۰/۰۵V} = ۱$$

$$I_{۲B} = I_{۲A}$$

لذا جریان رتور در $۴r_۲$ مشابه $I_{۲A}$ با مقاومت رتور $r_۲$ است .

تلفات مس رتور $= I_{۲B}^۲ (۴r_۲) = (I_{۲A}^۲ \, ۴r_۲)$

تلفات مس قبلی $\times ۴ = ۴\, I_{۲A}^۲ r_۲ =$

ضریب توان رتور

$$(\cos\theta)_B = \frac{۴r_۲}{\sqrt{(۴r_۲)^۲ + (s_Bx_۲)^۲}}$$

$$= \frac{۴r_۲}{\sqrt{(۴r_۲)^۲ + (۴s_A x_۲)^۲}}$$

$$= \frac{r_۲}{\sqrt{r_۲^۲ + (s_A x_۲)^۲}} = (\cos\theta)_A$$

که ثابت می کند ضریب توان رتور در گشتاور بار کامل وقتی مقاومت رتور از $r_۲$ به $۴r_۲$ تغییر کند بدون تغییر می ماند.

ج:

سرعت $\omega_s = (۱ - s_A)\omega_s = ۰/۹۵\ \omega_s$

قدرت خروجی $P_A = T_{eA}\,\omega_A = ۰/۱۹۵\,\omega_s\,T_{eA}$

$\omega_s\,T_{eA} = P_A / ۰/۹۵$

حال $s_B = ۰/۲$ و $\omega_B = (۱ - s_B)\omega_s = ۰/۸\,\omega_s$

$P_B = T_{eB}\,\omega_B = T_{eA} \times ۰/۸\ \omega_s$

$T_{eA} = T_{eB}$

$= ۰/۸\,(\omega_s\,T_{eA}) = \frac{۰/۸P_A}{۰/۹۵}$

$P_B = ۰/۸۴۲\ P_A$

بنابراین قدرت خروجی با $۴r_۲$ از P_A به $۰/۸۴۲P_A$ کاهش می یابد.

مثال ۶.۲۱

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz، ۶ قطب دارای قدرت خروجی محور ۱۰kW در ۹۳۰ دور بر دقیقه است. تلفات اصطکاک و مالش هوا ۱٪ توان خروجی است. تلفات کل استاتور ۶۰۰W است.

الف: توان ورودی رتور و توان ورودی استاتور را تعیین کنید.

ب: اگر گشتاور حداکثر در سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه تولید شود، گشتاور راه اندازی را با ولتاژ نامی راه اندازی محاسبه کنید.

حل:

الف: لغزش بار کامل:

تلفات اصطکاک و مالش هوا: $= \frac{۱۰۰۰ - ۹۳۰}{۱۰۰۰} = ۰/۰۷$

$= ۱۰۰۰۰ \times \frac{۱}{۱۰۰} = ۱۰۰\ W$

قدرت مکانیکی تولیدی:

$P_m = ۱۰۰۰۰ + ۱۰۰ = ۱۰۱۰۰\ W$

توان ورودی رتور $P_g = P_m / (۱ - s) = ۱۰۱۰۰ / ۰/۹۳$

$= ۱۰۸۶۰/۲\ W$

توان ورودی استاتور = P_g + تلفات کل استاتور

$= ۱۰۸۶۰/۲ + ۶۰۰ = ۱۱۴۶/۰۲\ W$

ب:

$s_{mT} = \frac{۱۰۰۰ - ۸۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۲$

$T_{efl} = \frac{P}{\omega_s} = \frac{۱۰۸۶۰/۲ \times ۶۰}{۲\pi \times ۱۰۰۰} = ۱۰۳/۷۱\ Nm$

$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۰/۲}{۰/۰۷} + \frac{۰/۰۷}{۰/۲}}$

$T_{em} = ۱/۶۰۴\ T_{efl}$

$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۰/۲}{۱} \div \frac{۱}{۰/۲}}$

$T_{est} = \frac{۲}{۵/۲} \times ۱/۶۰۴ \times ۱۰۳/۷۱$

$= ۶۳/۹۸۱\ Nm$

مثال ۶.۲۲

یک موتور القائی قفس سنجابی سه فاز ۷/۵ kW، ۴۲۰ V با اتصال ستاره ۵۰Hz، ۴ قطب گشتاور بار کامل را در لغزش ۴٪ در ولتاژ و فرکانس نامی تولید می کند. از تلفات اصطکاک و مالش هوا و تلفات هسته صرفنظر می شود. ماشین دارای مقاومتهای ظاهری زیر است:

$r_۱ = ۱/۲\ \Omega$ $\quad x_۱ = x_۲ = ۱/۴\ \Omega$ $\quad X_m = ۳۸/۶\ \Omega$

گشتاور حداکثر را در ولتاژ و فرکانس نامی و لغزشی که در آن اتفاق می افتد تعیین کنید. گشتاور راه اندازی را نیز محاسبه کنید.

حل :

پارامترهای مدار معادل تونن طبق شکل (a) ۱۷-۶ چنین اند :

$$R_e = \frac{۱/۲ \times ۳۸/۶}{۳۸/۶ + ۱/۴} = ۱/۱۵۸\,\Omega$$

$$X_e = \frac{۱/۴ \times ۳۸/۶}{۴۰} = ۱/۳۵۱\,\Omega$$

$$V_e = \frac{۴۲۰}{\sqrt{۳}} \cdot \frac{۳۸/۶}{۴۰} = ۲۳۴\,V$$

چون تلفات اصطکاک و مالش هوا و تلفات هسته ناچیزند ، قدرت مکانیکی تولید برابر است با :

$$P_m = ۷۵۰۰\ W$$

$$P_m = ۳\,(۱ - s)\,P_g$$

$$= ۳\,(۱ - s)\,\frac{I_۲^۲ r_۲}{s}$$

$$I_۲ = \frac{sV_e}{r_۲}$$

از معادله (۲۹-۶)

$$P_m = ۳\,(۱ - s)\,\frac{s^۲ V_۲^۲}{r_۲} \cdot \frac{r_۲}{s}$$

$$۷۵۰۰ = ۳\,(۱ - s)\,\frac{sV_e^۲}{r_۲}$$

$$r_۲ = \frac{۳(۰/۹۶)\,(۰/۰۴)\,(۲۳۴)^۲}{۷۵۰۰} = ۰/۸۴۱\,\Omega$$

لغزشی که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد با معادله (۲۶-۶) به صورت زیر است :

$$s_{mT} = \frac{۰/۸۴۱}{\sqrt{۱/۱۵۸^۲ + (۱/۳۵۱ + ۱/۴)^۲}} = ۰/۲۸۲$$

از معادله (۲۷-۶)

$$T_{em} = \frac{۳ \times ۲۳۴^۲}{۵۰\pi} \cdot \frac{۱}{۲} \left[\frac{۱}{۱/۱۵۸ + \sqrt{۱/۱۵۸^۲ + ۲/۷۵۱^۲}} \right]$$

$$= ۱۲۶/۲۱\ Nm$$

از معادله (۲۸-۶)

$$T_{est} = \frac{۳ \times ۲۳۴^۲}{۵۰\pi} \cdot \frac{۰/۸۴۱}{۱/۹۹۹۲ + ۲/۷۵۱^۲} = ۷۶/۰۵\ Nm$$

مثال ۶.۲۳

یک موتور القائی سه فاز ۱۰۰ kW ، ۴۲۰V ، ۶ قطب و ۵۰Hz با رتور سیم پیچی شده در حال اتصال کوتاه سیم پیچی رتور لغزش بارکامل ۰/۰۴ داشته و لغزش نظیر گشتاور حداکثر ۰/۲ در هنگام کار با ولتاژ و فرکانس نامی است . با صرفنظر کردن از مقاومت استاتور وتلفات گردشی الف : گشتاور حداکثر ب : گشتاور راه اندازی ج : تلفات مس رتور در بار کامل را پیدا کنید .

مقاومت رتور با اضافه کردن مقاومت سری خارجی دو برابر می شود . د : لغزش در توان خروجی بارکامل ه : گشتاور بارکامل ز : لغزش در گشتاور حداکثر را تعیین کنید .

حل :

الف : با صرفنظر کردن از تلفات گردشی توان مکانیکی تولیدی ۱۰۰kW است بنابراین

$$P_m = ۱۰۰kW$$

$$P_g = P_m /(۱ - s_{fl}) = \frac{۱۰۰}{۰/۹۶}\ kW$$

سرعت سنکرون

$$\omega_s = \frac{۴\pi f}{p} = \frac{۴\pi \times ۵۰}{۶} = \frac{۱۰۰\pi}{۳}\ rad/sec$$

$$T_{efl} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{۱۰۰۰۰۰ \times ۳}{۰/۹۶ \times ۱۰۰\pi} = ۹۹۴/۷۲\ Nm$$

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۰/۲}{۰/۰۴} + \frac{۰/۰۴}{۰/۲}}$$

یا :

$$T_{em} = ۲/۶\ T_{efl} = ۲/۶ \times ۹۹۴/۷۲$$

$$= ۲۵۸۶/۲۷۲\ Nm$$

ب :

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۱}{۰/۲} + \frac{۰/۲}{۱}} = \frac{۲}{۵/۲}$$

$$T_{est} = \frac{۲}{۵/۲} \times ۲۵۸۶/۲۷۲ = ۹۹۴/۷۲ \text{ Nm}$$

ج : تلفات مس رتور $= sP_g = ۰/۰۴ \times \frac{۱۰۰}{۰/۹۶} = ۴/۱۶۷ \text{ kW}$

د : از معادله (۶-۳۰a) توان خروجی بارکامل برابر است با :

$$T_e\,\omega_r = \frac{۳V^۲ s}{r_۲}(۱-s)$$

$$= \frac{۳V^۲ \times ۰/۰۴ \times ۰/۹۶}{r_۲} \quad (۱)$$

وقتی مقاومت رتور دو برابر می شود ، توان خروجی بارکامل برابر است :

$$\frac{۳V^۲ s_۱}{۲r_۲}(۱-s_۱) \quad (۲)$$

از معادله (۱) و (۲) برای همان توان خروجی بارکامل داریم :

$$\frac{۳V^۲}{r_۲} \times ۰/۰۴ \times ۰/۹۶ = \frac{۳V^۲}{۲r_۲} s_۱ (۱-s_۱)$$

$$s_۱^۲ - s_۱ + ۰/۰۷۶۸ = ۰$$

از حل آن $s_۱ = ۰/۰۸۳۸$

ه:

$$T_{efl} = \frac{۱۰۰۰۰۰ \times ۳}{(۱ - ۰/۰۸۳۸) \times ۱۰۰\pi} = ۱۰۴۲/۲۷ \text{ Nm}$$

و : با مقاومت رتور $r_۲$

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{X} = ۰/۲$$

با مقاومت رتور $۲r_۲$

$$s_{mT۱} = \frac{۲r_۲}{X} = ۲ \times ۰/۲ = ۰/۴$$

مثال ۶.۲۴

رتور موتور القائی سه فاز با حلقه های لغزان با دو برابر تعداد هادیها با سطح مقطع نصف تجدید سیم پیچی شده است . آرایش و ضریب فضای سیم پیچی جدید و قدیم معادلند .اثر این تغییر را بر پارامترهای مختلف ، مشخصه هار عملکرد موتور بحث کنید . از مقاومت ظاهری استاتور صرفنظر کنید.

حل :

مقاومت رتور :

$$r_۲ = \frac{\rho L}{A}$$

با سیم پیچی جدید :

$$r'_۲ = \frac{\rho\,(۲L)}{A} = \frac{۴\rho L}{A} = ۴r_۲$$

مقاومت القائی پراکندگی $\propto$ (تعداد دور)^۲

$$x_۲ \propto N_{ph}^۲$$

در سیم پیچی جدید :

$$x'_۲ \propto (۲N_{ph})^۲$$

$$\frac{x'_۲}{x_۲} = ۴ \Rightarrow x'_۲ = ۴x_۲$$

لغزش نظیر گشتاور حداکثر :

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{x_۲}$$

با سیم پیچی جدید :

$$s_{mT۱} = \frac{۴s_۲}{۴x_۲} = s_{mT}$$

لذا لغزشی که در آن گشتاور حداکثر اتفاق می افتد بدون تغییر می ماند . جریان راه اندازی با سیم پیچی جدید :

$$I'_{۲st} = \frac{۲E_۲}{۴\sqrt{r_۲^۲ + x_۲^۲}} = \frac{I_{۲st}}{۲}$$

$$T_{est} = I_{۲st}^۲ r_۲$$

با سیم پیچی جدید :

$$T'_{est} = (I_{۲st}/۲)^۲ \times ۴r_۲ = T_{est}$$

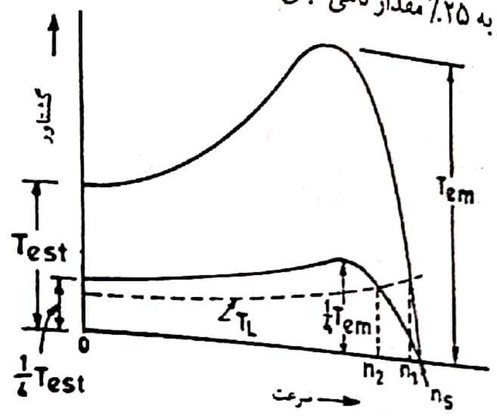
$$T_{em} = \frac{۳E_۲^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{۲x_۲}$$

با سیم پیچی جدید :

$$T'_{em} = \frac{۳(۲E_۲)^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۱}{۲(۴x_۲)} = T_{em}$$

دیده می شود که گشتاور راه اندازی و گشتاور حداکثر بدون تغییر می مانند در صورتی که سیم پیچی رتور تغییر نکند و ولتاژ ورودی نصف شود گشتاور راه اندازی و گشتاور حداکثر به ۲۵٪ مقادیر اولیه شان کاهش می یابد . در اینصورت برای گشتاور بار T_L که در شکل

(۲۱-۶) نشان داده شد . سرعت کار از n_1 به n_2 افت می کند . بازده رتور کاهش یافته و قدرت نامی موتور به ۲۵٪ مقدار نامی قبلی کاهش یافته است .



شکل ۲۱-۶: مربوط به مثال ۲۴-۶

مثال ۶.۲۵

یک موتور القائی سه فاز ۱۰ قطب ۵۰Hz با رتور سیم پیچی شده به عنوان تغییر دهنده فرکانس به کار می رود . این موتور القائی توسط موتور جریان مستقیم با سرعت قابل تنظیم می چرخد . قدرت خروجی گرفته شده از حلقه های لغزان رتور ۴۸kW با ضریب توان ۰/۸ پس فاز است و در حدود فرکانس خروجی ۱۲۰ تا ۳۰۰Hz ثابت می ماند . اگر از تمام تلفات ماشین افت مقاومت ظاهری پراکندگی و جریان تحریک صرفنظر شود مطلوبست محاسبه :

الف : حدود سرعت موتور dc

ب : kVA نامی استاتور موتور القائی

ج : قدرت نامی موتور جریان مستقیم و گشتاور حداکثر آن

اگر سرعت حداکثر به ۲۷۰۰ r.p.m محدود شود مطلوبست محاسبه :

د : تعداد قطبهای ماشین القائی و

ه : حدود سرعت جدید موتور جریان مستقیم

حل :

الف : سرعت میدان استاتور :

$$= \frac{۱۲۰f}{p} = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۱۰} = ۶۰۰ \text{ r.p.m}$$

برای بدست آوردن فرکانسهای بزرگتر از فرکانس استاتور ، رتور باید بر خلاف جهت میدان استاتور بچرخد . بنابراین سرعت رتور N_r r.p.m است . سرعت نسبی بین میدان

استاتور و رتور N_r r.p.m + ۶۰۰ است . با توجه به این نکته فرکانس رتور طبق معادله (۶-۶a) چنین خواهد بود :

$$\frac{p(۶۰۰ + N_r)}{۱۲۰} = f_r$$

برای $f_r = ۱۲۰$ Hz

$$\frac{۱۰(۶۰۰ + N_r)}{۱۲۰} = ۱۲۰ \text{ Hz}$$

$$N_r = ۸۴۰ \text{ r.p.m}$$

$$f_r = ۳۰۰ \text{ Hz}$$

برای

$$\frac{۱۰(۶۰۰ + N_r)}{۱۲۰} = ۲۰۰ \text{ Hz}$$

$$N_r = ۳۰۰۰ \text{ r.p.m}$$

لذا حدود سرعت موتور جریان مستقیم از ۸۴۰ تا ۳۰۰۰ r.p.m است .

ب و ج :

در حال سکون ولتاژ نامی فاز رتور را V_r و جریان خروجی رتور بعنوان تغییر دهنده فرکانس I_r است . چون از افت مقاومت ظاهری پراکندگی ، جریان تحریک و تمام تلفات صرفنظر شده است ، توان خروجی الکتریکی هر فاز V_rI_r از رتور معادل توان ورودی الکتریکی هر فاز از استاتور به رتور است یعنی :

ولت آمپر هر فاز استاتور V_1I_1 = ولت آمپر هر فاز رتور V_rI_r همانند ترانسفورماتور . با شروع گردش رتور ولتاژ هر فاز رتور sV_r شده و توان خروجی فاز به ولت آمپر sV_rI_r خواهد شد .

در تغییر دهنده فرکانس لغزش s بزرگتر از ۱ است و لذا sV_rI_r بزرگتر از ولت آمپر تغذیه شده استاتور می باشد . طبیعتاً بقیه قدرت یعنی $(sV_rI_r - V_1I_1)\cos\theta$ باید بوسیله موتور جریان مستقیم تامین شود .

$$= \text{قدرت تامین شده توسط موتور جریان مستقیم} = (sV_rI_r - V_1I_1)\cos\theta$$

$$= (s - ۱)\ V_1I_1\ \cos\theta \quad \text{W}$$

این عبارت نشان می دهد که قدرت الکتریکی خروجی از حلقه های لغزان رتور بدو صورت تولید می شود :

(۱) به صورت الکتریکی از استاتور به رتور با عمل ترانسفورماتوری و

(۲) به صورت مکانیکی از محور موتور جریان مستقیم.

$N_r = ۸۴۰$ r.p.m

لغزش $s_۱ = \frac{۸۴۰ + ۶۰۰}{۶۰۰} = ۲/۴$

و برای : $N_r = ۳۰۰۰$ r.p.m

لغزش $s_۲ = \frac{۳۰۰۰ + ۶۰۰}{۶۰۰} = ۶$

kVA خروجی رتور: $۳sV_۱I_۱ = \frac{۴۸}{۰/۸} = ۶۰$ kVA

kVA نامی استاتور: $۳V_۱I_۱ = \frac{۶۰}{s} = \frac{۶۰}{۲/۴}$ یا $\frac{۶۰}{۶}$ kVA

$= ۲۵$ kVA یا ۱۰ kVA

از آنجاکه استاتور باید بتواند kVA بزرگتری راتامین کند kVA نامی ۲۵kVA است .

قدرت نامی موتور جریان مستقیم $= (s - ۱)\, V_۱I_۱ \cos\theta$

$= (۲/۴ - ۱)(۲۵ \times ۰/۸)$ kW

$= (۶ - ۱)۱۰ \times ۰/۸$ kW

$= ۲۸$ kW یا ۴۰ kW

توان نامی موتور جریان مستقیم ۴۰kW است .

گشتاور خروجی موتور جریان مستقیم :

$= \frac{۲۸۰۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۸۴۰}$ یا $\frac{۴۰۰۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۳۰۰۰}$

$= ۳۱۸/۳$ Nm یا ۱۲۷/۳ Nm

گشتاور حداکثر خروجی از موتور d.c ۳۱۸/۳ Nm است .

د : وقتی سرعت حداکثر به ۲۷۰۰ r.p.m محدود می شود ، تعداد قطبهای ماشین القائی $p_۱$ است و سرعت میدان استاتور :

$= \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{p_۱}$ r.p.m

خواهد بود . سرعت نسبی میدان استاتور و هادیهای رتور :

از معادله (۶-۶a) $\left(\frac{۱۲۰ \times ۵۰}{p_۱} + ۲۷۰۰\right)$ r.p.m

$$\frac{p_۱\left(\frac{۱۲۰ \times ۵۰}{p_۱} + ۲۷۰۰\right)}{۱۲۰} = ۳۰۰ \text{ Hz}$$

$$p_۱ = \frac{۳۰۰۰۰}{۲۷۰۰} = ۱۱\frac{۱}{۹}$$

اما $p_۱$ نمی تواند کسری باشد و لذا با ۱۲ باشد (عدد زوج بالاتر)

ه: سرعت حداکثر موتور d.c

$$\frac{۱۲\left(\frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۱۲} + N_{r۱}\right)}{۱۲۰} = ۳۰۰$$

$N_{r۱} = ۲۵۰۰$ r.p.m

سرعت حداقل موتور d.c :

$$\frac{۱۲\left(\frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۱۲۰} + N_{r۲}\right)}{۱۲۰} = ۱۲۰$$

$N_{r۲} = ۷۰۰$ r.p.m

بنابراین حدود سرعت جدید موتور جریان مستقیم از ۷۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه است .

