فصل هشتم

ساعات آموزش

نظری	عملی	جمع
۱	۱۱	۱۲

تغییر سیم‌پیچی

هدف‌های رفتاری: از هنرجو انتظار می‌رود در پایان این فصل بتواند :

۱ــ تعداد دور هر کلاف را محاسبه کند.

۲ــ قطر سیم مورد نیاز را محاسبه کند.

۳ــ برای تغییر ولتاژ، تعداد دور و قطر سیم را محاسبه کند.

۴ــ برای سرعت کم‌تر موتور، تعداد دور و قطر سیم را محاسبه کند.

۵ــ برای تعویض هادی‌های مسی یا آلومینیمی، قطر سیم را محاسبه کند.

۶ــ برای تعویض هادی‌های آلومینیمی یا مسی، قطر سیم را محاسبه کند.

۸ ــ تغییر سیم‌پیچی

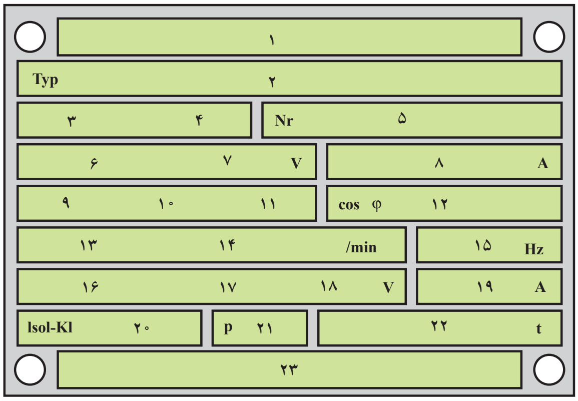
در کارگاه‌های تعمیراتی اغلب لازم می‌شود که سیم‌پیچی ماشین‌های سه‌فاز یا یک فاز را تعویض کنند. سیم‌پیچی جدید یا براساس مشخصات قبلی ماشین انجام می‌گیرد یا این که برای کاربرد جدیدی که موردنیاز است محاسبه می‌شود.

تعیین مشخصات مربوط به سیم‌پیچی، درمورد اول (به‌صورت کپیه برداری)، درصورت موجود بودن سیم‌پیچی معیوب، بسیار ساده است و باید در هنگام باز کردن و خارج کردن سیم‌پیچ معیوب مشخصات سیم‌پیچ، قطر و جنس هادی، تعداد دور هر کلاف، نوع سیم‌پیچی، گام سیم‌پیچی نوع اتصال و غیره را یادداشت کرد و مورد استفاده قرار داد.

در صورتی که سیم‌پیچی معیوب در ماشین موجود نباشد یا لازم باشد مقادیر نامی ماشین یا سیم‌پیچی آن تغییر یابد، باید محاسبه‌های لازم را انجام داد. در این‌جا ابتدا به محاسبه‌ی تعداد دور سیم‌پیچی و قطر سیم با توجه به مقادیر به‌دست آمده از روی پلاک موتور و با اندازه‌گیری ابعاد و اندازه‌های استاتور می‌پردازیم. سپس حالات مختلفی را که گاهی در کارگاه‌های تعمیراتی در مورد تغییر ولتاژ یا تغییر قطب و... پیش می‌آید، بررسی می‌کنیم.

لازم به تذکر است که منحنی‌ها و جداولی که برای این‌گونه محاسبات یا طراحی‌ها به‌کار می‌رود، به‌عوامل متعددی از قبیل شرایط کار، اندازه، مواد اولیه و... بستگی دارد و قابل تغییر است.

قدرت خروجی موتور P_2 برحسب KW و یا اسب‌بخار (PS)، مقدار ضریب بهره موتور η برحسب درصد، ولتاژ خطی U برحسب ولت، جریان خط برحسب آمپر ضریب قدرت و نوع اتصال سیم‌پیچ‌های موتور به شبکه معمولاً برروی پلاک موتور نوشته می‌شود و در محاسبات می‌توان از آن‌ها استفاده کرد (شکل ۱ــ۸).



شکل ۱ــ۸ــ پلاک موتور

جدول ۱ــ۸

شماره	توضیح
۱	سازنده ــ علامت کارخانه
۲	تیپ ــ علامت مشخصه مدل
۳	نوع جریان مانند C (جریان مستقیم) E (جریان یک فاز) D (جریان ۳ فاز)
۴	نوع کار مانند Gen (ژنراتور) Mot (موتور)
۵	شماره مسلسل
۷ و ۶	(۶) نوع اتصال استاتور مانند λ (اتصال ستاره) Δ (اتصال مثلث) (۷) ولتاژ نامی
۸	جریان نامی
۱۱ و ۱۰ و ۹	(۱۰، ۹) قدرت نامی، داده شده به KW و یا W برای موتورها
	قدرت ظاهری به KVA یا VA در ژنراتورهای سنکرون
	(۱۱) نوع مورد استفاده
۱۲	ضریب قدرت نامی
۱۴ و ۱۳	(۱۳) جهت گردش مثلاً راست‌گرد از طرف محور
	(۱۴) دور نامی
۱۵	فرکانس نامی
۱۶	(۱۶) Err (تحریک) در ماشین‌های جریان مستقیم
۱۷	Lfr (رتور) در ماشین‌های (سنکرون)
۱۸	(۱۷) نوع اتصال سیم‌پیچ رتور
	(۱۸) تحریک نامی هم‌چنین ولتاژ رتور در حالت سکون
۱۹	۱۹ جریان تحریک نامی ــ جریان رتور
۲۰	کلاس عایقی مانند Y، A، E، B و غیره
۲۱	نوع حفاظت مانند P33
۲۲	وزن به تن در ماشین‌های بزرگ‌تر از یک تن
۲۳	توضیحات دیگر