توجه کنید که نسبت سرعت حداکثر به سرعت حداقل در هر دو حالت یکی است :

$$\frac{۳۰۰۰}{۸۴۰} = \frac{۲۵۰۰}{۷۰۰}$$

مثال ۶.۲۶

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz چهار قطب دارای قدرت خروجی نامی ۱۰kW در سرعت ۱۴۲۵r.p.m است . گشتاور حداکثر آن در ۱۲۰۰r.p.m تولید می شود . گشتاور راه اندازی را محاسبه کنید . از مقاومت استاتور و تلفات گردشی صرفنظر نمائید .

حل :

لغزش $s = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۲۵}{۱۵۰۰} = ۰/۰۵$

چون از تلفات گردشی صرفنظر شده توان خروجی ۱۰kW مساوی توان تولیدی P_m است .

گشتاورالکترومغناطیسی $T_e = \frac{P_m}{\omega_s(۱ - s)}$

$$T_{efl} = \frac{۱۰۰۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۱۵۰۰(۱ - ٪۵)} = ۶۷/۰۱۳ \text{Nm}$$

لغزش در گشتاور حداکثر چنین است :

$$s_{mT} = \frac{۱۵۰۰ - ۱۲۰۰}{۱۵۰۰} = ۰/۲$$

اگر s لغزش بار کامل باشد

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{۶۷/۰۱۳}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۰/۰۵}{۰/۲} + \frac{۰/۲}{۰/۰۵}}$$

$$T_{em} = ۱۴۲/۴۰۳ \text{ Nm}$$

برای بدست آوردن گشتاور راه اندازی داریم :

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{۲}{\frac{۱}{s_{mT}} + \frac{s_{mT}}{۱}} = \frac{۲}{\frac{۱}{۰/۲} + \frac{۰/۲}{۱}} = ۰/۳۸۴۶$$

$$T_{est} = ۰/۳۸۴۶ \times ۱۴۲/۴۰۳ = ۵۴/۷۶۸۲ \text{ Nm}$$

مثال ۶.۲۷

یک موتور القائی وقتی از منبع سه فاز ۴۰۰V و ۵۰Hz تغذیه می شود در فرکانس لغزش ۲Hz کار می کند . برای همان گشتاور تولیدی فرکانس لغزش را وقتی با منبع سه فاز ۳۴۰V و ۴۰Hz کار می کند پیدا کنید . لغزشی که در آن ماشین حداکثر گشتاور را در فرکانس ۵۰Hz تولید می کند ۰/۱ است . از مقاومت ظاهری استاتور صرفنظرکرده و مشخصه گشتاور لغزش را بین گشتاور صفر و حداکثر در منطقه کار خطی فرض کنید .

حل :

با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور ، گشتاور حداکثر در موتور القائی سه فاز برابر است با :

$$T_{em} = \frac{۳}{\omega_s} \frac{V^۲}{۲x_۲}$$

برای منبع ۴۰۰V $s_{mT} = ۰/۱$

وقتی $f = ۵۰Hz$ $\frac{r_۲}{X_۲} = s_{mT} = ۰/۱ \propto \frac{r_۲}{۵۰}$

برای $f = ۴۰Hz$ $s_{mT} \propto \frac{r_۲}{۴۰}$ از این روابط :

گشتاور حداکثر :

$$s_{mT۱} = \frac{۵۰}{۴۰} \times ۰/۱ = ۰/۱۲۵$$

$$T_{em} = \frac{۳}{\omega_s} \frac{V^۲}{۲x_۲} = \frac{۳P}{۴\pi f} = \frac{V^۲}{۲(۲\pi f l_۲)}$$

$$T_{em} = \propto \frac{V^۲}{f^۲}$$

چون مشخصه گشتاور – لغزش بین گشتاور صفر و حداکثر خطی است گشتاور تولیدی T_{ed} در لغزش ۰/۰۴ چنین است :

$$T_{ed} = \frac{T_{em}}{s_{mT}} \times ۰/۰۴ \propto (\frac{۴۰۰}{۵۰})^۲ \times \frac{۰/۰۴}{۰/۱} \quad (۱)$$

برای ۳۴۰V و ۵۰Hz

$$T_{ed} \propto (\frac{۳۴۰}{۴۰})^۲ \times \frac{s}{۰/۱۲۵} \quad (۲)$$

برای همان گشتاور تولیدی از معادلات ۱ و ۲ داریم :

$$(\frac{۴۰۰}{۵۰})^۲ \times \frac{۰/۰۴}{۰/۱} = (\frac{۳۴۰}{۴۰})^۲ \times \frac{s}{۰/۱۲۵}$$

$s = ۰/۰۴۴۳$ مقدار جدید لغزش

$sf = ۰/۰۴۴۳ \times ۴۰ = ۱/۷۷۲ \text{ Hz}$ فرکانس لغزش

مثال ۶.۲۸

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz و ۴۴۰V ، ۴ قطب در سرعت ۱۴۹۰r.p.m نصف گشتاور نامی را تولید می کند . با ثابت نگهداشت ولتاژ اعمال شده در مقدار نامی اگر موتور همان گشتاور رادر ۱۶۰۰r.p.m تولیدکند فرکانس آن چقدر خواهدبود؟ از مقاومت سیم‌پیچی های استاتور و رتور و همچنین راکتانس های پراکندگی و تلفات آهن صرفنظر کنید .

لغزش $s = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۹۰}{۱۵۰۰} = \frac{۱}{۱۵۰}$

$$T_e = \frac{۳}{\omega_s} = \frac{V^۲}{(\frac{r_۲}{s} + r_۱)^۲ + (x_۱ + x_۲)^۲} \times \frac{r_۲}{s}$$

با صرفنظر کردن از مقاومتها و راکتانسهای پراکندگی

$$T_e \propto \frac{۳}{f} \frac{V^۲}{r_۲} s$$

$$T_e \propto \frac{۳}{۵۰} \frac{۴۴۰^۲}{r_۲} . \frac{۱}{۱۵۰} \quad (۱)$$

همچنین

$$T_e \propto \frac{۳}{f} \frac{۴۴۰^۲}{r_۲} . s \quad (۲)$$

برای همان گشتاور از معادلات ۱ و ۲ داریم :

$$\frac{۳}{f}\frac{۴۴۰^۲}{r_۲}.s = \frac{۳}{۵۰}\frac{۴۴۰^۲}{r_۲}\frac{۱}{۱۵۰}$$

$$\frac{s}{f} = \frac{۱}{\sqrt{۵۰۰}} \qquad (۳)$$

سرعت سنکرون $N_s = \frac{۱۲۰f}{۴} = ۳۰f$

لغزش $s = \frac{۳۰f - ۱۶۰۰}{۳۰f}$

از جانشین کردن مقدار s از معادله ۳ داریم :

$$\frac{۳۰f - ۱۶۰۰}{۳۰f}\frac{۱}{f} = \frac{۱}{\sqrt{۵۰۰}}$$
$$f^۲ - ۷۵۰۰f - ۴۰۰۰۰۰ = ۰$$

از حل آن $f = ۵۳/۷Hz$ بدست می آید .

مثال ۶.۲۹

اطلاعات زیر مربوط به موتور القائی سه فاز ۱۲ قطب ۴۲۰V و ۵۰Hz با اتصال مثلث است .

$r_۱ = ۲/۹۵\ \Omega/ph \quad x_۱ = ۶/۸۲\ \Omega/ph \quad r'_۲ = ۲/۰۸\ \Omega/ph \quad x'_۲ = ۴/۱۱\ \Omega/ph$

در حالت بی بار جریان مغناطیس کننده خطی ۶/۷A و تلفات کل هسته آن ۲۶۹W است . ضریب توان ، جریان ورودی جریان معادل رتور و گشتاور تولیدی موتور را در لغزش ۳٪ با استفاده از مدار معادل دقیق تعیین کنید . گشتاور حداکثر تولیدی و سرعت متناظر را تعیین کنید .

حل :

مدار معادل در حالت بی بار در شکل ۶-۲۲(a) نشان داده شده است .

جریان مغناطیس کننده هر فاز :

$$I_\phi = \frac{۶۱V}{\sqrt{۲}} = ۳/۸۷\ A$$

$$V_۱ = E_۱ + I_\phi (r_۱ + jx_۱)$$

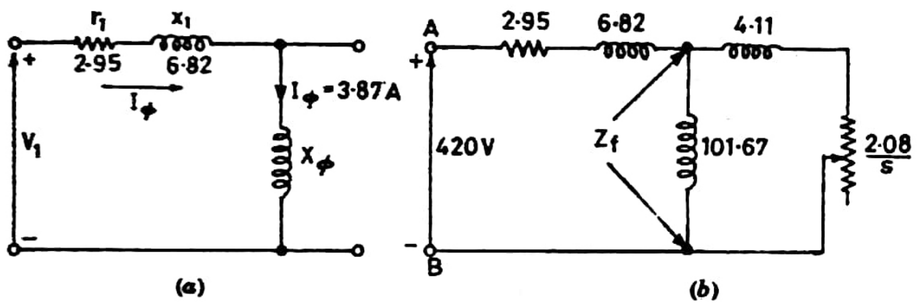
I_ϕ نسبت به $E_۱$ ۹۰° عقب است با قرار دادن $E_۱$ به عنوان مبنا:

$$V_۱ = E_۱ - j۳/۸۷\ (۲/۹۵ - j۶/۸۲)$$
$$= E_۱ - j۱۱/۴۱۷ + ۲۶/۴$$
$$V_۱^۲ = (E_۱ - ۲۶/۴)^۲ + ۱۱/۴۱۷^۲$$

$$۴۲۰^۲ = E_۱^۲ + ۵۲/۸E_۱ + ۶۹۷ + ۱۳۰/۳۵$$
$$E_۱^۲ + ۵۲/۸E_۱ - ۱۷۵۵۷۲/۶۵ = ۰$$

از حل آن : $E_۱ = ۳۹۳/۴۵\ V$

راکتانس مغناطیس کننده $X_\phi = \frac{۳۹۳/۴۵}{۳/۸۷} = ۱۰۱/۶۷\ \Omega$



شکل ۲۲-۶: مربوط به مثال ۲۹-۶

مدار معادل دقیق در شکل ۶-۲۲(b) نمایش داده شده است از این مدار :

$$Z_f = \frac{(\frac{۲/۰۸}{۰/۰۳} + j۴/۱۱)\ (j۱۰۱/۶۷)}{(۶۹/۳۳ + j۱۰۵/۷۸)}$$

$$= \frac{۶۹/۴۵۲\angle ۳/۴° \times ۱۰۱/۶۷\angle ۹۰°}{۱۲۶/۴۸۴\angle ۵۶/۷۶۱°}$$
$$= ۵۵/۸۳\angle ۳۶/۶۴°$$

$$R_f + jX_f = ۴۴/۸ + j۳۳/۳۲$$

$$r_۱ + jx_۱ = ۲/۹۵ + j۶/۸۲$$

$$Z_{AB} = ۴۷/۷۵ + j۴۰/۱۴ = ۶۲/۳۸\angle ۴۰/۰۵°$$

جریان ورودی $I_۱ = \frac{۴۲۰\angle ۰}{۶۲/۳۸\angle ۴۰/۰۵} = ۶/۷۳۳\angle -۴۰/۰۵°$

ضریب توان پس فاز $= \cos ۴۰/۰۵ = ۰/۷۶۵$

جریان معادل رتور

$$I_۲ = I_۱ \frac{jX_\phi}{\frac{r_۲}{s} + j(x_۲ + X_\phi)}$$

$$= ۶/۷۳۳\angle -۴۰/۰۵° \times \frac{j۱۰۱/۶۸}{۶۹/۳۳ + j۱۰۵/۷۸}$$

$$= ۶/۷۳۳ \angle -۴۰/۰۵° \times \frac{۱۰۱/۶۸ \angle ۹۰°}{۱۲۶/۴۸۴ \angle ۵۶/۷۶۱°}$$

$$= ۵/۴۱۳ \angle -۶/۸۱۱°$$

گشتاور :

$$= ۳\frac{I_۱^۲ R_f}{\omega_s} = \frac{۳ \times ۶۰}{۲\pi \times ۵۰۰} \times (۶/۷۳۳)^۲ \times ۴۴/۸$$

$$= ۱۱۶/۳۶۴ \text{ Nm}$$

گشتاور حداکثر را می توان بسادگی با استفاده از مدار معادل تونن بدست آورد :

$$X_۱ = x_۱ + x_\phi = ۶/۸۲ + ۱۰۱/۶۷ = ۱۰۸/۴۹\Omega$$

$$R_e = \frac{r_۱ X_\phi}{X_۱} = \frac{۲/۹۵ \times ۱۰۱/۶۷}{۱۰۸/۴۹} = ۲/۷۶۵\Omega$$

$$X_e = \frac{x_۱ X_\phi}{X_۱} = \frac{۶/۸۲ \times ۱۰۱/۶۷}{۱۰۸/۴۹} = ۶/۴\ \Omega$$

لغزش نظیر گشتاور حداکثر :

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{\sqrt{R_e^۲ + (x_۲ + x_e)^۲}}$$

$$= \frac{۲/۰۸}{[۲/۷۶۵^۲ + (۴/۱۱ + ۶/۴)^۲]^{۱/۲}} = ۰/۱۹۱۴$$

سرعت در گشتاور حداکثر :

$$= ۵۰۰ (۱ - ۰/۱۹۱۴) = ۴۰۴/۳ \text{ r.p.m}$$

$$\text{گشتاور حداکثر } T_{em} = \frac{۳V_e^۲}{۲\pi n_s} \times \frac{۱}{۲[R_e + \sqrt{R_e^۲ + (x_۲ + x_e)^۲}}$$

$$= \frac{۳ \times ۶۰}{۲\pi \times ۵۰۰} \times \frac{۱}{۲[۲/۷۶۵ + \sqrt{۲/۷۶۵^۲ + (۴/۱۱ + ۶/۴)^۲}}$$

$$= ۳۲۵/۵۵ \text{ Nm}$$

مثال ۶.۳۰

یک موتور القائی ۱۰kW ، ۵۰Hz سه فاز گشتاور نامی را در ۱۴۰۰r.p.m تولید می کند . در حالتی که گشتاور بار به نصف می رسد سرعت موتور و توان خروجی را پیدا کنید . مشخصه گشتاور - لغزش را در حدود کار خطی فرض کنید .

حل :

$$\text{لغزش } s = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۵۰۰} = ۰/۰۴$$

برای مشخصه گشتاور لغزش خطی از معادله (۶-۳۰a) :

$$T_e = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{s}{r_۲}$$

چون V ، ω_s و $r_۲$ ثابتند :

$$T_e \propto ۰/۰۴$$

$$\frac{۱}{۲} T_e \propto s_۱$$

$$\frac{\frac{۱}{۲} T_e}{T_e} = \frac{s_۱}{۰/۰۴} \quad \text{یا} \quad s_۱ = \frac{۱}{۲} \times ۰/۰۴ = ۰/۰۲$$

سرعت موتور = ۱۵۰۰ (۱ - ۰/۰۲) = ۱۴۷۰ r.p.m

گشتاور نامی = $\frac{۱۰۰۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۱۴۶۰}$ Nm

توان خروجی در نصف گشتاور نامی = $\frac{۱}{۲} \frac{۱۰۰۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۱۴۶۰} \times \frac{۲\pi \times ۱۴۶۰}{۶۰} = ۵/۰۳۴$ kW

مثال ۶.۳۱

یک موتور القائی سه فاز ۱۴۵۵r.p.m بار با گشتاور ثابت را می چرخاند . در حالتی که ولتاژ منبع به ٪۹۰ افت می کند سرعت موتور و تلفات آن چه می شود ؟ مشخصه گشتاور - لغزش را در حدود کار خطی بگیرید .

حل :

$$\text{لغزش } s_۱ = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۵۵}{۱۵۰۰} = ۰/۰۳$$

از معادله ۶-۳۰a

$$T_e = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{s_۱}{r_۲}$$

برای همان گشتاور بار :

$$T_e = \frac{۳V^۲}{\omega_s} \cdot \frac{۰/۰۳}{r_۲} = \frac{۳(۰/۹V)^۲}{\omega_s} \cdot \frac{s_۲}{r_۲}$$

$$s_۲ = \frac{۰/۰۳}{۰/۸۱} = ۰/۰۳۷$$

سرعت موتور = ۱۵۰۰ (۱ - ۰/۰۳۷) = ۱۴۴۴/۵ r.p.m

ازمقادیر کم لغزش جریان رتور از معادله (۶-۲۹) چنین خواهد شد :

$$I_{۲۱} = \frac{s_۱ V}{r_۲} = \frac{۰/۰۳V}{r_۲}$$

$$I_{۲۲} = \frac{s_۲(۰/۹V)}{r_۲} = \frac{۰/۰۳V\ (۰/۹V)}{r_۲}$$

$$\frac{I_{۲۲}}{I_{۲۱}} = \frac{۰/۰۳V\ (۰/۹V)}{۰/۰۳V} = ۱/۱۱$$

$$\frac{\text{تلفات اهمی با ولتاژ کاهش یافته}}{\text{تلفات اهمی با ولتاژ نرمال}} = (\frac{I_{۲۲}}{I_{۲۱}})^۲ = ۱/۱۱^۲ = ۱/۲۳۲۱$$

$$\text{درصد کاهش سرعت} = \frac{۱۴۵۵ - ۱۴۴۴/۵}{۱۴۵۵} = ۰/۷۲۲\ ٪$$

$$\text{درصد افزایش تلفات اهمی} = \frac{۱/۲۳۲۱ - ۱}{۱} \times ۱۰۰ = ۲۳/۲۱\ ٪$$

این مثال نشان می دهد که کاهش در ولتاژ منبع اثر چندانیی بر سرعت موتور نمی گذارد اما تلفات را افزایش می دهد و لذا در شرایط گشتاور بار ثابت درجه حرارت بطور قابل ملاحظه افزایش می یابد .

مثال ۶.۳۲

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz قفس سنجابی ۴۰۰V و ۶ قطب در بار کامل با ولتاژ و فرکانس نامی با لغزش ۰/۰۴ کار می کند . رابطه بین گشتاور و لغزش را در حوزه کار خطی فرض کنید . سرعت بی بار موتور راوقتی ولتاژ منبع به‌نصف مقدار نامی برسد محاسبه کنید . گشتاور بی بار ۶Nm است .

حل :

وقتی مشخصه گشتاور لغزش خطی باشد از معادله (۶-۳۰a) داریم :

$$T_e \propto \frac{sV^۲}{\omega_s r_۲}$$

گشتاور بارکامل $T_{efl} = \frac{۷۵۰۰ \times ۶۰}{۲\pi \times ۱۰۰۰ \times ۰/۹۶} = ۷۴/۶۰۴\ Nm$

$$۷۴/۶۰۴ \propto \frac{۰/۰۴ \times ۴۰۰^۲}{\omega_s r_۲}$$

$$۶ \propto \frac{s \times ۲۰۰^۲}{\omega_s r_۲}$$

$$\frac{۶}{۷۴/۶۰۴} = \frac{s \times ۲۰۰^۲}{۰/۰۴ \times ۴۰۰^۲}$$

$$s = ۰/۰۴ \times ۶ \times (\frac{۴۰۰}{۲۰۰})^۲ \times \frac{۱}{۷۴/۶۰۴} = ۰/۰۱۲۸۷$$

سرعت بی‌بارموتور = ۱۰۰۰ (۱ - ۰/۰۱۲۸۷) = ۹۸۷/۱۳ r.p.m

مثال ۶.۳۳

یک موتور القائی سه فاز ۵۰Hz با رتور سیم پیچی شده ۶ قطب دارای گشتاور حداکثر ۲۵۰ درصد گشتاور بار کامل در لغزش ۱۸ درصد می باشد . مقاومت هر فاز رتور در ۵۰Hz ۱Ω است . ولتاژ ورودی منبع در مواجه با نوسانات شدید است . حداقل ولتاژی که باید اعمال کرد تا موتور بتواند همچنان گشتاور نامی خود را بدهد تعیین کنید . همچنین مقاومتی که باید در مدار رتور قرار داد تا موتور گشتاور بار کامل خود را در این ولتاژ کاهش یافته در حالت راه اندازی تولید کند تعیین نمائید . مدار مغناطیسی را غیر اشباع فرض کنید .

حل :

$$T_{em} = ۲/۵\ T_{efl} \quad , s_{mT} = ۰/۱۸$$

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{x_۲} = ۰/۱۸ \qquad x_۲ = \frac{۱}{۰/۱۸} = ۵/۵۵\ \Omega$$

s لغزش بار کامل است :

$$\frac{T_{efl}}{T_{em}} = \frac{۱}{۲/۵} = \frac{۲}{\frac{۰/۱۸}{s} + \frac{s}{۰/۱۸}} = \frac{۰/۳۶s}{s^۲ + ۰/۳۲۴}$$

$$s^۲ - -۰/۹s + ۰/۰۳۲۴ = ۰$$

از حل آن نتیجه می شود : $s = ۰/۰۳۷۶$

$$T_{efl} = \frac{۳}{\omega_s} \times \frac{V^۲}{(\frac{۱}{۰/۰۳۷۶})^۲ + ۵/۵^۲} \times \frac{۱}{۰/۳۷۶} = \frac{۳}{\omega_s} \times \frac{V^۲}{۲۷/۷۵۴}$$

اگر حداقل ولتاژ xV ($x < ۱$) فرض شود . موتور می تواند گشتاور نامی خود را تا وقتی که T_{em} در ولتاژ کاهش یافته مساوی T_{efl} باشد تولید نماید لذا :

$$\frac{۳}{\omega_s} \times \frac{(xV^۲)}{۲ \times ۵/۵۵} = \frac{۳}{\omega_s} \times \frac{V^۲}{۲۷/۷۵۴}$$

$$x = \sqrt{\frac{۱۱/۱}{۲۷/۷۵۴}} = ۰/۶۳۲۴ \text{ یا } ۶۳/۲۴\ ٪$$

اگر R مقاومت خارجی وارد شده در مدار رتور باشد باید گشتاور راه اندازی در ولتاژ کاهش

یافته معادل T_{eff} باشد لذا :

$$\frac{۳}{\omega_s} \times \frac{(۰/۶۳۲۴V)^۲}{(R+۱)^۲ \times ۵/۵۵^۲} \times (R+۱) = \frac{۳}{\omega_s} \times \frac{V^۲}{۲۷/۷۵۴}$$

$$۱۱/۱\ (R+۱) = R^۲ + ۲R + ۱ + ۳۰/۸$$

$$R^۲ - ۹/۱R + ۲۰/۷ = ۰$$

از حل آن : $R = ۴/۵۵\Omega$ بدست می آید .

و بنابراین مقاومت خارجی لازم در هر فاز مدار رتور $۴/۵۵\Omega$ است .

مثال ۶.۳۴

یک موتور القائی سه فاز برای کار با فرکانس ۵۰Hz و ولتاژ $V_۱$ طراحی شده است . در حالتی که‌موتور از منبع ۴۰Hz با ولتاژ $۰/۹V_۱$ تغذیه می شود نسبت جریان های راه اندازی ، گشتاور های راه اندازی و گشتاورهای حداکثر را در فرکانس ۵۰Hz و ۴۰Hz پیدا کنید . همچنین نسبت $V_۲$ در ۴۰Hz به $V_۱$ در ۵۰Hz را برای همان گشتاور راه اندازی و گشتاور حداکثر بیابید . از مقاومت ظاهری استاتور و مقاومت رتور صرفنظر کنید .

حل :

برای $x_۲$ در ۵۰Hz راکتانس پراکندگی رتور $x'_۲$ در ۴۰Hz برابر است با $x'_۲ = ۰/۸x_۲$

$$\frac{\text{جریان راه اندازی در } ۵۰Hz}{\text{جریان راه اندازی در } ۴۰Hz} = \frac{V_۱}{x_۲} = \frac{۰/۸x_۲}{۰/۹V_۱} = \frac{۰/۸}{۰/۹} = ۰/۸۸۹$$

$$\frac{\text{گشتاور راه اندازی در } ۵۰Hz}{\text{گشتاور راه اندازی در } ۴۰Hz} = \frac{۳}{۵۰} \cdot \frac{V_۱^۲}{x_۲^۲} \cdot \frac{۴۰}{۳} \cdot \left(\frac{۰/۸x_۲}{۰/۹V_۱}\right)^۲$$

$$= ۰/۸ \left(\frac{۰/۸}{۰/۹}\right)^۲ = ۰/۶۳۲۱$$

$$\frac{\text{گشتاور حداکثر در } ۵۰Hz}{\text{گشتاور حداکثر در } ۴۰Hz} = \frac{۳}{۵۰} \cdot \frac{V_۱^۲}{۲x_۲} \cdot \frac{۴۰}{۳} \cdot \frac{۲ \times ۰/۸x_۲}{(۰/۹V_۱)^۲}$$

$$= \left(\frac{۰/۸}{۰/۹}\right)^۲ = ۰/۷۹$$

برای همان گشتاور راه اندازی :

$$\frac{۳}{۴۰} \frac{V_۲^۲}{(۰/۸x_۲)^۲} = \frac{۳}{۵۰} \cdot \frac{V_۱^۲}{۲x_۲}$$

$$\frac{V_۲}{V_۱} = \sqrt{\frac{۴۰}{۵۰} \times ۰/۸^۲} = ۰/۷۵۵$$

برای همان گشتاور حداکثر :

$$\frac{۳}{۴۰} \frac{V_۲^۲}{۲(۰/۸x_۲)} = \frac{۳}{۵۰} \cdot \frac{V_۱^۲}{۲x_۲}$$

$$\frac{V_۲}{V_۱} = \sqrt{۰/۸ \times ۰/۸} = ۰/۸$$

مثال ۶.۳۵

یک موتور القائی سه فاز ۴ قطب ۶۰Hz وقتی به ولتاژ نامی وصل است بدون بار می چرخد و ۳kW مصرف می کند . وقتی از حرکت رتور آن در ٪۳۰ ولتاژ نامی جلوگیری می شود جریان نامی را می کشد و توان ورودی ۴kW مصرف می کند . با فرض اینکه تحت بار نامی تلفات مس استاتور و رتور مساوی بوده و تلفات مکانیکی ٪۳۰ تلفات بی بار است .

الف : لغزش در بار نامی ب : گشتاور راه اندازی موتور را با ولتاژ نامی تعیین کنید .

حل : تلفات مکانیکی

$$= \frac{۳}{۱۰۰} \times ۳۰۰۰ = ۹۰۰W$$

تلفات $I^۲R$ استاتور در بی‌باری – تلفات مکانیکی – توان‌ورودی‌بی‌بار = تلفات‌هسته‌استاتور

با صرفنظر کردن از تلفات $I^۲R$ در بی بار تلفات هسته استاتور برابر است با :

$$= ۳۰۰۰ - ۹۰۰ = ۲۱۰۰\ W$$

توان ورودی در آزمایش رتور قفل شده :

$$= \text{تلفات } I^۲R \text{ استاتور} + \text{تلفات } I^۲R \text{ رتور} = ۴۰۰۰\ W$$

$$\text{تلفات } I^۲R \text{ استاتور} = \text{تلفات } I^۲R \text{ رتور} = \frac{۴۰۰۰}{۲} = ۲۰۰۰\ W$$

الف : در بار نامی توان فاصله هوائی

$$P_g = \text{تلفات } I^۲R \text{ رتور} + \text{تلفات مکانیکی} + \text{توان خروجی}$$

$$P_g = ۶۰۰۰۰ + ۹۰۰ + ۲۰۰۰ = ۶۲۹۰۰W$$

$$\text{تلفات } I^۲R \text{ رتور} = ۲۰۰۰\ W = sP_g$$

$$s = \frac{۲۰۰۰}{۶۲۹۰۰} = ۰/۰۳۱۸ \text{ لغزش در بار نامی}$$

ب : در ولتاژ نامی, توان ورودی موتور در آزمایش رتور قفل شده برابر است با :

$$= ۴ \times \left(\frac{۱۰۰}{۳۰}\right)^۲ = ۴۴/۴۴۴\ kW$$

تلفات $I^۲R$ استاتور – تلفات هسته استاتور – توان ورودی $= P_g$ توان فاصله هوائی

$$= ۴۴۴۴۴ - ۲۱۰۰ - ۲۰۰۰ = ۴۰۳۴۴ \text{ W}$$

سرعت سنکرون $\omega_s = \frac{۴\pi f}{p} = \frac{۴\pi \times ۵۰}{۴} = ۵۰\pi \text{ rad/s}$

گشتاور راه اندازی $\frac{P_g}{\omega_s} = \frac{۴۰۳۴۴}{۵۰\pi} = ۲۵۶/۸۴ \text{ Nm}$

مثال ۶.۳۶

یک موتور القائی سه فاز برای کار با فرکانس ۵۰Hz و ولتاژ $V_۱$ طراحی شده است . گشتاور شکست آن در لغزش ۰/۲ رخ می دهد و مقاومت ظاهری استاتور آن ناچیز است . درحالتی که موتوربا ولتاژ $V_۱$ وفرکانس ۴۵Hz کارمی کند ، نسبت جریان راه اندازی ، گشتاور راه اندازی و گشتاور خداکثر را در ۴۵۰Hz به مقادیر نظیر آنها در فرکانس ۵۰Hz پیدا کنید .

$$s_{mT} = \frac{r_۲}{x_۲} = ۰/۲$$

$x_۲$ = در فرکانس ۵۰Hz راکتانس پراکندگی رتور

$۰/۹x_۲$ = در فرکانس ۴۰Hz راکتانس پراکندگی رتور

اگر $V_۱$ ولتاژ در فرکانس ۵۰Hz و $V_۲$ ولتاژ در فرکانس ۴۵Hz باشد داریم :

نسبت جریانهای راه اندازی :

$$I_{st۱} = \frac{V_۱}{\sqrt{r^۲_۲ + x^۲_۲}} \quad , \quad I_{st۲} = \frac{V_۱}{\sqrt{r^۲_۲ + (۰/۹x_۲)^۲}}$$

$$\frac{I_{st۲}}{I_{st۱}} = \sqrt{\frac{r_۲^۲ + x_۲^۲}{r^۲_۲ + (۰/۹x_۲)^۲}} = \sqrt{\frac{s_{mT}^۲ + ۱}{S_{mT}^۲ + ۰/۹^۲}} = \sqrt{\frac{۰/۲ + ۱}{۰/۲^۲ + ۰/۸۱}}$$

$$= ۱/۱۰۶۱$$

نسبت گشتاورهای راه اندازی :

$$\frac{T_{st۲}}{T_{st۱}} = \frac{V_۱^۲ \, r_۲}{r^۲_۲ + (۰/۹x_۲)^۲} \cdot \frac{r_۲^۲ + x_۲^۲}{V^۲_۱ \, r_۲}$$

$$= \frac{s_{mT۲}^۲ + ۱}{s_{mT}^۲ + ۰/۹^۲} = \frac{۰/۲^۲ + ۱}{۰/۲^۲ + ۰/۸۱}$$

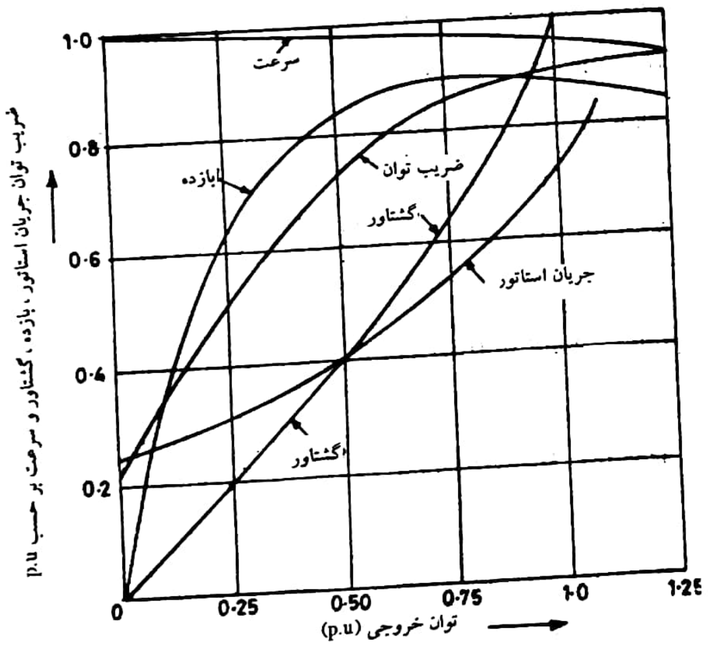
$$= ۱/۲۲۳۵$$

نسبت گشتاورهای حداکثر :

$$\frac{T_{m۲}}{T_{m۱}} = \frac{۳}{\omega_s} \frac{V_۱^۲}{۲(۰/۹x_۲)} \cdot \frac{\omega_r}{۳} \frac{۲x_۲}{r^۲_۱} = \frac{۱}{۰/۹} = ۱/۱۱۱$$

۹-۶ مشخصه های کار (یا عملکرد) موتورهای القائی

مشخصه های کار حالت دائمی موتور القائی ، منحنی تغییرات سرعت ، ضریب توان ، جریان استاتور و بازده بر حسب قدرت خروجی محور از بی بار تا بارکامل می باشد . برای یک موتور القائی مقاومت رتور ، طول فاصله هوائی و شکل شیارهایی استاتور و رتور بر مشخصه های کار آن حکومت می کند . هدف این بخش بررسی طبیعت مشخصه های کار حالت دائمی موتورهای القائی و بررسی عوامل مؤثر برآنهاست . شکل ۲۳-۶ نمونه مشخصه های کار یک موتور القائی را نشان می دهد که اکنون شکل این منحنی ها را مورد بررسی قرار می دهیم .



شکل ۲۳-۶: مشخصه های کار موتور القائی

الف : سرعت

در حالت بی بار سرعت نزدیک سرعت است و لذا لغزش بی بار خیلی کوچک است . همچنین گشتاور بی بار که برای پوشاندن گشتاور تلفات اصطکاک و مالش هوا کافی است خیلی کوچک می باشد . در نتیجه گشتاور بی بار کوچک ، جریان رتور یا نیروی محرکه مغناطیسی رتور $F_۲$ نیز خیلی کوچک بوده و زاویه بار خیلی نزدیک به ۹۰° است (معادله ۵-۶ را ببینید) . با افزایش گشتاور بار گشتاور الکترو مغناطیسی T_e متناسباً باید افزایش

یابد . این افزایش فقط با افزایش زاویه بار و نیروی محرکه مغناطیسی رتور F_2 امکان پذیر است . برای اینکه نیروی محرکه مغناطیسی رتور F_2 یا جریان رتور I_2 افزایش یابد ، نیروی محرکه الکتریکی رتور sE_2 یا لغزش باید افزایش یابد ، به عبارت دیگر سرعت رتور با افزایش گشتاور بار باید کاهش یابد . E_2 نیروی محرکه الکتریکی هر فاز رتور در حال سکون است .

در حالت بی بار ، مقاومت القائی پراکندگی رتور اثر کمی بر مقاومت ظاهری پراکندگی رتور دارد زیرا فرکانس رتور و sx_2 خیلی کوچک است و زاویه بار ($90 + tg^{-1}\frac{sx_2}{r_2}$) خیلی نزدیک به ۹۰° است . وقتی لغزش با افزایش بار افزایش می یابد ، زاویه ضریب توان رتور θ_2 ($=tg^{-1}\frac{sx_2}{r_2}$) با آن افزایش می یابد و زاویه بار $(\theta_2 + 90)$ نیز زیاد می شود . این مطلب نشان می دهد که گشتاور بار اعمال شده افزایش یافته و سرعت رتور افت می کند و نیروی محرکه مغناطیسی رتور و F_2 و زاویه بار افزایش می یابد تا گشتاور لازم بار تامین گردد . افت در سرعت از بی بار تا بار کامل معمولاً" در حدود ۲ تا ۵ درصد سرعت نامی است . با این دید می توان گفت که موتور القائی مشخصه های شنت (موتور موازی) را دارد .

ب : ضریب توان

جریان استاتور موتور القائی سه فاز از سه مؤلفه زیر تشکیل یافته است :

۱ - جریان مغناطیس کننده I_ϕ

این مؤلفه نسبت به ولتاژ استاتور V_1 همانند ترانسفورماتور ۹۰° پس فاز دارد . وظیفه آن تولید میدان دوار است .

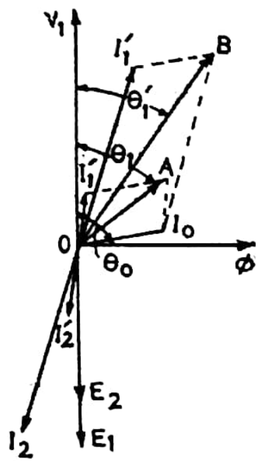
۲ - مؤلفه تلفات استاتور

این مؤلفه تلفات آهن و تلفات مس استاتور را مانند ترانسفورماتور تأمین می کند .

۳ - مؤلفه بار

این مؤلفه با نیروی محرکه مغناطیسی رتور مانند ترانسفورماتور در تعادل قرار می گیرد .

در حالت بی بار جریان استاتور I_0 در شکل ۲۱-۶ نشان داده شده است و مؤلفه سوم یعنی مؤلفه بار I_0 در حالت بی بار صرف تلفات اصطکاک و مالش هوا می شود (برای یک ترانسفورماتور در حالت بی بار مؤلفه سوم صفر است) از اینرو قدرت رتور در حالت بی بار معادل تلفات اصطکاک و مالش هواست . از آنجا که این تلفات نسبتاً" کوچک است جریان رتور و مؤلفه بار خیلی کوچک است ، جریان ناشی از ترکیب مؤلفه های دوم و سوم نسبتاً"



شکل ۲۴-۶: بهبود ضریب توان با افزایش بار

کوچک خواهند بود . اما جریان مغناطیس کننده I_ϕ قسمت اعظم I_0 را بعلت وجود فاصله هوائی در موتور القائی تشکیل می دهد . در نتیجه جریان بی بار I_0 نسبت به ولتاژ استاتور باندازه θ_0 عقب است که در حدود ۷۵° تا ۸۵° می باشد . نتیجه اینست که ضریب توان استاتور در بی بار در حدود ۰/۱ تا ۰/۳ است مقادیر پائین تر مربوط به موتورهای بزرگتر است .

با بار شدن موتور ، مؤلفه سوم یعنی مؤلفه بار ، مؤلفه جریان استاتور به بالاتر از مقدار بی بار آن می رود . افزایش مؤلفه بار جریان استاتور بالاتر از مقدار بی بار آن مسئول تولید گشتاور بار است . مؤلفه بار استاتور I'_1 با معادله (۱۵-۶) داده شده وقتی به I_0 اضافه می شود جریان استاتور OA را در ضریب توان $\cos\theta_1$ می دهد . با افزایش بیشتر در بار موتور ، جریان رتور افزایش یافته و مؤلفه جریان بار I'_1 که به I_0 اضافه می شود جریان استاتور OB را در ضریب توان $\cos\theta'_1$ بدست می دهد . باین ترتیب از شکل ۲۳-۶ دیده می شود که زاویه ضریب توان کاهش یافته و لذا ضریب توان استاتور با افزایش بار موتور بهبود می یابد . ضریب توان حدود ۰/۸۵ تا ۰/۸۸ در توان خروجی بار کامل ۸۰ تا ۹۰٪ بدست می آید . اگر موتور فراتر از این بار شود ضریب توان کمی کاهش می یابد زیرا اثر مقاومت القائی پراکندگی که قبلاً" قابل ملاحظه بود افت می کند . لازم بذکر است که در شکل ۲۴-۶ V_1 و I_1 و E_1 و غیره همگی فازبر دارند که برای سادگی علامت بردار روی آنها نوشته نشده است .

ج : بازده

مانند سایر ماشینهای الکتریکی تلفات ماشین القائی مرکب از تلفات ثابت (تلفات هسته + تلفات اصطکاک و مالش هوا) و تلفات متغیر (بار) می باشد . در حالت بی بار قدرت خروجی محور صفر است و لذا بازده صفر است . در مقادیر کم بار تلفات ثابت بیشتر است و لذا بازده پائین می باشد . با افزایش بار بازده نیز افزایش یافته و وقتی تلفات ثابت با متغیر مساوی می شود به حداکثر می رسد . بازده حداکثر در حدود ۸۰ تا ۹۵٪ قدرت نامی رخ می دهد مقادیر بزرگتر مربوط به موتورهای بزرگتر است . اگر بار به فراتر از بار نظیر بازده حداکثر افزایش یابد ، تلفات بار سریعتر از توان خروجی افزایش می یابد که در نتیجه بازده کاهش می یابد .

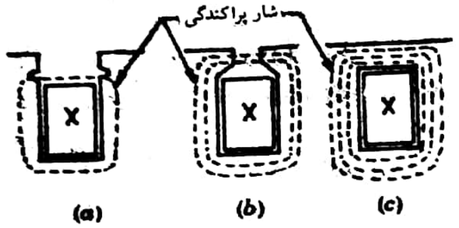
د : جریان استاتور

جریان بی بار استاتور حدود ۳۰ تا ۵۰٪ جریان نامی است ، مقادیر کمتر مربوط به موتورهای کوچکتر است . با افزایش بار جریان متناسبا" افزایش می یابد . در نمودار برداری مکان نوک بردارهای جریان استاتور با افزایش بار نیم دایره است که به بررسی نمودار دایره ای منجر می گردد . (بخش ۱۱-۶ را ببینید)

ه : شکل شیارهای استاتور

برای مساحت معین شیار ، شیارها ممکن است (۱) عمق بیشتر و پهنای کمتر و یا (۲) عمق کمتر و پهنای بیشتر داشته باشند . بند ب مثال ۱۵-۲ نشان می دهد که شار پراکندگی شیار مستقیما" متناسب با عمق شیار است . براین اساس موتورهای القائی با شیارهای عمیق تر مقاومت القائی پراکندگی بیشتر داشته و لذا مقادیر T_{est} و T_{em} و s_{mT} کمترند . تفکر مشابهی را می توان در مورد موتورهای القائی با شیارهای پهن تر داشت .

علاوه بر این شیارها ممکن است طبق شکل های (a) و (b) و (c)۲۵-۶ باز ، نیم بسته یا بسته باشند . برای یک نیروی محرکه مغناطیسی معین مقاومت مغناطیسی شیارهای (۱) باز بیشتر (۲) شیارهای نیم بسته کم و (۳) شیارهای بسته کمتر خواهد بود . در نتیجه شیارهای باز دارای مقاومت القائی پراکندگی کمتر از شیارهای نیم بسته هستند در حالی که شیارهای بسته مقاومت القائی پراکندگی بیشتری نسبت به شیارهای نیم بسته دارند . در شکل ۲۵-۶ شار پراکندگی با خط چین نشان داده شده است .