در هنگام محاسبه‌ی پارامترهای لازم برای سیم‌پیچی موتور، باید توجه داشت که به‌علت وجود تلفات در ماشین، قدرتی که برای محاسبات استفاده می‌شود باید بیش‌تر از توان خارجی $P_۲$ باشد. توانی که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد، توان ظاهری ورودی بوده و برحسب ولت‌آمپر است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$P_{S_۱} = \frac{P_۲}{\eta.\cos\varphi}$$

قدرت ظاهری ورودی ($P_{S۱}$) یک موتور با مجذور قطر داخلی استاتور ($Di^۲$) و طول شیارهای استاتور (l) و تعداد دور سنکرون موتور n_s، متناسب است. پس می‌توان نوشت :

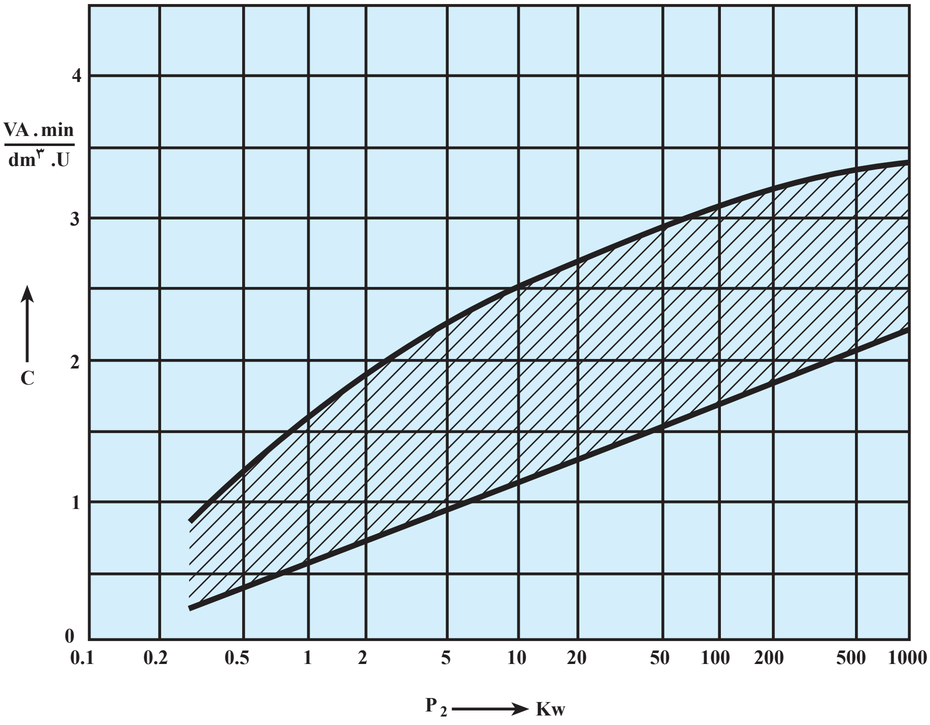
$$P_{S_۱} = C.Di^۲.l.n_s$$

فاکتور C، نسبت توان ظاهری ماشین به اندازه‌های ذکر شده است و واحد آن به واحدهای انتخاب شده برای طول و توان ورودی بستگی دارد.

$$C = \frac{P_{S_۱}}{Di^۲.l.n_s}$$

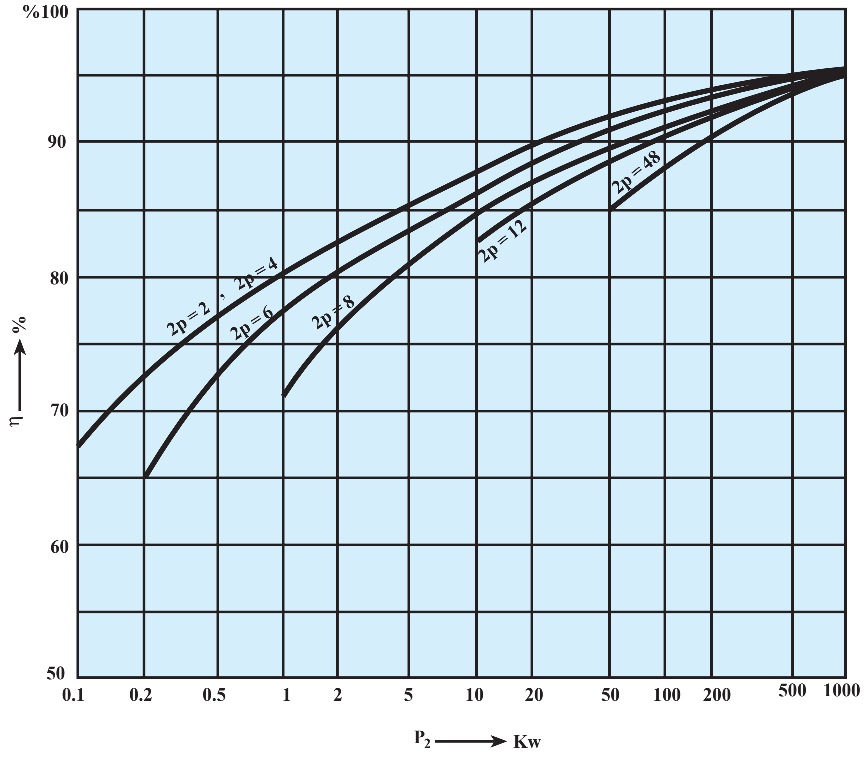
در این رابطه، Di قطر دهانه استاتور برحسب Cm، l طول شیار و یا ضخامت ورقه‌ها برحسب Cm، n_s دور سنکرون برحسب دور در دقیقه $U/_{min}$، $P_{S_۱}$ قدرت ظاهری ورودی برحسب VA، C ضریب برحسب $\frac{VA}{Cm^۳} \times \frac{min}{U}$ است.