شکل ۲۵-۶: (a) شیار باز (b) شیار نیمه باز (c) شیار بسته

و : فاصله هوائی

در موتورهای القائی برای ولتاژ منبع ثابت شار فاصله هوائی اساسا" ثابت است . اگر طول فاصله هوائی افزایش یابد ، شار ثابت به جریان مغناطیس کننده بیشتر نیاز دارد . که ضریب توان بی بار و همچنین ضریب توان بار کامل موتور القائی را کاهش می دهد . بنابراین برای اینکه موتور القائی در ضریب توان بهتری کار کند ، طول فاصله هوائی باید تا حد امکان (از نظر مکانیکی) کوچک نگهداشته شود . فاصله هوائی کوچک در موتورهای القائی محور سنگین تر و یاطاقانهای مرغوبتر را نسبت به دیگر ماشینهای گردان با همان سرعت و مقدار نامی طلب می کند . شیارهای باز در موتور القائی ، اثر افزایش طول فاصله هوائی (۱/۱ تا ۱/۲) برابر طول فاصله هوائی واقعی را دارد که در نتیجه جریان مغناطیس کننده بیشتر و ضریب توان کار موتور بدتر می شود . اما موتور القائی با شیارهای باز دارای مقاومت القائی پراکندگی کمتر است که T_{est} و T_{em} بزرگتری خواهد داد . بهمین ترتیب یک موتور القائی با شیارهای نیم بسته یا بسته به جریان مغناطیس کننده کمتر نیاز دارد و لذا ضریب‌توان کارآن بهتراست اما T_{est} و T_{em} آن‌کاهش می‌یابد . با توجه به این نکات در مرحله طراحی بین T_{est} و T_{em} و ضریب توان کار موتورهای القائی باید مصالحه ای صورت پذیرد .

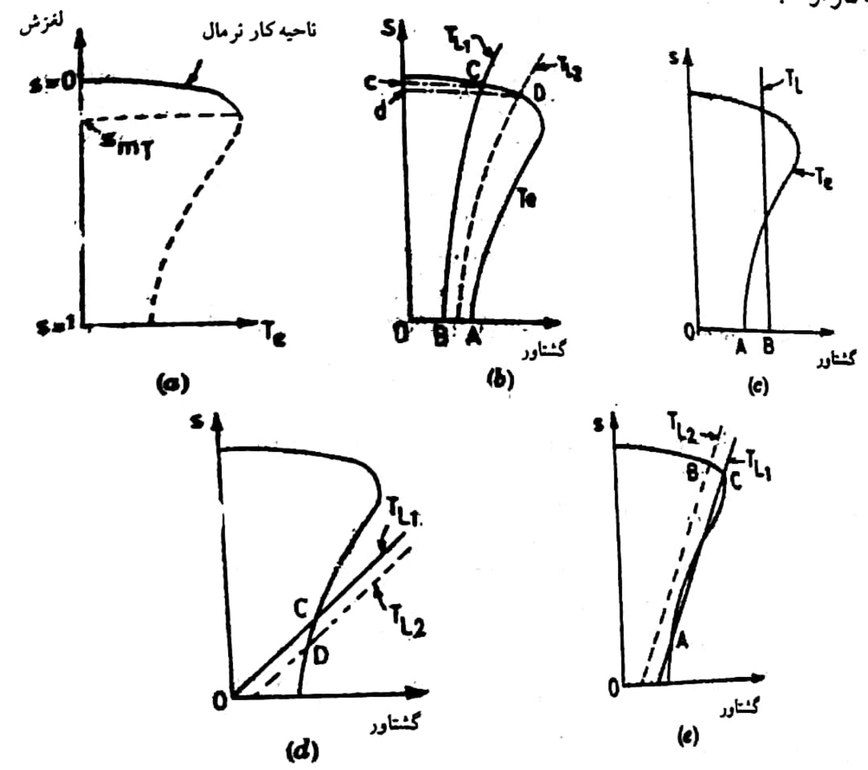
۱-۹-۶ پایداری موتور القائی

عملا" در تمام موتورها وقتی گشتاور بار افزایش می یابد سرعت افت می کند . تنها تقاطع مشخصه های گشتاور موتور T_e و گشتاور بار T_L نقطه کار پایدار را تضمین نمی کند . کار پایدار سیستم مرکب از موتور و بار وقتی ممکن است که سرعت موتور با افزایش گشتاور بار کاهش یابد و بر عکس . موتور القائی طوری طرح شده که در مقادیر کم لغزش بار کامل (از ۲٪ تا ۵٪) در شرایط کار نرمال کار کند .

در شکل (a) ۲۶-۶ ناحیه کار نرمال از $s = 0$ تا s_{mT} با منحنی خط پرنشان داده شده

است . ناحیه از $s = ۱$ تا s_{mT} که با خط چین در شکل (a)۲۶-۶ نمایش داده شده بندرت به کار می رود.

در شکل (b)۲۶-۶ گشتاور راه اندازی موتور OA از گشتاور بار OB بیشتر است . و لذا موتور به نقطه کار C شتاب می گیرد . اگر گشتاور بار از منحنی $T_{L۱}$ به $T_{L۲}$ افزایش یابد ، نقطه کار از C به D جابجا شده و سرعت موتور از Oc به Od افت می کند . می توان ثابت کرد



شکل ۲۶-۶: پایداری موتور القائی

که اگر گشتاور بار کاهش یابد سرعت موتور افزایش می یابد. نتیجه آنست که نقطه C پایدار است .

برای مشخصه بار $T_{L۱}$ شکل (c)۲۶-۶ موتور راه نمی افتد زیرا گشتاور راه اندازی OA کمتر از گشتاور بار OB است . از اینرو نقطه کاری نخواهیم داشت .

برای مشخصه بار $T_{L۱}$ شکل (d)۲۶-۶ C نقطه کار پایدار است زیرا افزایش گشتاور بار از $T_{L۱}$ به $T_{L۲}$ نقطه کار را از C به D جابجا می کند و لذا سرعت کاهش نشان می دهد . اما چنین مشخصه باری در شرایط نرمال بندرت اتفاق می افتد زیرا نقطه کار C در لغزش بالاتر ، جریان بزرگتر و ضریب توان کمتر و بازده خیلی کمتر و خیلی پائین حاصل می شود .

برای مشخصه بار $T_{L۱}$ شکل (e)۲۶-۶ A نقطه کار پایدار است . اگر بهر دلیلی گشتاور

بار ناگهانی از $T_{L۱}$ به $T_{L۲}$ کاهش یابد ، گشتاور موتور از $T_{L۲}$ فراتر رفته و رتور شتاب می گیرد تا نقطه کار B فرا برسد . بعد از آنکه نقطه B رسید $T_{L۲}$ به $T_{L۱}$ افزایش یافته نقطه کار C در سرعت کم بدست می آید . از اینرو ناحیه کار عادی از $s = ۰$ تا s_{mT} پایدارتر از ناحیه از s_{mT} تا $s = ۱$ است .

از بحث فوق می توان نتیجه گرفت که کار پایدار بستگی به طبیعت مشخصه ای گشتاور بار و گشتاور موتور و محل تقاطع آنها دارد . همچنین می توان ثابت کرد که اگر $\frac{dT_L}{d_n} > \frac{dT_e}{d_n}$ باشد سیستم پایدار است . در حالتی که $\frac{dT_L}{d_n} < \frac{dT_e}{d_n}$ سیستم ناپایدار است .

در عمل ناحیه بین $s = ۰$ و s_{mT} مورد استفاده قرار می گیرد . این ناحیه را گاهی ناحیه پایدار می گویند زیرا تمام مشخصه های بار در این منطقه به نقطه کار پایدار می رسند . از آنجا که مشخصه گشتاور سرعت در ناحیه کار نرمال مشابه موتور شنت جریان مستقیم است (تغییرات کم سرعت از بی بار تا بار کامل) موتور القائی مشخصات موتور شنت را داراست .

۶-۱۰ تعیین پارامترهای مدار معادل

پارامترهای مدار معادل موتورهای القائی چند فاز را می توان از آزمایش بی بار آزمایش رتور قفل شده و آزمایش مقاومت استاتور با جریان مستقیم بدست آورد .

هدف این بخش تشریح روشهای تعیین پارامترها از این آزمایشها می باشد .

الف : آزمایش بی بار (آزمایش کم باری)

موتور القائی برای کار در حالت بی بار با ولتاژ و فرکانس نامی ساخته شده است . مقادیر فازی ولتاژ استاتور V_{nl} ، جریان ورودی I_{nl} و قدرت ورودی P_{nl} ثبت می شود .

لغزش بی بار s_{nl} خیلی کوچک است و لذا $\frac{r_۲}{s_{nl}}$ در شکل ۱۴-۶ در مقایسه با X_ϕ خیلی بزرگ است . براین اساس معادل شاخه های موازی jX_ϕ و $(\frac{r_۲}{s_{nl}} + jx_۲)$ تقریباً معادل jX_ϕ است (شکل (a) ۲۷-۶) . از اینرو مقاومت بی بار X_{nl} دیده شده از طرف استاتور معادل $x_۱ + X_\phi$ است یعنی :

$$X_{nl} = x_۱ + X_\phi = X_۱ \qquad (۶-۳۹)$$

که $X_۱$ مقاومت خود القائی استاتور است .

از قرائت دستگاههای اندازه گیری در حالت بی بار مقاومت ظاهری بی بار :

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}}$$

و مقاومت بی بار استاتور

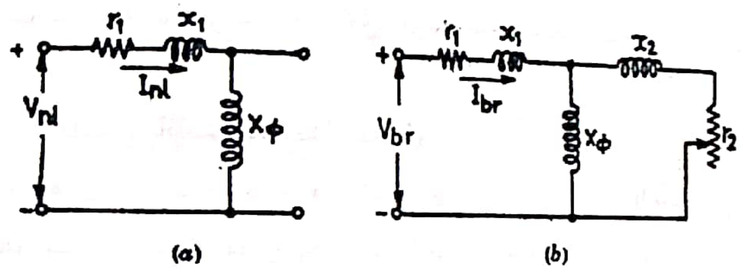
$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^{2}}$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^{2} - R_{nl}^{2}}$$

تلفات گردشی P_R (اصطکاک، مالش هوا و تلفات هسته) معمولاً" ثابت فرض می شود و از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_R = m\,(P_{nl} - I_{nl}^{2} r_1)$$

که در آن m تعداد فازهای استاتور و r_1 مقاومت هر فاز استاتور است بنابراین آزمایش بی بار X_{nl} و تلفات گردشی P_R را بدست می دهد.



شکل ۲۷-۶: مدارهای معادل موتور القائی (a) آزمایش بی بار (b) آزمایش رتور قفل شده

ب: آزمایش رتور قفل شده

آزمایش رتور قفل شده مشابه آزمایش اتصال کوتاه در ترانسفورماتور است که روی موتور القائی برای محاسبه مقاومت القائی پراکندگی انجام می گیرد. برای انجام این آزمایش محور رتور باوسیله خارجی نگهداشته می شود یعنی محور رتور توسط تسمه یا تخته یا دست نگهداشته می شود. حال ولتاژ چند فاز متعادل با فرکانس نامی از طریق تغییر دهنده ولتاژ (اتو ترانسفورماتور) به سرهای استاتور اعمال می شود. این ولتاژ تا حدی تنظیم می شود که جریان نامی از سیم پیچی استاتور بگذرد. مقادیر فازی ولتاژ اعمال شده V_{br} جریان ورودی (= جریان نامی) I_{br} و توان ورودی P_{br} ثبت می شوند. جریان I_{br} ممکن است از محل رتور تاثیر پذیرد. براین اساس رتور باید در وضعیتی نگهداشته شود که I_{br} معادل مقدار متوسط مقادیر حداکثر و حداقل جریان باشد. اندازه گیری مقاومت جریان مستقیم هر فاز سیم پیچی استاتور بلافاصله بعد از این آزمایش انجام می گیرد و نتیجه در

۱/۱ تا ۱/۳ ضرب می شود تا مقاومت مؤثر هر فاز استاتور r_1 بدست آید. مدار معادل آزمایش رتور قفل شده در شکل (b)۲۷-۶ نشان داده شده از قرائت دستگاههای اندازه‌گیری در طول آزمایش رتور قفل شده می‌توان پارامترها رابه صورت زیر بدست آورد:

مقاومت ظاهری رتور قفل شده:

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}}$$

و مقاومت رتور قفل شده:

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{I_{br}^{2}}$$

مقاومت القائی رتور قفل شده:

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^{2} - R_{br}^{2}}$$

بررسی شکل (b)۲۷-۶ نشان می دهد که مقاومت ظاهری دیده شده از طرف استاتور عبارتست از:

$$Z_{br} = R_{br} + jX_{br} = r_1 + jx_1 + \frac{jX_\phi\,(r_2 + jx_2)}{r_2 + j\,(x_2 + X_\phi)}$$

$$= r_1 + jx_1 + \frac{jX_\phi\,(r_2 + jx_2)}{r_2 + j\,(x_2 + X_\phi)} \cdot \frac{r_2 - j(x_2 + X_\phi)}{r_2 - j(x_2 + X_\phi)}$$

$$= r_1 + jx_1 + \frac{jX_\phi\,[r_2^{2} + jr_2x_2 - jr_2\,(x_2 + X_\phi) + x_2\,(x_2 + X_\phi)]}{r_2^{2} + (x_2 + X_\phi)^{2}}$$

یا:

$$R_{br} + jX_{br} = r_1 + jx_1 + \frac{jX_\phi\,[r_2^{2} + x_2X_2 - jr_2X_\phi]}{r_2^{2} + x_2^{2}} \qquad (۶-۴۰)$$

که در آن $X_2 = x_2 + X_\phi$ مقاومت خود القائی رتور است. از مقایسه قسمت های موهومی دو طرف معادله (۶-۴۰) نتیجه می شود:

$$X_{br} = x_1 + \frac{X_\phi\,(r_2^{2} + x_2X_2)}{r_2^{2} + x_2^{2}}$$

$$= x_1 + \frac{X_\phi\,[\frac{r_2^{2}}{X_2} + x_2]}{\frac{r_2^{2}}{X_2} + X_2}$$

از آنجا که $X_2 >> r_2$ است از $\frac{r_2^{2}}{X_2}$ می توان صرفنظر نمود که در اینصورت:

$$X_{br} = x_1 + \frac{X_\phi\,x_2}{X_2} = x_1 + \frac{X_\phi\,x_2}{X_\phi + x_2}$$

$$= x_1 + \frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{X_\phi}}$$

معمولاً" مقاومت القائی مغناطیس کننده X_ϕ خیلی بزرگتر از مقاومت القائی پراکندگی رتور x_2 است و لذا $\frac{x_2}{X_\phi}$ کوچک است و با صرفنظر کردن از آن در مقابل x_2 داریم :

$$X_{br} = x_1 + x_2 \qquad (۶-۴۱)$$

روش عملی برای جداکردن x_1 و x_2 وجود ندارد . برای ماشینهای رتور سیم پیچی شده x_1 مساوی x_2 فرض می شود یعنی $x_1 = x_2 = \frac{1}{2} X_{br}$ در ماشینهای قفس سنجابی مجموع مقاومتهای القائی پراکندگی ($X_{br} = x_1 + x_2$) را می توان بین استاتور و رتور طبق جدول زیر تقسیم کرد :

جدول ۱-۶ تقسیم تجربی مقاومت القائی پراکندگی X_{br}

کلاس موتور	کسری از X_{br}	
	x_2	x_1
۱ - کلاس A (T_{est} و T_{st} معمولی)	۰/۵	۰/۵
۲ - کلاس B (T_{est} معمولی و T_{st} کم)	۰/۴	۰/۶
۳ - کلاس C (T_{est} بالا و T_{st} کم)	۰/۳	۰/۷
۴ - کلاس D (T_{est} بالا و لغزش بالا)	۰/۵	۰/۵

بادانستن x_1 از معادله (۳۹-۶) مقاومت القائی مغناطیس کننده استاتور چنین خواهد بود :

$$X_\phi = X_{nl} - x_1$$

با مساوی قرار دادن مقادیر حقیقی دو طرف معادله (۴۰-۶) مقاومت رتور قفل شده R_{br} دیده شده از طرف استاتور برابر است با :

$$R_{br} = r_1 + r_2 \frac{X_\phi^2}{r_2^2 + X_2^2}$$

برای ماشینهای با طرح معمولی $X_2 >> r_2$ و لذا r_2 در مخرج رامی توان در مقابل X_2 صرفنظر کرد :

مقاومت هر فاز رتور :

$$R_{br} = r_1 + r_2 \left(\frac{X_\phi}{X_2}\right)^2$$

$$r_2 = (R_{br} - r_1) \left(\frac{X_2}{X_\phi}\right)^2 \qquad (۶-۴۲)$$

باین ترتیب X_ϕ از معادله (۳۹-۶) ، r_2 از معادله (۴۲-۶) ، r_1 از آزمایش مقاومت dc هر فاز سیم پیچی استاتور و x_1 و x_2 از معادله (۴۱-۶) و جدول ۱-۶ از سه آزمایش تعیین می شوند . مدار معادل را می توان برای محاسبه عملکرد موتور به کار برد .

در هنگام آزمایش رتور قفل شده ، توان ورودی تقریباً" معادل تلفات I^2R سیم پیچی استاتور و رتور است . برای ولتاژ کم در این آزمایش چگالی شار خیلی کم است و تلفات هسته خیلی کوچک است . برای مثال برای ولتاژ ورودی ۲۰٪ چگالی شار حدود یک دهم مقدار عادی است و بنابراین تلفات هسته حدود یک درصد تلفات نامی هسته است که عدد کاملاً" کوچکی است .

یادداشت : برای موتورهای بزرگ (بزرگتر از ۲۰kW) اگر به مشخصه های موتور القائی نزدیک $s = 1$ نیاز باشد (مثلاً" گشتاور راه اندازی و غیره) چون فرکانس رتور f_2 معادل فرکانس خط است ، آزمایش رتور قفل شده باید در فرکانس خط و با جریانی معادل جریان راه اندازی انجام گیرد .

وقتی مشخصه های موتور نزدیک سرعت سنکرون لازم باشد (مثلاً" در هنگام کار عادی) فرکانس رتور معادل sf بوده و لذا آزمایش رتور قفل شده باید در فرکانس کم و جریان نرمال صورت گیرد .

مثال ۶.۳۷

نتایج آزمایشهای یک موتور القائی قفس سنجابی ۱۰kW ، ۴۰۰V و ۴ قطب با اتصال مثلث بقرار زیر است :

آزمایش بی بار : ۴۰۰V و ۸A و ۲۵۰W

آزمایش رتور قفل شده : ۹۰V و ۳۵A و ۱۳۵۰W

مقاومت dc سیم پیچی استاتور هر فاز که بلافاصله بعد از آزمایش رتور قفل شده انجام گرفته ۰/۶Ω است . تلفات گردشی و پارامترهای مدار معادل را محاسبه کنید .

حل :

تلفات بی بارگردشی عبارتست از :

$$P_R = ۲۵۰ - ۳ \left(\frac{۸}{\sqrt{۳}}\right)^2 \times (۰/۶ \times ۱/۲)$$
$$= ۲۰۳/۹۲ \text{ W}$$

مقاومت مؤثر هر فاز استاتور را ۱/۲ برابر مقدار dc در نظر می گیریم :

از آزمایش بی بار :

$$Z_{nl} = \frac{\frac{۴۰۰}{\sqrt{۳}}}{۸} = ۸۶/۶\ \Omega$$

$$R_{nl} = \frac{۲۵۰}{۳\ (\frac{۸}{\sqrt{۳}})^۲} = ۳/۹۱\ \Omega$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^۲ - R_{nl}^۲} = \sqrt{۸۶/۶۲ - ۳/۹۱۲} = ۸۶/۵۱\ \Omega$$

از آزمایش رتور قفل شده :

$$Z_{br} = \frac{\frac{۹۰}{\sqrt{۳}}}{۳۵} = ۴/۴۵۴\ \Omega$$

$$R_{br} = \frac{۱۳۵۰}{۳\ (\frac{۳۵}{\sqrt{۳}})^۲} = ۱/۱۰۲\ \Omega$$

$$X_{br} = \sqrt{۴/۴۵۲^۲ - ۱/۱۰۲^۲} = ۴/۳۱۶\ \Omega$$

$$x_۱ = x_۲ = \frac{۱}{۲} X_{br} = ۲/۱۵۸\ \Omega$$

$$X_\phi = X_{nl} - x_۱ = ۸۶/۵۱ - ۲/۱۵۸ = ۸۴/۳۵۲\ \Omega$$

$$X_۲ = X_\phi + x_۲$$
$$= ۸۴/۳۵۲ + ۲/۱۵۸ = ۸۶/۵۱\ \Omega$$

از معادله (۴۲-۶) مقاومت هر فاز رتور عبارتست از :

$$r_۲ = (R_{br} - r_۱)\ (\frac{X_۲}{X_\phi})^۲$$
$$= (۱/۱۰۲ - ۰/۶ \times ۱/۲)\ (\frac{۸۶/۵۱}{۸۴/۳۵۲})^۲$$
$$= ۰/۴۰۲\ \Omega$$

از اینرو پارامترهای مدار معادل موتور القائی عبارتند از :

$x_۱ = x_۲ = ۲/۱۵۸\ \Omega$ $\quad r_۲ = ۰/۴۰۲\ \Omega$ $\quad r_۱ = ۰/۷۲\ \Omega$

$X_\phi = ۸۴/۳۵۲\ \Omega$

مثال ۶.۳۸

الف : چگونگی محاسبه تلفات اصطکاک و مالش هوا را از آزمایش بی بار تشریح کنید .

ب : در شرایط کار نرمال موتور القائی تلفات هسته رتور معمولاً صرفنظر کردنی است ، استدلال کنید .

حل :

الف : توان ورودی به موتور القائی در حالت بی بار صرف تلفات مس استاتور تلفات هسته و تلفات اصطکاک و مالش هوا می شود .

مقاومت dc سیم پیچی استاتور سنجیده می شود و مقدار مؤثر $r_۱$ از رابطه زیر محاسبه می گردد :

$$r_۱ = (\text{مقاومت dc هر فاز})\ (۱/۳ \text{ تا } ۱/۱)$$

برای محاسبه تلفات اصطکاک و مالش هوا ولتاژ اعمال شده در حالت بی بار موتور از ۱/۲۵ برابر ولتاژ نامی تا حدود ۲۰٪ ولتاژ نامی تغییر داده می شود . قدرت ورودی ، جریان و ولتاژ را ثبت کرده تا بتوان منحنی را رسم کرد . با کاهش ولتاژ سرعت کمی می افتد به طوریکه تلفات اصطکاک و مالش هوا اساساً ثابت می ماند .

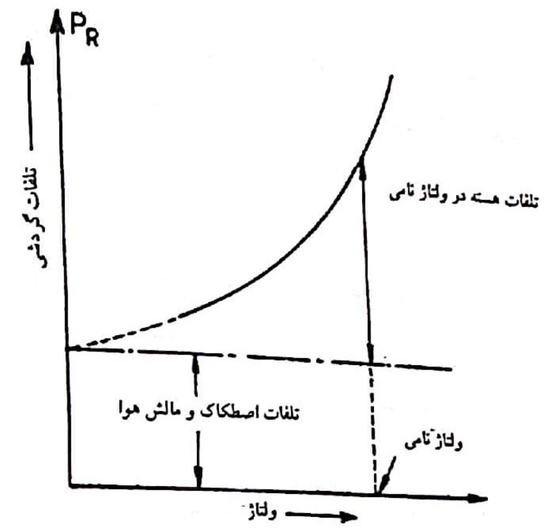
از هر قرائت قدرت ورودی تلفات اهمی استاتور کسر می شود تا تلفات هسته و تلفات اصطکاک و مالش هوا بدست آید یعنی :

$$P_R = m\ (P_{nl} - I_{nl}^۲ r_۱)$$

که P_{nl} قدرت ورودی هر فاز ، I_{nl} جریان هر فاز استاتور و $r_۱$ مقاومت مؤثر هر فاز است . منحنی تلفات گردشی P_R بر حسب ولتاژ استاتور در شکل ۲۸-۶ رسم شده است . از برون گیری [1] منحنی P_R و تقاطع آن با محور قائم تلفات اصطکاک و مالش هوا بدست می آید زیرا در ولتاژ صفر تلفات هسته صفر است . برای پیدا کردن مقدار دقیق تر تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک و مالش هوا) به تلفات گردشی P_R باید بر حسب مجذور ولتاژ رسم شود . این منحنی P_R با مجذور ولتاژ تقریباً خطی است و لذا برون گیری ساده تر است .

ب : تلفات هسته یاتلفات آهن از تلفات‌جریان فوکو ($\propto B^۲ f^۲$) و تلفات پس ماند ($\propto B^x f$) تشکیل شده است . در حال سکون فرکانس رتور مساوی فرکانس منبع f است لذا تلفات

1- Extra Polation



شکل ۲۸-۶: تغییرات تلفات گردشی با ولتاژ

هسته رتور قابل ملاحظه است ، اما با سرعت گرفتن موتور فرکانس رتور کاهش یافته و متناسباً تلفات هسته رتور کاهش می یابد در شرایط کار عادی ، لغزش کوچک است (۲٪ تا ۵٪) و فرکانس رتور خیلی کوچک بوده و در نتیجه تلفات هسته رتور خیلی کم است و لذا می توان از آن صرفنظر نمود .

مثال ۶.۳۹

در یک موتور القائی قفس سنجابی ۱۰kW ، ۴۲۰V و سه فاز ۴ قطب ۵۰Hz با اتصال ستاره از آزمایش رتور قفل شده نتایج زیر بدست آمده است :

۲۱۰ V ، ۲۰ A ، ۵ kW

تلفات هسته استاتور در ولتاژ و فرکانس نامی ۳۰۰W است . مقاومت dc سنجیده شده بین هر دو سر استاتور ۰/۶Ω است . گشتاور راه اندازی را در ولتاژ و فرکانس نامی تعیین کنید .

حل :

با اتصال مثلث سیم پیچی استاتور ، مقاومت هر فاز R از رابطه زیر بدست می آید :

$$\frac{R \times 2R}{3R} = 0/6 \quad \text{یا} \quad R = 0/9\Omega$$

مقاومت مؤثر هر فاز استاتور : $= 1/2 \times 0/9 = 1/08\ \Omega$

توان ورودی در ولتاژ نامی در آزمایش رتور قفل شده :

اگر مقاومت هر فاز سیستم انتقال R اهم باشد ، توان تلف شده در مدار توزیع بدون بانک خازنی $۳(۱۴۵/۳۲)^۲ R$ وات است .

تلفات توان وقتی بانک خازنی نصب شود :

$$= ۳(۱۱۳/۰۲)^۲ R \quad W$$

درصد صرفه جوئی در تلفات :

$$= \frac{۳(۱۴۵/۳۲)^۲ R - ۳(۱۱۳/۰۲)^۲ R}{۳(۱۴۵/۳۲)^۲ R} \times ۱۰۰$$

$$= ۳۹/۵۱ \%$$

در حالتی که بانک خازنی به صورت ستاره وصل شود ، ظرفیت هر بانک خازنی می تواند $۳ \times ۳۰/۳۴ = ۹۱/۹۲ \mu F$ باشد . ۵ تا ازین خازنها $\frac{۳۳۰۰}{\sqrt{۳} \times ۴۲۰}$ باید سری شود و ظرفیت هر خازن باید برابر باشد با :

$$۹۱/۰۲ \times ۵ = ۴۵۵/۱ \mu F$$

۶-۱۳ راه اندازی موتورهای القائی چند فاز

موتورهای القائی چند فاز را می توان با اعمال ولتاژ کامل و یا ولتاژ کم به سرهای استاتور آن راه اندازی کرد . گرچه راه اندازی با ولتاژ کم مزیت کاهش جریان راه اندازی را دارد ، با توجه باینکه گشتاور موتور متناسب با مجذور ولتاژ اعمال شده است کاهش قابل توجهی در تولید گشتاور راه اندازی دارد .

در این بخش روشهای مختلف راه اندازی موتورهای القائی چند فاز شرح داده می شود . ابتدا روشهای راه اندازی موتور القائی قفس سنجابی و سپس راه اندازی موتورهای رتور سیم پیچی شده تشریح می گردد .

۶-۱۳-۱ راه اندازی موتورهای قفس سنجابی

برای موتورهای قفس سنجابی انتخاب هر روش راه اندازی بستگی به موارد زیر دارد :

۱ - اندازه و طرح موتور

۲ - ظرفیت شبکه قدرت

۳ - نوع باری که باید بچرخد

روشهای معمول راه اندازی موتور قفس سنجابی در زیر شرح داده می شود .

الف : راه اندازی مستقیم به خط

چنانکه از نام این روش پیداست : در این روش استاتور چند فاز توسط کلید به منبع

وصل می شود . موتور بسته به اندازه و طرح آن جریان راه اندازی ۵ تا ۷ برابر جریان نامی (بارکامل) را در ضریب توان پائین از شبکه می گیرد . این چنین جریان اتصال کوتاه بزرگ با زمان کوتاه به موتور قفس سنجابی که محکم است آسیبی نمی زند . اما ممکن است باعث افت ولتاژ قابل ملاحظه در خطوط شبکه تغذیه موتور القائی شود . این افت ولتاژ بزرگ باعث فروافتادگی نامطلوبی در ولتاژ منبع شده و در نتیجه کار دیگر تجهیزاتی که به همان منبع وصلند شدیداً تحت تأثیر قرار می دهد . مثال معمول کم نور شدن لامپهای روشنائی در منازل در لحظه راه اندازی موتور یخچال است . اگر منبع تغذیه ظرفیت قدرت کافی داشته موج جریان راه اندازی با ضریب توان پائین باعث ایجاد فروافتادگی شدید در ولتاژ خط تغذیه نشود ، راه اندازی مستقیم به خط ترجیح داده می شود .

رابطه بین گشتاور راه اندازی T_{est} و گشتاور بارکامل را اکنون می توان بدست آورد . اگر I_{st} و I_{fl} بترتیب جریانهای فازگرفته شده از منبع مربوط به حالت راه‌اندازی و بارکامل باشند از معادله (۶-۱۳) :

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{I_{2st}^2 \frac{r_2}{1}}{I_{2fl}^2 \frac{r_2}{s_{fl}}} = \left(\frac{I_{2st}}{I_{2fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-51a)$$

معادله (۶-51a) در حالتی که مقاومت رتور ثابت باشد صادق است . در واقع مقاومت اهمی رتور با فرکانس جریان رتور تغییر می کند ، در راه اندازی فرکانس رتور ۵۰Hz و در بار کامل تنها چند هرتز است .

در اینجا I_{2st} و I_{2fl} به ترتیب جریانهای هر فاز رتور در حالت راه اندازی و بارکامل است . اگر از جریان بی بار صرفنظر شود سپس :

تعداد دور موثر رتور × I_{2st} = تعداد دور موثر استاتور × I_{st}

یا :

$I_{st} = I_{2st}$ (نسبت تعداد دور رتور به استاتور)

$$\frac{I_{st}}{I_{fl}} = \frac{I_{2st}(\text{نسبت تبدیل موثر رتور به استاتور})}{I_{2fl}(\text{نسبت تبدیل موثر رتور به استاتور})}$$

$$\frac{I_{st}}{I_{fl}} = \frac{I_{2st}}{I_{2fl}}$$

از معادله (۶-51 a)

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-51b)$$

اگر V_1 ولتاژ هر فاز استاتور و z_1 مقاومت ظاهری حالت سکون هر فاز ارجاع شده به استاتور باشد ، جریان‌اتصال کوتاه درحال سکون (یا جریان راه اندازی) برابر خواهد بود با :

$$I_{sc} = \frac{V_1}{z_1}$$

بنابراین برای کلید زنی مستقیم (راه اندازی مستقیم بخط) داریم :

$$I_{st} = I_{sc} = \frac{V_1}{z_1}$$

معادله (۶-۵۱) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-52)$$

ب : راه اندازی با مقاومت یا راکتور در استاتور

در این روش طبق شکل ۳۷-۶ مقاومت یا راکتوری بین سرهای موتور و سرهای منبع قرار داده می شود . در لحظه راه اندازی ، ولتاژی روی مقاومت یا راکتور راه انداز افت کرده وتنها کسر x (کمتر از ۱) از ولتاژ منبع روی استاتور ظاهر شده که جریان راه اندازی هر فاز I_{st} موتور را که از منبع می کشد کاهش می دهد . با سرعت گرفتن موتور راکتور به صورت مرحله ای از مدار خارج شده و نهایتاً وقتی سرعت موتور نزدیک سرعت نامی رسید اتصال کوتاه می گردد . از آنجا که ولتاژ هر فاز به xV_1 کاهش یافته طبق شکل ۳۷-۶ جریان راه اندازی هر فاز I_{st} چنین خواهد شد :

$$I_{st} = \frac{xV_1}{z_1} = xI_{sc} \qquad (۶-53)$$

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-543a)$$

همانند سابق :

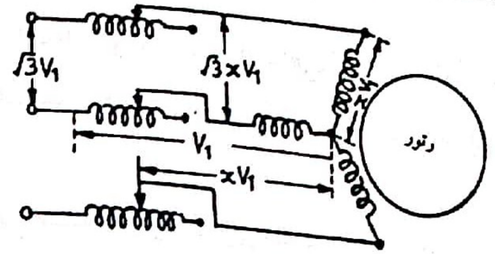
یا :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = x^2 \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-54b)$$

در یک موتور القائی گشتاور متناسب با مجذور ولتاژ است :

$$\frac{\text{گشتاور راه اندازی با راه اندازی راکتوری}}{\text{گشتاور راه اندازی مستقیم به خط}} = \left(\frac{xV_1}{V_1}\right)^2 = x^2 \qquad (۶-55)$$

راکتور سری گرانتر از مقاومت سری است ، ولی راکتور تلفات انرژی کمتر داشته و برای کاهش ولتاژ مؤثرتر است ، زیرا ضریب توان موتور القائی در راه اندازی خیلی کم است .



شکل ۳۷-۶: راه‌اندازی موتور القائی قفس سنجابی با راکتور یا مقاومت

ج : راه اندازی اتو ترانسفورماتور

در این روش در لحظه راه اندازی به کمک اتوترانسفورماتور طبق شکل ۳۸-۶ ولتاژ x برابر ولتاژ منبع V_1 به استاتور اعمال می شود . (x کمتر از یک است) این عمل باعث می شود که جریان موتور و جریان گرفته شده از منبع کاهش یابند . بعد از اینکه موتور به نزدیکی سرعت نامی خود رسید ، اتو ترانسفورماتور از مدار خارج شده و با اتصال مستقیم موتور به منبع ولتاژ کامل خط به موتور القائی می رسد .

با وجود اتوترانسفورماتور جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی موتور برابر است با :

$$= \frac{xV_1}{z_1} = xI_{sc} \qquad (۶-۵۶)$$

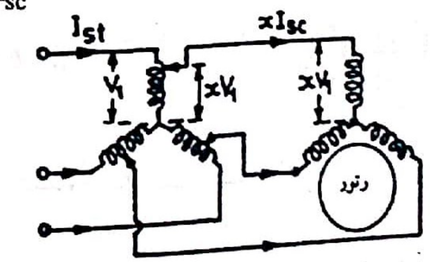
اگر از جریان بی باز اتوترانسفورماتور صرفنظر شود ، VA خروجی هر فاز - اتوترانسفورماتور باید مساوی VA ورودی هر فاز آن باشد لذا :

(جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی موتور) $I_{st}V_1 = xV_1$

یا : $I_{st}V_1 = xV_1\ (xI_{sc})$

جریان راه اندازی از هر فاز منبع برابر است با :

$$I_{st} = x^2 I_{sc} \qquad (۶-۵۷)$$



شکل ۳۸-۶: راه اندازی اتوترانسفورماتور

معادله (۵۶-۶) نشان می دهد که جریان راه اندازی هر فاز موتور تنها به x برابر جریان راه اندازی مستقیم بخط I_{sc} کاهش می یابد . اما جریان راه اندازی هر فاز گرفته شده از منبع به x^2 برابر جریان راه اندازی مستقیم بخط I_{sc} کاهش می یابد بر اساس معادله (۵۱b-۶) :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{(\text{جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی موتور})^2}{(\text{جریان هر فاز بارکامل موتور})^2} \cdot s_{fl}$$

از معادله (۵۶-۶)

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{(xI_{st})^2}{I_{fl}^2} s_{fl}$$

$$= x^2 \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-۵۸)$$

جریان راه اندازی هر فاز I_{st} از منبع را می توان باکمک معادله (۵۷-۶) در معادله (۵۸-۶) وارد کرد . از جانشین کردن مقدار I_{sc} بر حسب I_{st} داریم :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = x^2 \left(\frac{1}{x^2}\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 \cdot s_f$$

$$= \frac{1}{x^2}\left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 \cdot s_f \qquad (۶-۵۹)$$

نسبت گشتاور راه اندازی به گشتاور بارکامل بر حسب I_{st} و I_{sc} را می توان از معادله (۵۸-۶) به صورت زیر بدست آورد :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{(x^2 I_{sc})\, I_{sc}}{I_{fl}^2} \cdot s_f$$

$$= \frac{I_{st}I_{sc}}{I_{fl}^2} \cdot s_f \qquad (۶-۶۰)$$

جریان راه اندازی هر فاز موتور بر حسب I_{st} از معادله (۵۶-۶) عبارتست از :

$$xI_{sc} = x \cdot \frac{1}{x^2} I_{st}$$

$$= \frac{1}{x} I_{st} \qquad (۶-۶۱)$$

در یک موتور القائی گشتاور متناسب با مجذور ولتاژ است :

$$\frac{T_{est} \text{ با اتوترانسفورماتور}}{T_{est} \text{ با راه اندازی مستقیم بخط}} = \left(\frac{xV_1}{V_1}\right)^2 = x^2 \qquad (۶-۶۲)$$

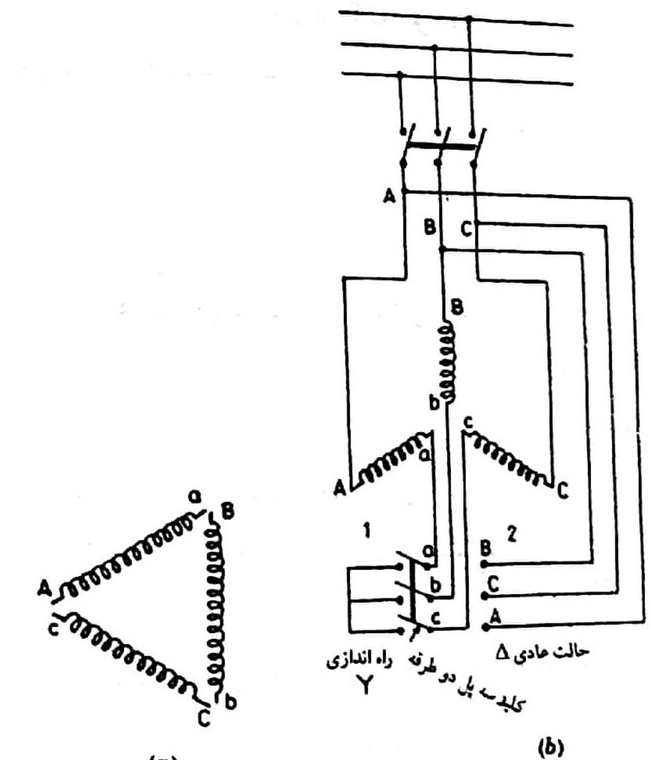
دیده می شود که با اتوترانسفورماتور جریان راه اندازی I_{st} گرفته شده از منبع و گشتاور راه اندازی T_{est} به x^2 برابر مقادیر نظیر در روش راه اندازی مستقیم بخط کاهش می یابد . (معادلات ۵۷-۶ و ۶۲-۶ را ببینید) .

د : راه انداز ستاره - مثلث

این روش راه اندازی برای موتورهائی که برای کار با اتصال مثلث طراحی شده اند به کار می رود . در این روش ۶ سر از سه فاز استاتور طبق شکل (a)۳۹-۶ باید در دسترس باشد .

در این شکل ترمینالهای a و A برای فاز A، b و B برای فاز B، c و C برای فاز C در نظر گرفته شده است علائم تجارتی ترمینالها A_1 و A_2 برای فاز A، B_1 و B_2 برای فاز B، C_1 و C_2 برای فاز C می باشند. شکل (b)۳۹-۶ نمودار ساده راه انداز ستاره – مثلث را نشان می دهد. در این نمودار سه سر استاتور A و B و C و سه سر دیگر استاتور a و b و c به ترمینالهای وسط یک کلید سه قطب دو طرفه (TPDT) وصل شده اند. فازهای استاتور ابتدا با قرار دادن کلید TPDT در وضعیت ۱ به صورت ستاره وصل می شوند و بعد از آنکه حالت دائمی رسید، TPDT به وضعیت ۲ قرار می گیرد و سیم پیچی استاتور را به اتصال مثلث تبدیل می نماید (شکل (b) ۳۹-۶ را ببینید).

در وضعیت ۱ سرهای a و b و c اتصال کوتاهند. در وضعیت ۲ سر a به B، b به C و c به A وصل می شوند.