منحنی ۱ــ۸ مقدار ضریب C، برای موتورهای با قدرت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این منحنی که از آن بیش‌تر برای طراحی موتور استفاده می‌شود، مقدار C می‌تواند بین دو حد بالا و پایین باشد. درصورتی که مقدار C به حد بالای منحنی نزدیک باشد، موتور از نوع باز است و باید تهویه در آن به‌خوبی انجام گیرد. درصورتی که موتور از نوع بسته باشد و تنها توسط جداره‌ی خارجی پوسته خنک شود، مقدار C به حد پایین منحنی نزدیک خواهد بود. اگر قدرت موتور مجهول باشد، می‌توان با انتخاب قدرت‌های مختلف و پیدا کردن فاکتور C برای هریک، از رابطه‌ی ضریب C و انتقال ضریب به‌دست آمده به منحنی ۱ــ۸ قدرت موتور را به‌دست آورد. اگر ضریب C به‌دست آمده در خارج از منحنی یا در داخل سطح هاشور خورده قرار گرفته باشد اما در نزدیکی حد موردنظر نباشد، باید قدرت دیگری را انتخاب کرد و همین عمل را تکرار نمود تا بالاخره فاکتور C در نزدیکی حد موردنظر واقع شود.

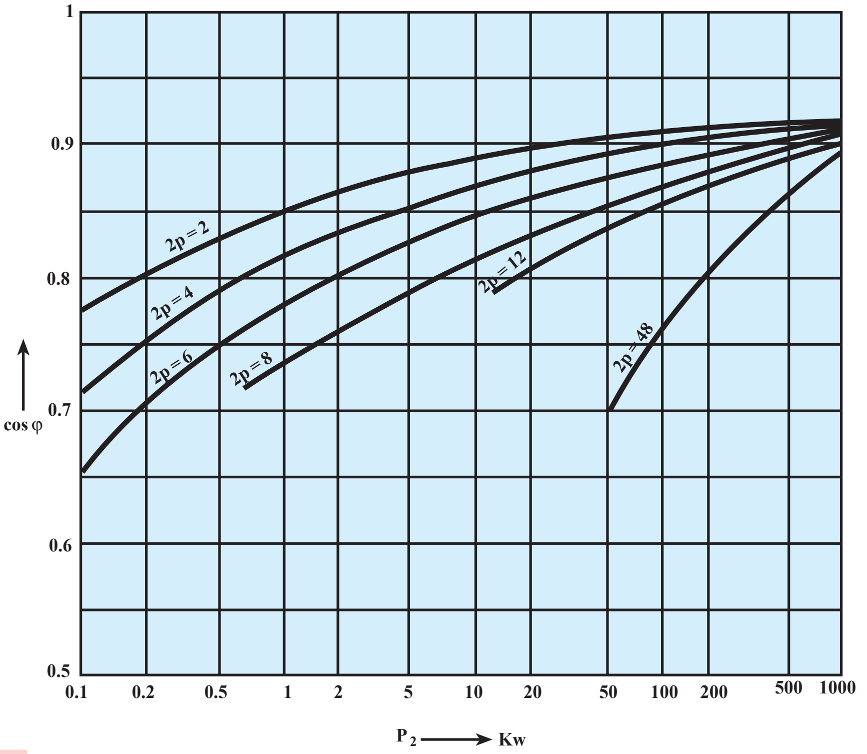


منحنی ۱ــ۸ ــ ضریب C نسبت به توان خروجی

در منحنی ۲ــ۸ مقدار ضریب بهره و در منحنی ۳ــ۸ مقدار ضریب قدرت موتورها داده شده است. درصورتی که موتور فاقد پلاک باشد یا این مقادیر در روی پلاک آن مشخص نشده باشد، می‌توان مقدار تقریبی آن‌ها را از این دو منحنی به‌دست آورد و در محاسبات تعداد دور کلاف و قطر سیم، از آن‌ها استفاده کرد. در زیر به‌شرح این محاسبات می‌پردازیم.