شکل ۳۹-۶ : راه انداز ستاره – مثلث برای موتور القائی سه فاز قفسی

اگر V_L ولتاژ خطی باشد، جریان راه اندازی هر فاز موتور I_{sty} وقتی استاتور اتصال ستاره دارد عبارتست از :

$$I_{sty} = \frac{V_L}{\sqrt{3} z_1}$$

وقتی اتصال سیم پیچی استاتور ستاره باشد، I_{sty} جریان راه اندازی خط نیز می باشد. اگر اتصال سیم پیچی استاتور مثلث باشد، با راه اندازی مستقیم بخط I_{std} برابر است با :

$$I_{std} = \frac{V_L}{z_1} = I_{scd}$$

و جریان راه اندازی خط با روش راه اندازی مستقیم بخط برابر است با :

$$\sqrt{3}\,\frac{V_L}{z_1} = \sqrt{3}\, I_{std} = \sqrt{3}\, I_{scd}$$

لازم بذکر است که $I_{sty} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{std}$ و اندیس های y و d بترتیب اتصالات ستاره و مثلث سیم پیچی استاتور را نشان می دهند.

$$\frac{\text{جریان راه اندازی با راه انداز ستاره – مثلث}}{\text{جریان راه اندازی در راه اندازی مستقیم بخط اتصال مثلث}} = \frac{I_{sty}}{\sqrt{3} I_{std}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{V_L}{z_1}}{\sqrt{3}\frac{V_L}{z_1}} = \frac{1}{3}$$

لذا در راه انداز ستاره – مثلث جریان راه اندازی از منبع یک سوم جریان راه اندازی مستقیم بخط با اتصال مثلث است همچنین :

$$\frac{\text{گشتاورراه‌اندازی با راه انداز ستاره – مثلث}}{\text{گشتاورراه اندازی باراه اندازی مستقیم بخط اتصال مثلث}} = \frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2}{V_L^2} = \frac{1}{3}$$

و این نشان می دهد که راه انداز ستاره – مثلث گشتاور راه اندازی را به یک سوم حالت راه اندازی مستقیم بخط با اتصال مثلث کاهش می دهد. در راه اندازی اتوترانسفورماتور اگر نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ منبع $\frac{1}{\sqrt{3}}$ باشد، جریان راه اندازی معادله (۵۷-۶) و گشتاور راه اندازی معادله (۶۲-۶) هر دو به یک سوم مقدار نظیر راه اندازی مستقیم بخط با اتصال مثلث تقلیل می یابند. یعنی با راه انداز ستاره – مثلث راه اندازی موتور معادل راه اندازی با اتوترانسفورماتوری است که ضریب تبدیل آن $x = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0/58$ یعنی با تپ ٪۵۸ می باشد.

$$\frac{\text{گشتاورراه‌اندازی با راه انداز ستاره – مثلث } T_{est}}{\text{گشتاور بار کامل با اتصال مثلث در استاتور } T_{efld}} = \frac{\frac{1}{\omega_s}\left(I_{sty}\right)^2 \frac{r_2}{1}}{\frac{1}{\omega_s}\left(I_{fl.d}\right)^2 \frac{r_2}{s_{fl}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_{std}\right)^2}{\left(I_{fld}\right)^2} s_{fl}$$

$$= \frac{1}{3}\left(\frac{I_{scd}}{I_{fld}}\right)^2 \qquad (۶-۶۳)$$

راه انداز ستاره - مثلث در مقایسه با راه اندازی اتوترانسفورماتور ارزانتر است و لذا بسیار کاربرد دارد . برای ولتاژهای خط بزرگتر از ۳/۳ kV راه انداز ستاره - مثلث به کار نمی رود زیرا سیم پیچی استاتور به صورت مثلث تعداد دور زیادی دارد که موتور را گران خواهد کرد .

مثال ۶.۴۵

الف : ثابت کنید که گشتاور راه اندازی بر آمپر خط با راه اندازی اتوترانسفورماتور بزرگتر از مقدار بدست آمده از راه اندازی با راکتور است .

ب : ثابت کنید که گشتاور راه اندازی موتور القائی چند فاز ۱ - با راه اندازی اتوترانسفورماتور با جریان خط به طور خطی تغییر می کند .

۲ - در روش راه اندازی با راکتور استاتور ، جریان راه اندازی خط به طور غیر خطی تغییر می کند . سپس تغییرات گشتاور راه اندازی را بر حسب جریان راه اندازی خط برای موتور القائی با $\frac{I_{sc}}{I_{fl}} = 5$ و لغزش بار کامل ۰/۰۵ رسم کنید .

حل :

الف : گشتاور راه اندازی با راه اندازی اتوترانسفورماتور برابر است با :

$\frac{1}{\omega_s}(xI_{sc})^2 r_2 = \frac{1}{\omega_s}(xI_{sc})^2 r_2$ (جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی موتور) $\frac{1}{\omega_s}$

(معادله ۶-۵۶ را ببینید)

T_{est} بر آمپر خط $[I_{st} = x^2 I_{sc}]$ با توجه به معادله (۶-۵۷) با راه انداز اتوترانسفورماتور برابر است با :

$$\frac{1}{\omega_s}\frac{(xI_{sc})^2}{x^2 I_{sc}} r_2 \qquad (۶-۶۴)$$

$$= \frac{1}{\omega_s} I_{sc} r_2$$

T_{est} با راه انداز راکتور استاتور

$= \frac{1}{\omega_s}$ (جریان راه اندازی هر فاز سیم پیچی) $^2 \frac{r_2}{1}$

$$= \frac{1}{\omega_s} I_{st}^2 \cdot r_2 = \frac{1}{\omega_s}(xI_{sc})^2 r_2$$

معادله (۶-۵۳) را ببینید .

T_{est} بر آمپر خط $(I_{st} = xI_{sc})$ با راه ا ندازی راکتور استاتور برابر است با :

$$= \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{(xI_{sc})^2 r_2}{I_{st}} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{(xI_{sc})^2}{xI_{sc}} \cdot r_2$$

$$= \frac{1}{\omega_s} \cdot xI_{sc}\, r_2$$

$$\frac{T_{est} \text{ برآمپر با راه اندازی اتوترانسفورماتور}}{T_{est} \text{ بر آمپر خط با راه اندازی راکتور استاتور}}$$

$$= \frac{\frac{1}{\omega_s} I_{sc} r_2}{\frac{1}{\omega_s} xI_{sc}\, r_2} = \frac{1}{x}$$

چون x کوچکتر از ۱ است گشتاور راه اندازی بر آمپر خط با راه اندازی اتوترانسفورماتور بیشتر از مقدار بدست آمده از راه اندازی راکتور استاتور است .

ب : برای راه اندازی اتوترانسفورماتور از معادله (۶-۶۰)

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \frac{I_{st} I_{sc}}{I_{fl}^2} s_{fl} \qquad (۶-۶۰)$$

برای راه اندازی راکتور استاتور از معادله (۶-۵۴a)

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (۶-۵۴a)$$

برای موتور القائی با مقادیر نامی معین T_{efl} و s_{fl} و I_{fl} و I_{st} بستگی به طراحی موتور داشته و لذا ثابتند . از اینرو معادله (۶-۶۰) چنین خواهد شد :

$$T_{est} = \left(\frac{T_{efl}}{I_{fl}^2} s_{fl} \cdot I_{sc}\right) I_{st}$$

$$T_{est} = K I_{st} \qquad (۶-۶۵)$$

و معادله (۶-۵۴ a) چنین خواهد شد :

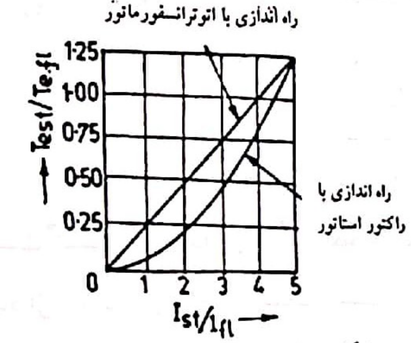
$$T_{est} = \frac{T_{efl}}{I_{fl}^{۲}} \cdot s_{fl} \cdot I_{st}^{۲}$$
$$= K_۱ I_{st}^{۲}$$

(۶-۶۶)

معادله (۶-۶۵) نشان می دهد که برای راه اندازی اتوترانسفورماتور تغییرات گشتاور راه اندازی T_{est} با جریان راه اندازی خط I_{sc} خطی است و برای راه اندازی راکتور استاتور معادله (۶-۶۶) معلوم می دارد که T_{est} با I_{st} بطور غیر خطی تغییر می کند .

برای $\frac{I_{sc}}{I_{fl}} = ۵$ و $s_{fl} = ۰/۰۵$ مقادیر $\frac{T_{est}}{T_{efl}}$ بازاء مقادیر مختلف $\frac{I_{st}}{I_{fl}}$ در جدول زیر داده شده است :

$\frac{\text{جریان راه اندازی}}{\text{جریان بار کامل}} = \frac{I_{st}}{I_{fl}}$		۰	۱	۲	۳	۴	۵
$\frac{T_{est}}{T_{efl}}$	راه اندازی اتوترانسفورماتور معادله (۶-۶۰)	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵
	راه اندازی راکتور استاتور معادله (۶-۵۴ a)	۰	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴۵	۰/۸	۱/۲۵



شکل ۴۰-۶: مربوط به مثال ۴۵-۶

باید توجه داشت وقتی $I_{st} = I_{sc}$ گشتاور راه اندازی از هر دو روش مساوی است . از جدول و شکل ۴۰-۶ دیده می شود که راه اندازی با راکتور استاتور تنها برای مواردی مناسب است که به گشتاور راه اندازی پائین نیاز هست .

مثال ۶.۴۶

یک موتور القائی قفس سنجابی دارای لغزش بار کامل ۰/۰۵ است . جریان راه اندازی موتور در ولتاژ نامی ۶ برابر جریان بار کامل است . تپ اتوترانسفورماتوری را بدست آورید که با آن در راه اندازی گشتاور بار کامل حاصل شود . همچنین جریان خط را در راه اندازی بدست آورید .

حل :

در این موتور جریان راه اندازی I_{sc} برابر $۶ I_{fl}$ است . حال از معادله (۶-۵۸) :

$$\frac{T_{est}}{T_{efl}} = x^{۲} \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}}\right)^{۲} s_{fl}$$
$$۱ = x^{۲} (۶)^{۲} \times ۰/۰۵$$
$$x = \sqrt{\frac{۱}{۱/۸}}$$
$$= ۰/۷۴۵ \text{ یا } ۷۴/۵\ \text{٪ تپ}$$

از معادله (۶-۵۷) جریان راه اندازی خط برابر است با :

$$I_{st} = x^{۲} I_{sc}$$
$$= (۰/۷۴۵)^{۲} (۶ I_{fl}) = ۳/۳۳ I_{fl}$$

مثال ۶.۴۷

یک موتور القائی قفسSس سنجابی سه فاز با اعمال ولتاژ ۴۰٪ جریان رتور قفل شده ۲۵۰٪ و گشتاور راه اندازی ۳۰٪ با مقادیر نامی اش دارد . اگر اتوترانسفورماتور جریان راه اندازی خط را به ۱۵۰٪ جریان بار کامل موتور محدود کند ، درصد گشتاور راه اندازی را محاسبه کنید .

حل :

با ۴۰٪ ولتاژ اعمال شده یا $۰/۴V_۱$ جریان رتور قفل شده ۲/۵ برابر جریان بار کامل است . لذا ولتاژ نامی $V_۱$ جریان رتور قفل شده یا جریان اتصال کوتاه I_{sc} معادل :

$$I_{sc} = \frac{V_۱}{۰/۴V_۱} \times ۲/۵\ I_{fl} = \frac{۲۵}{۴} I_{fl}$$

را خواهد داد .

از معادله (۶-۵۷) دیده می شود جریان راه اندازی هر فاز گرفته شده از منبع $I_{st} = x^{۲} I_{sc}$ است . از آنجاکه جریان راه اندازی خط I_{st} باید به $۱/۵ I_{fl}$ محدود شود داریم :

$$I_{st} = ۱/۵\ I_{fl}$$
$$= x^{۲} \left(\frac{۲۵}{۴} I_{fl}\right)$$

یا :

$$x^{۲} = \frac{۶}{۲۵}$$

حال برای یک موتور القائی :

$$\text{گشتاور راه اندازی} \propto V^{۲}$$

$$T_{est} \propto (۰/۴\ V_۱)^۲$$

$$T_{est} \propto (xV_۱)^۲$$

همچنین

$$T_{est۲} = \left(\frac{xV_۱}{۰/۴V_۱}\right)^۲ (۰/۳\ T_{efl})$$

$$= \frac{x^۲}{۰/۱۶} \times ۰/۳\ T_{efl}$$

$$= \frac{۶}{۲۵} \times \frac{۱}{۰/۱۶} \times ۰/۳\ T_{efl}$$

$$= ۰/۴۵\ T_{efl}$$

گشتاور راه اندازی ۴۵٪ گشتاور بارکامل است .

مثال ۶.۴۸

یک مدار توزیع سه فاز ۴۴۰V طوری طرح شده که بیش از ۱۲۰۰ آمپر را تغذیه نکند . با فرض اینکه یک موتور قفس سنجابی سه فاز بازده بارکامل ۰/۸۵ و ضریب توان بارکامل ۰/۸ و جریان راه اندازی در ولتاژ نامی ۵ برابر جریان بارکامل را داشته باشد ، حداکثر قدرت نامی مجاز موتور چقدر است ؟

الف : اگر موتور با ولتاژ کامل راه بیفتد .

ب : اگر با استفاده از اتوترانسفورماتور با کاهش ولتاژ تا ۸۰٪ راه بیفتد .

ج : اگر با راه انداز ستاره – مثلث راه بیفتد .

حل :

الف : حداکثر جریان مجازی که موتور القائی سه فاز می تواند در راه اندازی مدار توزیع بگیرد ۱۲۰۰A است . جریان راه اندازی در ولتاژ نامی ۵ برابر جریان نامی موتور القائی است . بنابراین جریان نامی خط موتور القائی سه فاز با ولتاژ کامل $\frac{۱۲۰۰}{۵} = ۲۴۰$ A است . از اینرو حداکثر قدرت نامی مجاز موتور القائی در هنگام راه اندازی با ولتاژ کامل :

$$= \sqrt{۳}\ V_۱ I_۱ \cos\theta_۱ \times \text{بازده}$$

$$= \sqrt{۳} \times ۴۴۰ \times ۲۴۰ \times ۰/۸ \times ۰/۸۵\ \text{W} = ۱۲۴/۳۷۱\ \text{kW}$$

ب : از معادله (۶–۵۷) جریان واه اندازی مجاز حداکثر از منبع تولید برابر است با :

$$I_{st} = ۱۲۰۰ = x^۲ I_{sc} = x^۲ (۵I_{fl})$$

$$۱۲۰۰ = ۰/۸^۲ \times ۵I_{fl}$$

$$I_{fl} = \frac{۱۲۰۰}{۰/۸^۲ \times ۵} = ۳۷۵\ \text{A}$$

حداکثر قدرت نامی مجاز موتور القائی :

$$= \sqrt{۳} \times ۴۴۰ \times ۳۷۵ \times ۰/۸ \times ۰/۸۵\ \text{W} = ۱۹۴/۳۳\ \text{kW}$$

ج : راه انداز ستاره مثلث معادل راه اندازی اتوترانسفورماتور با تپ ۵۷/۸٪ است .

$$۱۲۰۰ = ۰/۵۷۸^۲ \times (۵I_{fl})$$

$$= \left(\frac{۱}{\sqrt{۳}}\right)^۲ (۵I_{fl})$$

$$I_{fl} = ۷۲۰\ \text{A}$$

حداکثر قدرت نامی مجاز موتور القائی در اینحالت :

$$= \sqrt{۳}\ (۴۴۰)\ (۷۲۰)\ (۰/۸)\ (۰/۸۵) = ۳۷۳/۱۱۳\ \text{kW}$$

مثال ۶.۴۹

یک موتور القائی سه فاز ۱۰kW و ۴۰۰V دارای بازده بارکامل ۰/۸۷ و ضریب توان ۰/۸۵ است در حال سکون با ولتاژ نامی موتور ۵ برابر جریان بارکامل را می گیرد و ۱/۵ برابر گشتاور بارکامل را در راه اندازی تولید می نماید . از اتوترانسفورماتوری برای کاهش جریان راه اندازی استفاده می شود و گشتاور بارکامل را در راه اندازی تولید می نماید . با صرفنظر کردن از جریان تحریک اتوترانسفورماتور در راه اندازی :

الف : ولتاژ اعمالی به موتور را تعیین کنید .

ب : جریان گرفته شده توسط موتور و

ج : جریان خط گرفته شده از منبع را حساب کنید .

حل :

الف : گشتاور الکترومغناطیسی T_e متناسب با مجذور ولتاژ است .

$$T_{est۱} = ۱/۵T_{efl} \propto (۴۰۰)^۲$$

$$T_{est۲} = T_{efl} \propto (V_۱)^۲$$

$$\frac{T_{est۱}}{T_{est۲}} = \frac{۱/۵T_{efl}}{T_{efl}}$$

$$= \left(\frac{۴۰۰}{V_۱}\right)^۲$$

$$V_۱ = \frac{۴۰۰}{\sqrt{۱/۵}} = ۳۲۶/۶\text{V}$$

ب : بازای ۴۰۰V جریان راه اندازی موتور :

$$= 5I_{fl}$$

برای ۳۲۶/۶V جریان راه اندازی موتور :

$$= 5I_{fl}\frac{326/6}{400} = 4/0825\ I_{fl}$$

حال جریان بار کامل موتور :

$$I_{fl} = \frac{10000}{\sqrt{3}\times 400\times 0/87\times 0/85} = 19/52\ A$$

جریان راه اندازی موتور :

$$= 4/08\times 19/52 = 79/6904\ A$$

ج : در ثانویه ترانسفورماتور جریان موتور ۷۹/۶۴ A و ولتاژ ثانویه ۳۲۶/۶V است . بنابراین جریان در مدت اولیه اتوترانسفورماتور ۴۰۰V برابر است با :

$$\frac{326/6}{400}\times 79/64 = 65/03\ A$$

جریان گرفته شده از منبع ۶۵/۰۳ A است .

جریان گرفته شده از منبع را نیز می توان با استفاده از معادله (۵۷–۶) بدست آورد . این مثال را نیز می توان ابتدا با محاسبه $s_{fl} = 0/06$ و استفاده از معادله (۵۸–۶) برای x حل کرد .

مثال ۶.۵۰

یک موتور القائی سه فاز قفس سنجابی دارای گشتاور حداکثری معادل ۲ برابر گشتاور بار کامل است . نسبت گشتاور راه اندازی موتور به گشتاور بار کامل را وقتی به صورتهای زیر راه بیفتد تعیین کنید :

الف : راه اندازی مستقیم بخط

ب : راه اندازی ستاره – مثلث

ج : راه اندازی اتوترانسفورماتور با تپ ۷۰٪

مقاومت هر فاز رتور و مقاومت القائی سکون هر فاز رتور ارجاع شده به استاتور بترتیب ۰/۲Ω و ۲Ω است . از مقاومت ظاهری استاتور صرفنظر کنید .

حل :

الف : با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور لغزشی که در آن گشتاور حداکثر رخ می دهد برابر است با :

$$s_{mT} = \frac{r_2}{x_2} = \frac{0/2}{2} = 0/1$$

حال :

$$\frac{T_{est}}{T_{em}} = \frac{2}{\frac{s_{mT}}{1}+\frac{1}{s_{mT}}} = \frac{2}{\frac{0/1}{1}+\frac{1}{0/1}} = \frac{2}{10/1}$$

$$T_{est} = \frac{2}{10/1}(2T_{efl}) = 0/396\ T_{efl}$$

ب : با راه اندازی ستاره – مثلث گشتاور راه اندازی یک سوم گشتاور راه اندازی مستقیم بخط است .

$$T_{est} = \frac{1}{3}(0/396\ T_{efl})$$
$$= 0/132\ T_{efl}$$

ج : با راه اندازی اتوترانسفورماتور از معادله (۶۲–۶) داریم :

$$T_{est} = 0/7^2\times 0/396\ T_{efl}$$
$$= 0/194\ T_{efl}$$

مثال ۶.۵۱

یک موتور القائی ۴۰kW با راه انداز ستاره – مثلث توسط خط تغذیه ای از منبع ۴۰۰V و ۵۰Hz تغذیه می کند . به علت افت خط گشتاور راه اندازی با اتصال ستاره و مثلث برابر است . مقاومت خط تغذیه را تعیین کنید . از آزمایش اتصال کوتاه نتایج زیر بدست آمده است . V = ۲۰۰V ، I= ۱۰۰A و ضریب توان = ۰/۴ (تمام مقادیر خطی است) . اگر خط تغذیه دومی با همان سطح مقطع موازی با خط اول کار کند ، درصد افزایش گشتاور راه اندازی را) برای هر اتصال پیدا کنید .

حل :

پارامترهای مدار معادل موتور القائی را می توان از آزمایش اتصال کوتاه بدست آورد :

$$Z_{sc} = \frac{200\sqrt{3}}{100} = 3/464\ \Omega$$
$$R_{sc} = Z_{sc}\cos\theta_{sc} = 3/464\times 0/4 = 1/386\ \Omega.$$
$$X_{sc} = \sqrt{3/464^2 - 1/386^2} = 3/175\ \Omega$$

اگر R مقاومت هر خط تغذیه باشد

$$\text{گشتاورراه‌اندازی بااتصال ستاره} = \frac{3}{\omega_s}\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2\frac{1}{\left[(R+1/386)+3/175^2\right]}\times 1/386 \qquad (1)$$

وقتی سیم پیچی استاتور مثلث باشد ، اتصال مثلث متعادل را باید با اتصال ستاره

معادلش جایگزین کرد به طوریکه هر فاز ستاره با هر خط تغذیه سری شود . بنابراین گشتاور راه اندازی با اتصال مثلث چنین است :

$$= \frac{۳}{\omega_s}\left(\frac{۴۰۰}{\sqrt{۳}}\right)^۲ \frac{۱}{\left(R+\frac{۱/۳۸۶}{۳}\right)^۲ + \left(\frac{۳/۱۷۵}{۳}\right)^۲} \times \frac{۱/۳۸۶}{۳} \qquad (۲)$$

از معادلات ۱ و ۲ برای همان گشتاور راه اندازی :

$$\left(R+۱/۳۸۶\right)^۲ + \left(۳/۱۷۵\right)^۲ = \left[\left(R+\frac{۱/۳۸۶}{۳}\right)^۲ + \left(\frac{۳/۱۷۵}{۳}\right)^۲\right]^۳$$

که از حل آن $R = ۲\Omega$ بدست می آید .