منحنی ۲ــ۸ــ راندمان نسبت به توان خروجی



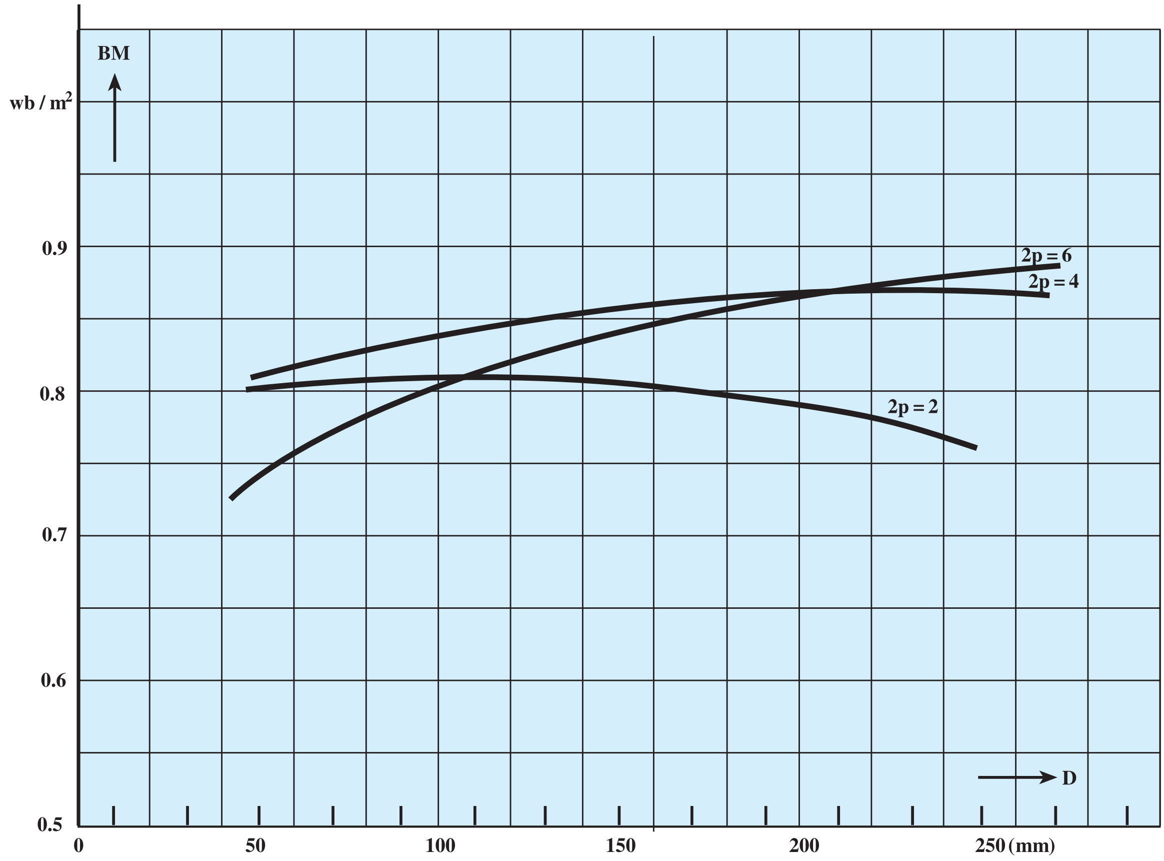
منحنی ۳ــ۸ــ ضریب قدرت نسبت به‌توان خروجی

۱ـ۸ـ محاسبه‌ی تعداد دور هر کلاف

تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز استاتور را می‌توان از رابطه‌ی $E = ۴/۴۴ \times f \times \varphi \times N \times K$ به‌دست آورد. در این رابطه، φ فوران متوسط زیر هر قطب است و از رابطه‌ی $\varphi = B_{av}.\tau_P.l$ به‌دست می‌آید. τ_P نیز طول هر قطب و مقدار آن برابر است با:

$$\tau_P = \frac{Di.\pi}{۲P}$$

تقسیم اندکسیون مغناطیسی در زیر هر قطب، یک‌نواخت نیست و فرم سینوسی دارد؛ بنابراین، ابتدا مقدار اندکسیون ماکزیمم را از منحنی ۴ـ۸ و سپس مقدار متوسط اندکسیون را از رابطه‌ی $B_{av} = \frac{۲}{\pi}B_{max}$ محاسبه می‌کنیم. ضریب K نیز در رابطه‌ی اصلی E ضریب ولتاژ است و مقدار آن برای سیم‌پیچی‌های مختلف متفاوت می‌باشد. روش به‌دست آوردن این ضریب را در قسمت بعد توضیح می‌دهیم.



منحنی ۴ـ۸ـ چگالی میدان نسبت به قطر روتور

بدین ترتیب، رابطه‌ای که برای محاسبه‌ی تعداد دور باید از آن استفاده کرد به‌صورت زیر است.

$$N = \frac{E}{۴/۴۴ \times f \times \varphi \times K} = \frac{K'U}{۴/۴۴ \times f \times \varphi \times K}$$

ضریب K' نسبت بین E و U و مقدار آن بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۷ است، در این رابطه، N تعداد کل حلقه‌های مربوط به یک فاز است. اگر تعداد هادی‌هایی را که در هر شیار قرار می‌گیرند با N_Z نشان دهیم، می‌توان برای محاسبه‌ی آن‌ها از رابطه‌ی $N_Z = \frac{N}{q.p}$ استفاده کرد. درصورتی که سیم‌پیچی به‌صورت

دوطبقه انجام گیرد، باید تعداد هادی‌های واقع در هر شیار زوج باشد تا تعداد حلقه‌های هر کلاف عدد صحیح به‌دست آید.

۱ــ۱ــ۸ــ تعیین ضریب ولتاژ سیم‌پیچی: یکی از عوامل مؤثر در تعیین بزرگی اختلاف سطح القایی در ماشین‌های الکتریکی که در محاسبات مربوط به تعیین تعداد دور حلقه‌های سیم‌پیچی موتورهای الکتریکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، ضریب ولتاژ سیم‌پیچی (K) است. ضریب ولتاژ سیم‌پیچی از دو ضریب ولتاژ منطقه‌ای K_Z و ضریب ولتاژ کوتاهی گام K_S تشکیل شده و برابر با $K = K_Z.K_S$ است.

الف ــ تعیین ضریب ولتاژ منطقه‌ای K_Z (ضریب پخش):

درصورتی که هادی‌های یک فاز در زیر هر قطب، در شیارهای مختلف تقسیم شوند ــ یعنی $q > ۱$ باشد ــ ولتاژ القایی در هریک از کلاف‌ها با یک‌دیگر اختلاف فاز دارد. اختلاف سطح کل از جمع برداری ولتاژهای القایی در کلاف‌ها به‌دست می‌آید و بنابراین کوچک‌تر از جمع جبری آن‌ها می‌شود. درصورتی که هادی‌های یک فاز در زیر یک قطب، در یک شیار واقع شده باشند ــ یعنی $q = ۱$ باشد ــ می‌توانیم بگوییم که در همه‌ی هادی‌های واقع در یک شیار، ولتاژها تقریباً یکسان و هم فازند. در این صورت، جمع برداری ولتاژهای القایی در هادی‌ها با جمع جبری آن‌ها برابر خواهد بود.

دلیل این که در حالت اول جمع‌برداری ولتاژهای القایی، از جمع جبری ولتاژها کوچک‌تر شد، در حقیقت تأثیر ضریبی به‌نام ضریب منطقه‌ای است که مقدار آن $K_Z = \frac{\text{جمع برداری ولتاژها}}{\text{جمع جبری ولتاژها}}$ می‌باشد. در حالت دوم، جمع‌برداری ولتاژهای القایی با جمع جبری آن‌ها برابر می‌شد ؛ درنتیجه، ضریب منطقه‌ای $K_Z = ۱$ بود. هرچه گروه کلاف مربوط به یک فاز به‌طور گسترده‌تری در زیر یک قطب توزیع شود، ولتاژ القایی کل و به‌همان نسبت ضریب منطقه‌ای، کوچک‌تر خواهد بود.

مقدار دقیق ضریب ولتاژ پخش در یک سیم‌پیچی سه فازه که در آن $q = ۲$ باشد، برابر با $K_Z = ۰/۹۶۶$ و اگر $q = ۲۰$ باشد برابر با $K_Z = ۰/۹۵۶$ محاسبه می‌شود[۱]. مشاهده می‌شود که مقدار q عملاً در ضریب پخش تأثیر زیادی ندارد و می‌توان در محاسبات یک سیم‌پیچی سه‌فازه برای حالتی که q از ۲ بزرگ‌تر باشد، مقدار ضریب منطقه‌ای را برابر با $K_Z = ۰/۹۶$ منظور داشت.

در سیم‌پیچی یک فازه، درصورت استفاده از تمام شیارهای زیر هر قطب برای یک فاز، ضریب پخش $K_Z = ۰/۶۳۷$ و در صورت استفاده از $\frac{۲}{۳}$ شیارها برای یک فاز، ضریب پخش برابر با $K_Z = ۰/۸۲۵$ خواهد شد[۲]. بنابراین، نسبت ولتاژ القایی در دو حالت برابر است با :

$$\frac{۱}{\frac{۲}{۳}} \times \frac{۰/۶۳۷}{۰/۸۲۵} \simeq ۱/۱۶$$

نسبت به‌دست آمده بدین معنی است که در موتور یک فازه در حالتی که تمام شیارها برای فاز اصلی سیم‌پیچی شوند، با وجود این که مواد مصرفی بیش از ۵۰ درصد حالتی است که فقط $\frac{۲}{۳}$ شیارها مربوط به یک فاز باشند، اما تنها حدود ۱۶ درصد اضافه ولتاژ خواهیم داشت. به همین دلیل، در سیم‌پیچ موتورهای یک فاز اغلب $\frac{۲}{۳}$ شیارها توسط سیم‌پیچی اصلی پر می‌شود.

ب ــ ضریب ولتاژ کوتاهی گام K_S (فاکتور گام)[۳]: اگر گام سیم‌پیچی از گام قطبی کوچک‌تر باشد، اختلاف سطح القایی در سیم‌پیچی، کم‌تر از حالتی خواهد بود که گام سیم‌پیچی با گام قطبی برابر است. ضریبی که در این رابطه به‌کار می‌رود، **ضریب ولتاژ کوتاهی گام** نامیده می‌شود و مقدار آن برای چند حالت در جدول ۲ــ۸ داده شده است.