گشتاور راه اندازی قبلی با اتصال ستاره و یک خط تغذیه بدست می آید :

$$= \frac{۳}{\omega_s} \frac{۲۳۱^۲}{۳/۳۸۶^۲ + ۳/۱۷۵^۲} \times ۱/۳۸۶ = ۰/۰۴۶۴\,K$$

که :

$$K = \frac{۳\,(۲۳۱)^۲}{\omega_s} \times ۱/۳۸۶$$

گشتاور راه اندازی جدید با اتصال ستاره و دو خط تغذیه موازی بدست می آید .

$$= \frac{۳}{\omega_s} \frac{۲۳۱^۲}{۳/۳۸۶^۲ + ۳/۱۷۵^۲} \times ۱/۳۸۶ = ۰/۰۶۳۴\,K$$

درصد افزایش گشتاور راه‌اندازی بااتصال ستاره :

$$= \frac{۰/۰۶۳۴K - ۰/۰۴۶۴K}{۰/۰۴۶۴K} \times ۱۰۰ = ۳۶/۶۴\,٪$$

گشتاور راه اندازی قبلی با اتصال مثلث و یک خط تغذیه :

$$= \frac{۳}{\omega_s} \frac{۲۳۱^۲}{\left(۲+\frac{۱/۳۸۶}{۳}\right)^۲ + \left(\frac{۳/۱۷۵}{۳}\right)^۲} \times \frac{۱/۳۸۶}{۳} = ۰/۱۳۹۲K_۱$$

که در آن

$$K_۱ = \frac{۳}{\omega_s}\frac{۲۳۱^۲}{۳} \times ۱/۳۸۶$$

گشتاور راه اندازی جدید با اتصال مثلث و دو خط تغذیه موازی :

$$= \frac{۳}{\omega_s} \frac{۲۳۱^۲}{\left(۱+\frac{۱/۳۸۶}{۳}\right)^۲ + \left(\frac{۳/۱۷۵}{۳}\right)^۲} \cdot \frac{۱/۳۸۶}{۳} = ۰/۳۰۷\,K_۱$$

درصد افزایش گشتاور راه اندازی با اتصال مثلث :

$$= \frac{۰/۳۰۷K_۱ - ۰/۱۳۹۲K_۱}{۰/۱۳۹۲K_۱} \times ۱۰۰ = ۱۲۰/۵۵\,٪$$

مثال ۶.۵۲

یک موتور القائی سه فاز ۴۰kW دارای مقاومت ظاهری حالت سکون $۱/۲ + j۳\ \Omega/ph$ است . موتور از طریق خط تغذیه ۵۰۰ متری از منبع ۴۰۰V و ۵۰Hz تغذیه می شود . حداقل مقدار مجاز سطح مقطع هر هادی خط تغذیه را برای اینکه گشتاور راه اندازی در اثر افت ولتاژ در خط ۳۰٪ بیشتر کاهش نیابد تعیین کنید . ماشین با راه انداز ستاره – مثلث راه اندازی می شود . مقاومت مخصوص خط تغذیه را $۰/۰۲\ \Omega/m/mm^۲$ بگیرید .

حل :

گشتاور راه اندازی بدون خط تغذیه :

$$= \frac{۳V^۲}{\omega_s} \frac{۱}{۱/۲^۲ + ۳^۲} \times ۱/۲ \qquad (۱)$$

اگر R مقاومت هر خط تغذیه باشد . گشتاور راه اندازی وقتی از طریق خط تغذیه می شود برابر است :

$$= \frac{۳V^۲}{\omega_s} \frac{۱}{(R+۱/۲^۲) + ۳^۲} \times ۱/۲ \qquad (۲)$$

گشتاور راه اندازی وقتی موتور از خط تغذیه می شود حداقل باید ۰/۷ گشتاور راه اندازی توسط معادله (۱) باشد از معادلات ۱ و ۲ داریم :

$$= \frac{۱}{(R+۱/۲)^۲ + ۳^۲} = \frac{۰/۷}{۱/۲^۲ + ۳^۲}$$

$$R^۲ + ۲/۴R - ۴/۴۷۴۳ = ۰$$

یا $R = ۱/۲۳۲\ \Omega$

حال $\frac{\rho L}{A} = \frac{۰/۰۲ \times ۵۰۰}{A} = ۱/۲۳۲\,\Omega \Rightarrow A = ۸/۱۱۷\ mm^۲$

بنابراین حداقل سطح مقطع مجاز هر هادی خط تغذیه $۸/۱۱۷\ mm^۲$ است .

مثال ۶.۵۳

الف : یک موتور القائی قفس سنجابی سه فاز 5kW به یک راه انداز ستاره – مثلث خودکار

مجهز شده است . راه انداز با خطا روبرو می شود و لذا موتور به گردش خود با سیم پیچی ستاره در استاتور ادامه می دهد . ظرفیت موتورالقائی وقتی به صورت ستاره می چرخد چقدر است ؟ از تلفات موتور صرفنظر می شود .

ب : اشکال راه انداز ستاره – مثلث چیست ؟ و چگونه این اشکال بر طرف می گردد .

ج : یک موتور القائی سه فاز قفس سنجابی به یک راه انداز ستاره – مثلث مجهز است . در بارهای کم اگر سیم پیچی استاتور به صورت ستاره درآید . ضریب توان آن بهبود پیدا می کند چرا ؟

در حالتی که موتور القائی با اتصال مثلث بار کامل باشد به صورت ستاره درآید . ضریب توان ، جریان خط و بازده چه تغییری می کند استدلال کنید .

حل :

الف : از آنجا که موتور القائی به راه انداز ستاره – مثلث مجهز شده است ، موتور با اتصال ستاره در استاتور طرح شده تا 5kW تولید کند . اگر ولتاژ فاز و جریان با اتصال مثلث V_1 و I_1 باشد : $V_1 I_1 \cos\theta_1 = 5kW$ خواهد بود .

وقتی سیم پیچی موتور ستاره باشد ، مقدار ولتاژ فاز به $\frac{V_1}{\sqrt{3}}$ می رسد اما جریان نامی فاز I_1 باقی می ماند . لذا قدرت نامی موتور القائی وقتی به صورت ستاره درآید برابر است با $3\frac{V_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos\theta_1 = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2/887\ kW$ فرض می شود که ضریب توان موتور از اتصال مثلث به ستاره بدون تغییر می ماند .

ب : در راه انداز معمولی ستاره – مثلث در هنگام تغییر اتصال از ستاره به مثلث سیم پیچی استاتور از منبع قطع می شود . در این زمان کوتاه (۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه) سرعت موتور عملاً" تغییر نمی کند . بمجرد اینکه استاتور از منبع قطع شد ، میدان مغناطیسی دوار مجاز نیست که با جریانهای القائی در میله های رتور از بین برود . این میدان دوار ولتاژهائی در سیم پیچی استاتور که موقتاً" مدار باز شده القاء می کند که فرکانس این ولتاژ $f(1-s)$ است .

وقتی کلید ستاره – مثلث سیم پیچی را به صورت مثلث درمی آورد ، زاویه فاز زمانی بین ولتاژ منبع و ولتاژ القائی در استاتور مقداری بین صفر و ۱۸۰° است . در حالتی که زاویه زمانی صفر است ، ولتاژ منبع و ولتاژ القائی در استاتور جمع جبری می شود و موج جریان بزرگی در فازها ملاحظه می شود .

این اشکال را می توان با استفاده ا ز نوعی راه انداز ستاره – مثلث اصلاح شده برطرف

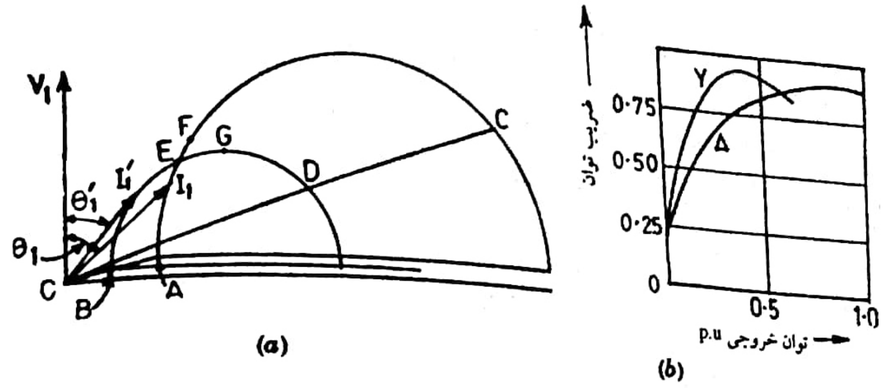
کرد ، این راه انداز جریان را در هنگام تغییر از ستاره به مثلث قطع نمی کند . چنین راه اندازی طبیعتا" پیچیده تر و در نتیجه گرانتر خواهد بود .

ج : در شکل ۴۱-۶ بازاء ولتاژ فاز V_1 OA جریان بی بار استاتور با اتصال مثلث می باشد ، وقتی راه‌انداز به صورت ستاره در می آید ولتاژ فاز $\frac{V_1}{\sqrt{3}}$ شده و جریان بی بار به OB می رسد . اگر اشباع وجود نداشته باشد ، OB معادل $\frac{1}{\sqrt{3}}$ OA است ولی با در نظر گرفتن اشباع OB خیلی کمتر از $\frac{1}{\sqrt{3}}$ OA است . آزمایش رتور قفل شده نقطه C را با اتصال مثلث سیم پیچی و نقطه D را با اتصال ستاره سیم پیچی بدست می دهد . دایره مکان جریان گذرنده از C قطر $\frac{V_1}{x_1 + x_2}$ داشته وقطر دایره گذرنده از D $\frac{V_1}{\sqrt{3}(x_1 + x_2)}$ است . برای هر قدرت خروجی معین (کمتر از مقدار متناظر با نقطه E) I_1 جریان استاتور با سیم پیچی مثلث و I'_1 جریان استاتور با اتصال ستاره است . لازم بذکر است که ضریب توان کار $\cos\theta'_1$ با اتصال ستاره در استاتور بهتر از ضریب توان $\cos\theta_1$ با اتصال مثلث است . برای قدرت خروجی کمتر از نظیر نقطه E ضریب توان با اتصال ستاره بهتر است . اما برای قدرت خروجی بزرگتر از نقطه E ضریب توان کار با اتصال مثلث بهتر است . در نقطه E ضریب توان برای اتصال ستاره مثلث در استاتور یکی است . شکل (b) ۴۱-۶ را ببینید . در بارهای کم (۳۰ تا ۵۰٪ بارکامل) اتصال سیم پیچی به صورت ستاره ، تلفات گوناگون کاهش دارد (زیرا OB < OA و $I'_1 < I_1$) و در نتیجه بازده بهتر از حالتی است که سیم پیچی مثلث باشد .

در اتصال مثلث سیم پیچی استاتور، قدرت خروجی بار کامل بزرگتر از مقدار متناظر با نقطه E است . در شکل (a) ۴۱-۶ اگر این نقطه کار F باشد ، وقتی سیم پیچی استاتور به ستاره تغییر اتصال می یابد نقطه F به G می رسد که نشان می دهد کار با اتصال ستاره در بار کامل ضریب توان در مقایسه با اتصال مثلث کمتر است و جریان از OF به OG افزایش می یابد . در نتیجه تلفات با اتصال ستاره در بار کامل بیشتر و بازده کمتر از حالتی است که اتصال مثلث بوده و بار کامل باشد .

۶-۱۳-۲ روشهای راه اندازی موتور رتور سیم پیچی شده

روشهای راه اندازی موتور های قفس سنجابی را نیز می توان برای راه اندازی موتورهای



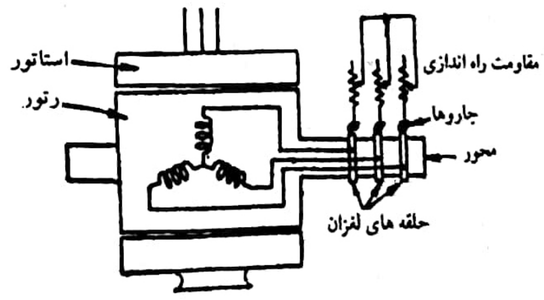
شکل ۴۱-۶: مربوط به مثال ۵۳-۶ هر دو شکل اثر تغییر اتصال استاتور را از مثلث به ستاره نشان می دهند .

با رتور سیم پیچی شده به کار گرفت ، ولی معمولاً" به کاربرده نمی شوند زیرا مزایای موتور القائی رتور سیم پیچی شده کاملاً" نمی تواند بالفعل شود . ساده ترین و ارزانترین روش راه اندازی موتور رتور سیم پیچی شده اضافه کردن مقاومت در مدار رتور با اعمال ولتاژ کامل به سرهای استاتور است . قبلاً" بحث شد که در زمان راه اندازی اضافه کردن مقاومت خارجی در مدار رتور موتور القائی با رتور سیم پیچی شده :

۱ - جریان راه اندازی آنرا کاهش می دهد .

۲ - گشتاور راه اندازی آنرا افزایش می دهد (برای مقاومت خارجی مناسب)

۳ - ضریب توان راه اندازی آنرا بهبود می دهد .



شکل ۴۲-۶: اضافه کردن مقاومت خارجی در مدار رتور موتور القائی با رتور سیم پیچی شده

سرهای سیم پیچی رتور موتور رتور سیم پیچی شده به سه حلقه لغزان که روی محور سوار شده و نسبت به آن عایق شده اند وصل گردیده است .

جاروها روی حلقه های لغزان با فشار تکیه دارند و سرهای خروجی آنها به مقاومتهای خارجی طبق شکل ۴۲-۶ وصل می شوند . در لحظه راه اندازی مقاومت خارجی به طور

کامل در مدار رتور قرار دارد . با سرعت گرفتن رتور مقاومت خارجی بصورت مرحله ای کاهش می یابد به طوری که گشتاور موتور تمایل دارد در هنگام شتاب گرفتن حداکثر باقی بماند . در نهایت تحت شرایط کار عادی مقاومت خارجی به طور کامل از مدار خارج شده و حلقه های لغزان اتصال کوتاه می شوند به طوریکه موتور در لغزش کمی که برای آن طراحی شده گشتاور بار کامل را تولید کند .

محاسبه بخش های مقاومت راه انداز

یک فاز رتور موتور القائی رتور سیم پیچی شده را در نظر بگیرید که دارای مقاومت اهمی r_2 و مقاومت القائی پراکندگی حالت سکون x_2 است .

اگر R_1 و R_2 و R_3 و .... R_n مقاومتهای n بخش و R'_1 و R'_2 و R'_3 و ..... R'_n و R'_{n+1} بترتیب مقاومتهای کل مدار رتور در نقاط اتصال (انشعابات) ۱ و ۲ و ۳ و ..... n و (n+۱) ام باشد (شکل (a) ۴۳-۶) داریم :

$$R'_1 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \ldots\ldots\ldots\ldots + R_{n-1} + R_n + r_2$$

$$R'_2 = R_2 + R_3 + R_4 + \ldots\ldots\ldots\ldots + R_{n-1} + R_n + r_2$$

$$R'_3 = R_3 + R_4 + \ldots\ldots\ldots\ldots + R_{n-1} + R_n + r_2$$

$$\vdots$$

$$R'_{n+1} = r_2$$

شکل (a) ۴۳-۶ راه انداز n عنصری ، n بخشی ، (n+۱) دکمه ای یا راه انداز n مرحله ای را نشان می دهد .

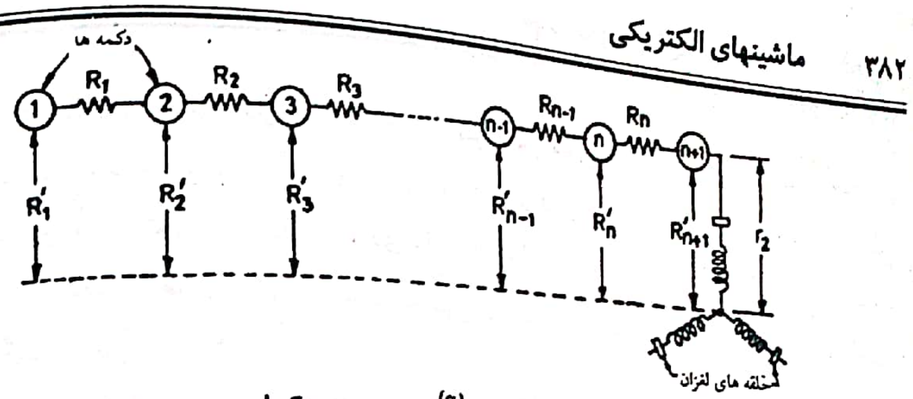
برای محاسبه بخشهای مقاومت فرض های زیر را خواهیم داشت :

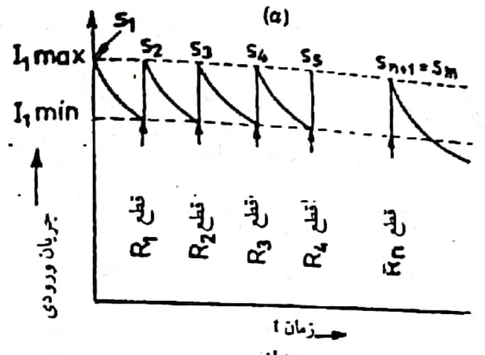
۱ - در هنگام راه اندازی گشتاور بار ثابت فرض می شود .

۲ - از مقاومت ظاهری پراکندگی استاتور و جریان بی بار آن صرفنظر می شود

۳ - جریان استاتور طبق شکل (b) ۴۳-۶ بین حدود ثابت I_{1max} (مقدار حداکثر) و I_{1min} (حداقل) تغییر می کند .

در لحظه راه اندازی دسته متحرک در نقطه اتصال ۱ قرار دارد و مقاومت مدار رتور R'_1 می باشد . وقتی منبع به استاتور وصل می شود جریان ورودی به I_{1max} بالا می رود که مقدار آن برابر است با :





شکل ۴۳-۶: (a) مربوط به طراحی راه انداز موتور القائی با رتور سیم پیچی شده
(b) تغییرات جریان ورودی با زمان

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_1}{s_1}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۶۷)$$

باید توجه داشت در لحظه راه اندازی لغزش $s_1 = 1$ است .

در نقطه اتصال اول R'_1 تا وقتی موتور راه می افتد ثابت می ماند و جریان از I_{1max} افت می کند . در همان زمان لغزش از s_1 به s_2 افت می کند .

$$I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_1}{s_2}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۶۸)$$

بمجرد اینکه در نقطه اتصال ۱ جریان به I_{1min} برسد ، مقاومت R_1 با حرکت دادن اهرم (دسته رئوستا) از نقطه ۱ به ۲ از مدار خارج می شود . در مرحله قطع (حرکت دسته رئوستا از یک نقطه اتصال به نقطه اتصال بعدی) سرعت ثابت فرض می شود یعنی لغزش s_2 باقی می ماند ولی جریان در نقطه اتصال ۲ I_{1max} خواهد شد . شکل (b) ۴۳-۶

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_2}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۶۹)$$

در نقطه اتصال ۲ سرعت طوری افزایش می یابد که لغزش s_2 شده و جریان به I_{1min} کاهش

می یابد :

$$I_{1min} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_2}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۷۰)$$

در مرحله قطع بعدی یعنی در نقطه اتصال سوم وقتی R_2 از مدار خارج می شود

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_3}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۷۱)$$

و

$$I_{1min} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_4}\right)^2 + x_2^2}} \qquad (۶-۷۲)$$

و بهمین ترتیب :

از معادلات (۶-۶۷) و (۶-۶۹) و (۶-۷۱) و غیره داریم :

$$I_{1max} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_1}{s_1}\right)^2 + x_2^2}}$$

$$= \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_2}\right)^2 + x_2^2}}$$

$$= \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_3}\right)^2 + x_2^2}}$$

از روابط بالا داریم :

$$\frac{R'_1}{s_1} = \frac{R'_2}{s_2} = \frac{R'_3}{s_3} = \ldots\ldots$$
$$= \ldots\ldots = \frac{R'_n}{s_n} = \frac{R'_{n+1}}{s_{n+1}} = \frac{r_2}{s_m} \qquad (۶-۷۳)$$

که در آن $s_m = s_{n+1}$ لغزش در شرایط کار عادی است یعنی وقتی تمام مقاومت خارجی که در مدار بود به صفر می رسد (از مدار خارج می شود) و جریان ورودی I_{1max} است .