برای سادگی محاسبات، در جدول ۳ــ۸ مقدار ضریب ولتاژ سیم‌پیچی برای بعضی از سیم‌پیچ‌ها داده شده است.

---

۱ و ۲ و ۳ ــ هنرجویان برای پی‌بردن به‌روش‌های محاسبه، می‌توانند به کتاب‌هایی که در این زمینه موجود است، مراجعه کنند.

جدول ۲ــ۸ــ ضریب ولتاژ کوتاهی گام

$\frac{۱}{۲}$	$\frac{۲}{۳}$	$\frac{۳}{۴}$	$\frac{۴}{۵}$	$\frac{۵}{۶}$	$\varepsilon = \frac{y_Z}{y} =$
۰/۷۱	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۶۶	$K_S =$

جدول ۳ــ۸ــ ضریب ولتاژ سیم‌پیچی

۳				۲			$q =$
$\frac{۶}{۹}$	$\frac{۷}{۹}$	$\frac{۸}{۹}$	$\frac{۹}{۹}$	$\frac{۴}{۶}$	$\frac{۵}{۶}$	$\frac{۶}{۶}$	$\frac{y_Z}{y} =$
۰/۸۳۱	۰/۹۰۲	۰/۹۴۵	۰/۹۶۰	۰/۸۳۶	۰/۹۳۳	۰/۹۶۶	$K =$

۲ــ۸ــ تعیین قطر سیم

برای محاسبه‌ی قطر سیم باید جریان فازی را حساب کرد. در اتصال ستاره جریان فاز با جریان خط برابر است. در اتصال مثلث، جریان فاز از جریان خط، $\sqrt{۳}$ برابر کم‌تر می‌باشد. جریان خط از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$I_L = \frac{P_۲}{\sqrt{۳}\eta U_L \cos\varphi}$$

پس از مشخص شدن مقدار جریانی که از سیم‌پیچ هر فاز باید عبور کند، می‌توان سطح مقطع یا قطر سیم را حساب کرد. برای این منظور، باید چگالی جریان مجاز (J) را مشخص نمود. هرچه چگالی جریان سیم بیش‌تر انتخاب شود، سیم‌پیچ‌های موتور بیش‌تر گرم می‌شوند. پس چگالی جریان برای موتورها به‌شرایط کار، نوع کار، مدت زمان کار کردن و خاموش بودن موتور و هم‌چنین شرایط تهویه و تعداد قطب‌های آن بستگی دارد.

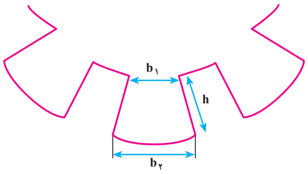
اغلب برای موتورهای معمولی باز، چگالی جریان بین ۴/۵ تا ۱۰ آمپر بر میلی‌متر مربع و در موتورهای معمولی بسته، چگالی جریان بین ۳/۵ تا ۸/۵ آمپر بر میلی‌متر مربع با توجه به نوع و محل مصرف آن انتخاب می‌شود. بدین‌ترتیب، با مشخص شدن چگالی جریان می‌توان قطر سیم را محاسبه کرد. در ماشین‌های کوچک و متوسط تا حدود ۱۰۰PS، معمولاً از سیم‌های گرد استفاده می‌شود. در صورتی که سیم لاکی با قطر محاسبه شده در دسترس نباشد یا سطح مقطع سیم مورد لزوم بزرگ باشد، می‌توان از چند سیم گرد نازک‌تر به‌صورت موازی به‌جای سیم کلفت استفاده کرد. در این صورت، باید مجموع سطح مقطع سیم‌های موازی با سطح مقطع سیم موردنظر برابر باشد. قطر سیم را پس از مشخص کردن چگالی جریان می‌توان از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد:

$$A = \frac{d^۲\pi}{۴} = \frac{I}{J} \Rightarrow d = ۱/۱۳\sqrt{\frac{I}{J}}$$

اگر بخواهیم از n سیم موازی با قطرهای $d_۱$ و $d_۲$ و ... d_n به‌جای سیم محاسبه شده با قطر d استفاده کنیم، باید قطر سیم‌های مورد استفاده در رابطه‌ی $d = \sqrt{d_۱^۲ + d_۲^۲ + \cdots + d_n^۲}$ صدق کند.

اگر قطر سیم‌ها برابر باشد، قطر هریک از آن‌ها $d_۱ = \frac{d}{\sqrt{n}}$ می‌شود.

درصورتی که یک شیار ذوزنقه‌ای شکل کاملاً از سیم گرد پرشود، می‌توان مقدار تقریبی قطر سیم را با داشتن تعداد هادی‌های واقع در هر شیار یا مقدار تقریبی هادی‌های واقع در هر شیار را با دانستن قطر سیم و اندازه‌گیری ابعاد شیار از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد.



$$d^۲N_Z = (b_۱ + b_۲ - ۲)(h_n - ۳)f$$

در این رابطه d قطر سیم با لاک برحسب میلی‌متر و N_Z تعداد کل هادی‌های هر شیار، $b_۱$ و $b_۲$ دو قاعده کوچک و بزرگ شیار برحسب میلی‌متر و h_n عمق شیار برحسب میلی‌متر

است. عددهای ۲ و ۳ به‌خاطر وجود عایق در شیار و هم‌چنین گوه روی شیار منظور می‌شوند. ضریب f نیز برای سیم‌پیچی یک طبقه برابر با ۰/۴ و برای سیم‌پیچی دو طبقه برابر با ۰/۳۶ است.

برای مثال، در یک شیار ذوزنقه‌ای شکل با اندازه‌های $b_1=۱۰mm$ و $b_2=۱۴mm$ و $h_n=۲۶mm$ که تعداد ۸۰ عدد هادی در آن قرار می‌گیرد و سیم‌پیچی به‌صورت دو طبقه است، قطر سیم برابر است با :

$$d^۲=\frac{(b_۱+b_۲-۲)(h_n-۳)}{N_Z}\times ۰/۳۶=\frac{۲۲\times ۲۳\times ۰/۳۶}{۸۰}$$

$$d^۲=۲/۲۸\Rightarrow d=۱/۵mm$$

درصورتی که ضخامت لاک روی سیم حدود ۰/۱ میلی‌متر باشد. باید از سیم لاکی نمره‌ی ۱/۴ که قطر آن با لاک، ۱/۵ میلی‌متر می‌شود، استفاده کرد.

برای آشنایی بیش‌تر شما با توضیحات داده شده به‌ذکر یک مثال می‌پردازیم.

مثال: محاسبه‌ی تعداد دور و قطر سیم لازم برای سیم‌پیچی یک موتور آسنکرون رتور قفسی به‌صورت دو طبقه و $q=۳$ و با گام کسری و ضریب کوتاهی گام $\varepsilon=\frac{۸}{۹}$ موردنظر است. سایر مشخصات این موتور عبارت است از :

قدرت خروجی	$P_۲=۱۸KW$
تعداد شیارهای استاتور	$Z=۵۴$
قطر دهانه‌ی استاتور	$Di=۲۵۰mm$
طول شیار	$l=۱۵۰mm$
ولتاژ و نوع اتصال	$\lambda=۳۸۰V$
تعداد دور سنکرون	$n_s=۱۰۰۰\ r.p.m$

راه حل: از روی منحنی‌های ۲ــ۸ و ۳ــ۸ مقدار ضریب بهره $\eta=۰/۸۷$ و ضریب قدرت $\cos\varphi=۰/۸۶$ برای این موتور به‌دست می‌آید.

قدرتی که سیم‌پیچ‌های موتور باید براساس آن طراحی شود، برابر است با :

$$P_{S_۱}=\frac{P_۲}{\eta.\cos\varphi}=\frac{۱۸}{۰/۸۷\times ۰/۸۶}=۲۴/۰۵\ KVA$$

اگر مقدار C را برای مقادیر داده شده $Di=۲۵Cm$ و $l=۱۵Cm$ و $n_s=۱۰۰۰r.p.m$ حساب کنیم، درنتیجه :

$$C=\frac{P_{S_۱}}{Di^۲l.n_s}=\frac{۲۴/۰۵\times ۱۰۰۰}{۲۵^۲\times ۱۵\times ۱۰۰۰}$$

$$=۲/۵۷\times ۱۰^{-۳}\frac{V.A.\min}{Cm^۳}$$

اگر مقدار C را که از رابطه‌ی بالا به‌دست آمده، در منحنی ۱ــ۸ برای $P_۲=۱۸KW$ جست‌وجو کنیم، ملاحظه خواهیم کرد که نزدیک به حد بالایی منحنی است. بنابراین، چون این موتور از نوع باز است و عمل تهویه و خنک شدن در آن به‌خوبی انجام می‌گیرد، قدرت انتخابی برای آن مناسب است اما درصورتی‌که موتور از نوع بسته بود و مقدار C نیز همین مقدار به‌دست می‌آمد، برای قدرت موتور می‌بایست اعدادی کم‌تر از ۱۸ کیلووات انتخاب شوند و سپس با محاسبه‌ی اعدادی که برای C به‌دست می‌آیند و انتقال آن‌ها برروی منحنی، توان واقعی موتور را به‌دست آورد.

برای محاسبه‌ی تعداد دور سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور، باید ولتاژ فازی محاسبه شود. ولتاژ خط ۳۸۰ ولت و نوع اتصال آن ستاره است. پس ولتاژی که برروی سیم‌پیچ‌های هر فاز قرارمی‌گیرد، برابر است با :

$$U_{ph}=\frac{U_L}{\sqrt{۳}}=\frac{۳۸۰}{\sqrt{۳}}=۲۲۰V$$

اندکسیون مغناطیسی در فاصله هوایی برای این موتور در حالت بی‌باری از روی منحنی (۴ــ۸) $B_{max}=۸۷۵۰G$ درنظر گرفته می‌شود. بدین‌ترتیب، در هر قطب مقدار φ برابر است با :

$$\varphi=\frac{۲}{\pi}B_{max}.l.\tau_P=\frac{B_{max}.l.Di}{P}$$

$$\varphi=\frac{۸۷۵۰G\times ۲۵Cm\times ۱۵Cm}{۳}=۱/۰۹\times ۱۰^۶M$$

$$=۱/۰۹\times ۱۰^{-۲}V.S$$

ضریب ولتاژ سیم‌پیچی K نیز از روی جدول ۲ــ۸ برای $P=۳$ و $q=۳$ و ضریب کوتاهی گام $\frac{۸}{۹}$، برابر با $K=۰/۹۴۵$ می‌شود.