از معادلات (۶-۶۸) و (۶-۷۰) و (۶-۷۲) و غیره داریم :

$$\frac{R'_1}{s_2} = \frac{R'_2}{s_3} = \frac{R'_3}{s_4}$$
$$= \ldots\ldots = \frac{R'_{n-1}}{s_n} = \frac{R'_n}{s_{n+1}} = \frac{R'_n}{s_m} \qquad (۶-۷۴)$$

از معادله (۶-۷۳) داریم :

$$\frac{s_۲}{s_۱} = \frac{s_۳}{s_۲} = \frac{s_۴}{s_۳}$$

$$= \text{.....} = \frac{s_n}{s_{n-۱}} = \frac{s_{n+۱}}{s_n} = \frac{s_m}{s_n}$$

$$= \frac{R'_۲}{R'_۱} = \frac{R'_۳}{R'_۲} = \frac{R'_۴}{R'_۳} =$$

$$= \text{.....} = \frac{R'_{n-۱}}{R'_{n-۱}} = \frac{R'_n}{R'_{n-۱}}$$

$$= \frac{R'_{n+۱}}{R'_n} = \frac{r_۲}{R'_n} = \alpha$$

(۶-۷۵)

از آنجاکه $s_۱ = ۱$ است مقاومت کل در مدار رتور در اولین مرحله (یا اولین نقطه اتصال) از معادله (۶-۷۳) چنین است :

$$R'_۱ = \frac{s_۱}{s_m} r_۲ = \frac{r_۲}{s_m}$$

(۶-۷۶)

از معادله (۶-۷۵)

$$R'_۲ = R'_۱ \alpha \, , R'_۳ = R'_۲ \alpha = R'_۱ \alpha^۲$$

$$R'_۴ = R'_۳ \alpha \, , R'_۲ \alpha = R'_۱ \alpha^۳$$

⋮

$$R'_{n+۱} = R'_۱ \alpha^n$$

$$r_۲ = R'_۱ \alpha^n$$

(۶-۷۷)

از جانشین کردن مقدار $R'_۱$ از معادله (۶-۷۶) در معادله (۶-۷۷) داریم :

$$r_۲ = (\frac{r_۲}{s_m}) \alpha^n$$

یا

$$\alpha^n = s_m$$

یا (۶-۷۸)

$$\alpha = (s_m)^{\frac{۱}{n}}$$

مقاومتهای بخشهای رئوستا عبارتند از :

(۶-۷۹)

$$R_۱ = R'_۱ - R'_۲ = R'_۱ (۱ - \alpha)$$

$$R_۲ = R'_۲ - R'_۳$$

$$= R'_۲ (۱ - \alpha) = \alpha R'_۱ (۱ - \alpha) = \alpha R_۱$$

$$R_۳ = R'_۳ - R'_۴ = R'_۳ (- \alpha)$$

$$= \alpha R'_۲ (۱ - \alpha) = \alpha^۲ R_۱$$

بهمین ترتیب :

$$R_۴ = \alpha^۲ R_۱$$

⋮

$$R_n = \alpha^{n-۱} R_۱$$

(۶-۸۰)

لغزش $s_m = s_{fl}$ است بشرط اینکه $I_{۱max} = I_{fl}$ باشد . در حالتی که $I_{۱max}$ با I_{fl} اختلاف داشته باشد ، لغزش s_m بهمان ترتیب محاسبه شده و سپس از معادله (۶-۷۸) α بدست می آید . با تعیین $R'_۱$ با استفاده از معادله (۶-۷۶) اولین بخش مقاومت $R_۱$ یا استفاده از معادله (۶-۷۹) محاسبه شده و سپس $R_۲$ و $R_۳$ و $R_۴$ و ... را می توان از معادله (۶-۸۰) بدست آورد .

مثال ۶.۵۴

مقدار بخش های مقاومت راه انداز ۴ مرحله ای را برای موتور القائی سه فاز ۴۰۰V با رتور سیم پیچی شده محاسبه کنید . لغزش بارکامل ۳٪ و جریان راه اندازی حداکثر به مقدار بارکاملش محدود می گردد . مقاومت هر فاز رتور ۰/۰۱۵Ω است .

حل :

برای راه‌انداز ۴ مرحله‌ای ۴ بخش وجود دارد یعنی $n = ۴$ و لذا $s_m = s_{fl} = ۳\% = ۰/۰۳$.

از معادله (۶-۷۸) :

$$\alpha = (s_m)^{\frac{۱}{n}}$$

$$= (۰/۰۳)^{\frac{۱}{۴}} = ۰/۴۱۶$$

از معادله (۶-۷۶) :

$$R'_۱ = \frac{r_۲}{s_m} = \frac{۰/۰۱۵}{۰/۰۳}$$

$$= ۰/۵ \, \Omega$$

مقاومت بخش های مختلف عبارتند از :

$$R_۱ = R'_۱ (۱ - \alpha)$$

$$= ۰/۵ (۱ - ۰/۴۱۶) = ۰/۲۹۲ \, \Omega$$

$$R_۲ = \alpha R_۱$$

$$= ۰/۴۱۶ \times ۰/۲۹۲ = ۰/۱۲۱ \, \Omega$$

$$R_۳ = \alpha^۲ R_۱ = \alpha R_۲$$
$$= ۰/۴۱۶ \times ۰/۱۲۱ = ۰/۰۵۱\ \Omega$$
$$R_۴ = \alpha^۳ R_۱ = \alpha R_۳$$
$$= ۰/۴۱۶ \times ۰/۰۵۱ = ۰/۰۲۱\ \Omega$$

به عنوان امتحان مجموع $R_۱$ و $R_۲$ و $R_۳$ و $R_۴$ و $r_۲$ باید معادل $R'_۱$ باشد .

$$R_۱ + R_۲ + R_۳ + R_۴ + r_۲ = ۰/۲۹۲ + ۰/۱۲۱ + ۰/۰۵۱ + ۰/۰۲۱ + ۰/۰۱۵ = ۰/۵\Omega = R'_۱$$

که در اینجا

مثال ۶.۵۵

راه انداز ۵ قسمتی با ۶ نقطه اتصال را برای موتور القائی سه فاز رتور سیم پیچی شده طراحی کنید . لغزش بار کامل ٪ ۲ و جریان راه اندازی حداکثر به دو برابر جریان بار کامل محدود می گردد . مقاومت رتور هر فاز ۰/۰۳Ω است .

حل : جریان رتور

$$I_۲ = \frac{E_۲}{\sqrt{\left(\frac{r_۲}{s}\right)^۲ + x_۲^۲}}$$

برای مقادیر کوچک لغزش :

$$\frac{r_۲}{s} >> x_۲$$

بر این اساس :

$$I_۲ = \frac{E_۲}{r_۲} s$$

$$I_{۲fl} = \frac{E_۲}{r_۲} s_{fl} = \frac{E_۲}{r_۲} (۰/۰۲)$$

از آنجاکه جریان راه اندازی به دو برابر جریان بار کامل محدود می شود داریم :

$$۲ (I_{۲fl}) = \frac{E_۲}{r_۲} (s_m)$$
$$۲ \left[\frac{E_۲}{r_۲} (۰/۰۲)\right] = \frac{E_۲}{r_۲} (s_m)$$
$$s_m = ۰/۰۴$$

تعداد بخشها $n = ۵$ از معادله (۶-۷۸) :

$$\alpha = (s_m)^{\frac{۱}{n}} = (۰/۰۴)^{\frac{۱}{۵}}$$

$$= ۰/۵۲۵$$

مقاومت بخشهای مختلف عبارتند از :

$$R_۱ = R'_۱ (۱ - \alpha) = ۰/۷۵ (۱ - ۰/۵۲۵) = ۰/۳۵۶\ \Omega$$
$$R_۲ = \alpha R_۱ = ۰/۵۲۵ \times ۰/۳۵۶ = ۰/۱۸۷\ \Omega$$
$$R_۳ = \alpha^۲ R_۱ = \alpha R_۲ = ۰/۵۲۵ \times ۰/۱۸۷ = ۰/۰۹۸\ \Omega$$
$$R_۴ = \alpha^۳ R_۱ = \alpha R_۳ = ۰/۵۲۵ \times ۰/۰۹۸ = ۰/۰۵۲\ \Omega$$
$$R_۵ = \alpha^۴ R_۱ = \alpha R_۴ = ۰/۵۲۵ \times ۰/۰۵۲ = ۰/۰۲۷\ \Omega$$
$$r_۲ = ۰/۰۳\ \Omega$$
$$\text{جمع کل} = ۰/۷۵\ \Omega$$

که این مقاومت کل برابر $R'_۱$ است .

مثال ۶.۵۶

یک موتور القائی رتور سیم پیچی شده ۲۰۰ kW و ۳۳۰۰V و ۶ قطب ۵۰Hz در استاتور و رتور اتصال ستاره دارد . نسبت تبدیل استاتور به رتور ۳/۲ است . مقاومت اهمی و مقاومت القائی پراکندگی رتور بترتیب ۰/۱Ω و ۱Ω است . با صرفنظر کردن از مقاومت ظاهری استاتور الف : جریان و گشتاور راه اندازی را با ولتاژ نامی و با اتصال کوتاه بودن حلقه های لغزان پیدا کنید . ب : مقاومت خارجی لازم برای کاهش جریان راه اندازی بروش اتصال مستقیم بخط به ۵۰A پیدا کنید . گشتاور راه اندازی را تحت این شرایط محاسبه کنید .

حل :

$r_۲$ ارجاع شده به استاتور :

$$= (۳/۲)^۲ \times ۰/۱ = ۱/۰۲۴\ \Omega$$

$x_۲$ ارجاع شده به استاتور

$$= (۳/۲)^۲ \times ۱ = ۱/۰۲۴\ \Omega$$

$$\omega_s = \frac{۴\pi f}{p} = \frac{۴\pi \times ۵۰}{۶}$$
$$= \frac{۱۰۰\pi}{۳}\ \text{rad/sec}$$
$$I_{st} = \frac{۳۳۰۰/\sqrt{۳}}{\sqrt{۱/۰۲۴^۲ + ۱۰/۲۴^۲}}$$

$$= ۱۸۵/۱۴ \text{ A}$$

$$T_{est} = \frac{۲}{\omega_s} I_{st}^{۲} r_۲$$

$$= \frac{۳ \times ۳}{۱۰۰\pi} (۱۸۵/۱۴)^{۲} \; ۱/۰۲۴$$

$$= ۱۰۰۵/۵ \text{ Nm}$$

ب : اگر R مقاومت خارجی وارد شده بر فاز مدار رتور باشد :

$$I_{st} = \frac{۳۳۰۰/\sqrt{۳}}{\sqrt{(۱/۰۲۴ + R)^{۲} + ۱۰/۲۴^{۲}}} = ۵۰ \text{ A}$$

$$R = ۳۵/۶۸۱ \; \Omega$$

یا :

R ارجاع شده به رتور : $\frac{۳۵/۶۸۱}{۳/۲^{۲}} = ۳/۴۸۴ \; \Omega$

$$T_{est} = \frac{۳}{\omega_s} I_{st}^{۲} r_۲$$

$$= \frac{۳ \times ۳}{۱۰۰\pi} \times ۵۰^{۲} \times (۱/۰۲۴ + ۳۵/۶۸۱)$$

$$= ۲۶۲۸/۸ \text{ Nm}$$

لازم به توجه است که اثر مقاومت خارجی کاهش جریان راه اندازی با ضریبی معادل $\frac{۱۸۵/۱۴}{۵۴} = ۳/۷۰۳$ و افزایش گشتاور راه اندازی با ضریب $\frac{۲۶۲۸/۸}{۱۰۰۵/۵} = ۲/۶۱۴$ می باشد .

۱۴-۶ آزمایش قطب بندی (پلاریته)

معمولاً از سه فاز موتور القائی (یا ماشین سنکرون) ۶ سر در دسترس است . اگر علائم قطب بندی آنها ($A_۱$ و $A_۲$ و $B_۱$ و $B_۲$ و $C_۱$ و $C_۲$) باشد می توان آنها را با آزمایش قطب بندی روی موتور القائی بدست آورد . هدف این بخش شرح این آزمایش است بطوریکه در ماشینهای سه فاز که ۶ سر آنها در دسترس باشد بتوان با کاربرد در اینجا سه روش انجام آزمایش قطب بندی شرح داده می شود .

الف : روش اول

برای انجام آزمایش قطب بندی روی موتور القائی منبع یکفازی را به یکی از فازها مثلاً فاز A موتور القائی می بندیم به طوریکه جریان از جریان نامی تجاوز نکند . سرهای فاز A را

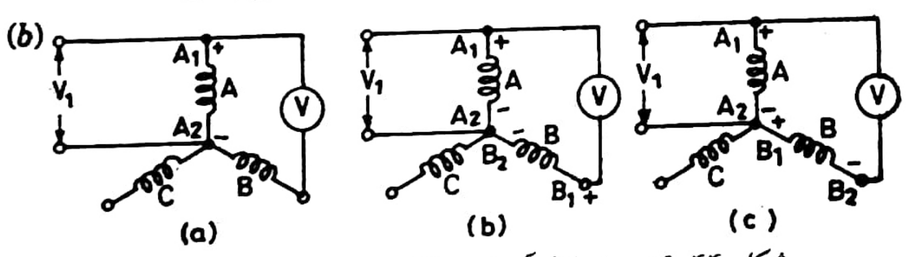
طبق شکل ۶-۴۴a با $A_۱$ و $A_۲$ علامت گذاری می کنیم . حال سر فاز B را به سر $A_۲$ فاز A وصل می کنیم ولتمتری را با رنج مناسب طبق شکل ۶-۴۴(a) بین $A_۱$ و سر دیگر فاز B وصل می کنیم . از آنجا که محورهای مغناطیسی فازهای A و B نسبت به یکدیگر زاویه فضائی ۱۲۰° الکتریکی دارند ، ولتاژ القائی در فاز B ناشی از عمل ترانسفورماتوری $V_۱ \cos ۱۲۰°$ (حالت ایده آل) است . اگر قطب بندی فاز B نسبت به فاز A طبق شکل ۶-۴۴(b) باشد قرائت ولتمتر (که مدار بسته را در جهت ساعت پل می زند) برابر است با :

افزایش ولتاژ در فاز A + افت ولتاژ (از + به −) در فاز B

$$= - (V_۱ \cos ۱۲۰°) + V_۱$$

$$= - (۰/۵V_۱) + V_۱ = ۱/۵V_۱$$

در عمل مقدار ولتاژ در فاز B بعلت وجود شار پراکندگی بزرگ کمتر از $۰/۵V_۱$ است . از این مطلب نتیجه می شود که اگر قرائت ولتمتر بیشتر از ولتاژ منبع $V_۱$ باشد ، علامت قطب بندی فاز B نسبت به فاز A در شکل ۶-۴۴(b) نشان داده شده است . چنانچه قطب بندی فاز B نسبت به فاز A در شکل ۶-۴۴(c) نشان داده شده باشد ، قرائت ولتمتر کمتر از ولتاژ منبع $V_۱$ است . همان رویه را می توان برای فاز C موتور القائی پذیرفت .



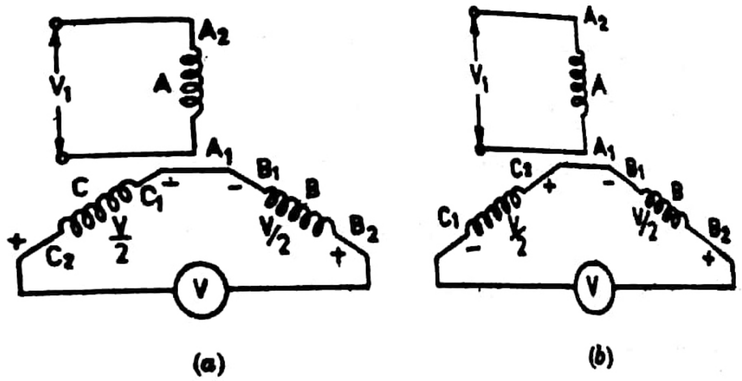
شکل ۶-۴۴: روش اول آزمایش قطب بندی موتور القائی سه فاز

وقتی فاز A از منبع یکفاز تغذیه می شود ، مقدار ولتاژ القائی در فاز B یا C موتور القائی رتور سیم پیچی شده حدود ۴۰٪ $V_۱$ است ، زیرا سیم پیچی رتور مدار باز است . در موتور القائی قفس سنجابی ، جریان القائی در میله‌های رتور مخالف شار ضربانی ناشی از فاز A است در نتیجه ولتاژ القائی در فاز B یا C خیلی کمتر است (حدود ۲۰٪ ولتاژ اعمالی به فاز A)

ب : روش دوم

در روش دوم طبق شکل ۶-۴۵(a) ، ۶ سر با فازهای A و B و C به طور دلخواه علامتگذاری می شود . فاز A مجزا نگهداشته می شود . دو سر فازهای B و C بهم وصل شده و ولتمتری بین دو سر باقی مانده وصل می شود .

در شکل (a)۴۵-۶، B_1 و C_1 بهم وصل شده و ولتمتری بین B_2 و C_2 قرار می گیرد. حال فاز A با ولتاژ V_1 انرژی دار می شود. مقدار ولتاژ القائی با عمل ترانسفورماتوری در فاز B و C، $0/5V_1$ خواهد بود. در حالتی که ولتمتر صفر می خواند قطب بندی فازهای B و C طبق شکل (a)۴۵-۶ است. در این شکل از B_2 و B_1 افت ولتاژ $0/5V_1$ و از C_1 و C_2 افزایش ولتاژ $0/5V_1$ وجود دارد و نتیجه اینست که قرائت ولتمتر در شکل (a)۴۵-۶ صفر است. در حالتی که قرائت ولتمتر صفر نباشد (معمولاً" خیلی کمتر از V_1) علائم قطب بندی فازهای B و C طبق شکل (b)۴۵-۶ خواهد بود. همین روال را نیز برای دیگر فازها می توان تکرار کرد.



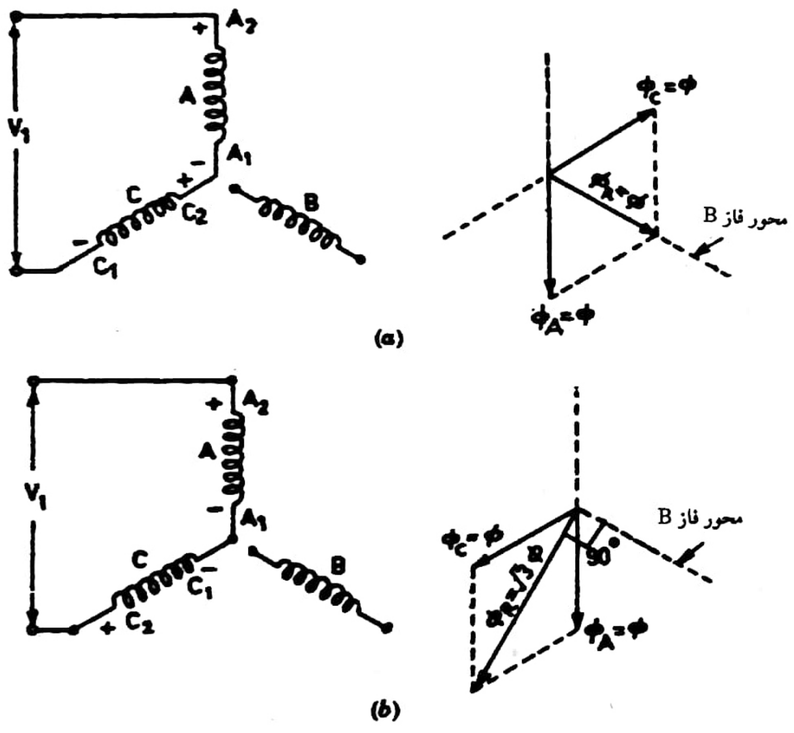
شکل ۴۵-۶: روش دوم آزمایش قطب بندی موتور القائی سه فاز

ج: روش سوم

در این روش دو فاز مثلاً" فازهای A و C را طبق شکل (a)۴۶-۶ با هم سری می کنیم. برای فازهای A و C قطب بندی دلخواه انتخاب می شود. فاز B مجزا نگهداشته می شود. ولتاژ V_1 را طبق شکل به فازهای A و C اعمال می شود. ولتاژ را دو سر فاز B اندازه گیری می کنیم. اگر این ولتاژ صفر نباشد (خیلی کمتر از V_1) قطب بندی فازهای A و C طبق شکل (a)۴۶-۶ است. با اعمال ولتاژ V_1 ولتاژ دو سر هر فاز A و C $V_1/2$ است. با قطب بندی نشان داده شده در شکل (a)۴۶-۶ شار ϕ_A توسط فاز A در طول محور سیم پیچی ساخته می شود. بهمین ترتیب شار ϕ_C توسط فاز C در طول محور سیم پیچی اش ایجاد می شود. منتجه آنها $\phi_R = \phi$ است.

چون ϕ_R در طول محور فاز B است نیروی محرکه الکتریکی القائی در فاز B صفر نیست. در حالت ایده آل این نیروی محرکه همفاز B باید معادل $V_1/2$ باشد ولی در عمل خیلی

کمتر از $V_1/2$ است. بنابراین اگر ولتاژ روی فاز B صفر نباشد قطب بندی فاز C نسبت به فاز A طبق شکل (a)۴۶-۶ خواهد بود..



شکل ۴۶-۶: روش سوم آزمایش قطب بندی موتور القائی سه فاز

اگر علائم قطب بندی فاز C نسبت به فاز A طبق شکل (b)۴۶-۶ باشد. شار ϕ_A و ϕ_C در طول محور سیم پیچی شان ایجاد می شود. اگر $\phi_A = \phi_C = \phi$ باشد منتجه ϕ_R معادل $\sqrt{3}\phi$ است. از آنجاکه محور شار منتجه ϕ_R عمود بر محور فاز B است، نیروی محرکه الکتریکی القائی در فاز B صفر خواهد بود. در این حالت اگر ولتمتر به فاز B وصل شود صفر می خواند و علائم قطب بندی فاز A و C در شکل (b)۴۶-۶ نشان داده شده است. مراحل عمل مشابهی می توان برای دو فاز دیگر پذیرفت.

۶-۱۵ موارد کاربرد موتورهای القائی چند فاز

برای بارهائی که نیاز به گشتاور راه اندازی پائین و سرعت اساساً" ثابت دارند موتور القائی قفس سنجابی به علت استحکام، سادگی ساختمان، قیمت کم و هزینه کم نگهداری بهترین انتخاب است. موتور قفس سنجابی را می توان بامقاومت رتور کم یا زیاد طراحی