بدین‌ترتیب، تعداد دور در هر فاز برابر است با :

$$N=\frac{E}{۴/۴۴\times f\times\varphi\times K}=\frac{K'U}{۴/۴۴\times f\times\varphi\times K}$$

$$N = \frac{۰/۹۶ \times ۲۲۰}{۴/۴۴ \times ۵۰ \times ۰/۹۴۵ \times ۱/۰۹ \times ۱۰^{-۲}} = ۹۲ \text{ دور}$$

تعداد هادی‌های واقع در هر شیار برابر است با :

$$N_Z = \frac{N}{q.p} = \frac{۹۲}{۳ \times ۳} = ۱۰/۲۲$$

همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، در سیم‌پیچی دو طبقه باید تعداد هادی‌هایی که در هر شیار قرار می‌گیرند، عدد زوج باشد تا تعداد حلقه‌های هر کلاف، عدد صحیح بشود. لذا برای این موتور، $N_Z = ۱۲$ و درنتیجه $N = ۱۰۸$ را انتخاب می‌کنیم. به این ترتیب، چون در هر شیار دو کلاف قرار می‌گیرد، هر کلاف دارای $\frac{۱۲}{۲} = ۶$ حلقه خواهد بود.

برای محاسبه‌ی قطر سیم، باید ابتدا جریانی را که از هر حلقه عبور می‌کند به‌دست آوریم. چون در این‌جا سیم‌پیچ‌ها به‌صورت ستاره بسته شده‌اند. با دانستن ضریب بهره و ضریب قدرت، جریان خط را که با جریان فاز برابر است به‌دست می‌آوریم.

$$I_L = I_{ph} = \frac{P_۲}{۳\eta . \cos\varphi . U_{ph}}$$

$$I_{ph} = \frac{۱۸۰۰۰}{۳ \times ۰/۸۷ \times ۰/۸۶ \times ۲۲۰} = ۳۶/۵A$$

با انتخاب چگالی جریان $J = ۵\frac{A}{mm^۲}$ قطر هادی برابر می‌شود با :

$$d = ۱/۱۳\sqrt{\frac{I_{ph}}{J}} = ۱/۱۳\sqrt{\frac{۳۶/۵}{۵}} = ۳mm$$

به‌جای یک سیم گرد با قطر ۳mm بدون لاک، می‌توان از دو هادی که به‌صورت موازی با یک‌دیگر پیچیده می‌شوند، استفاده کرد. در این صورت، قطر هادی جدید d' برابر است با :

$$\frac{d}{d'} = \sqrt{۲} \Rightarrow d' = \frac{d}{\sqrt{۲}}$$

$$d' = \frac{۳}{\sqrt{۲}} = ۲/۱mm$$

پس از محاسبه‌ی قطر و تعداد دور سیم، باید بررسی کرد که سیم‌های محاسبه شده و عایق در شیارهای استاتور جای می‌گیرند یا خیر. درصورتی که هادی‌ها در درون شیار جای نگیرند و امکان خنک کردن و تهویه‌ی بهتر موتور نیز وجود داشته باشد، می‌توان چگالی جریان را بیش‌تر انتخاب کرد. در غیر این‌صورت، باید موتور را برای قدرت کم‌تری طراحی نمود.

۳ــ۸ــ محاسبه‌ی سیم‌پیچی برای تغییر ولتاژ

گاهی لازم می‌شود که سیم‌پیچی یک موتور را برای یک ولتاژ ــ غیر از ولتاژ نامی ــ تغییر دهیم. در این صورت، با توجه به اطلاعاتی که از سیم‌پیچ قبلی موتور به‌دست می‌آید، باید محاسبات مجددی را برای تعداد دور و قطر سیم‌پیچ جدید انجام دهیم. این مورد با ذکر یک مثال شرح داده می‌شود.

موتوری که ولتاژ آن باید تغییر کند، یک موتور سه‌فاز با رتور قفسی است و لازم است از ولتاژ ۱۲۷/۲۲۰V به ولتاژ ۲۲۰/۳۸۰V تغییر سیم‌پیچی داده شود تا قابل استفاده در ایران باشد. سیم‌پیچی این موتور که در حالت اتصال کلاف‌های آن به‌صورت مثلث، به ولتاژ ۱۲۷ ولت و درصورت اتصال ستاره به‌ولتاژ ۲۲۰ ولت سه‌فازه اتصال پیدا می‌کرد، باید تغییر کند. به‌طوری که درصورت اتصال مثلث به ولتاژ سه‌فازه ۲۲۰ ولت و درصورت اتصال ستاره، به ولتاژ سه فازه ۳۸۰ ولت اتصال یابد. با این تغییر سیم‌پیچی، نوع اتصال (ستاره ــ مثلث) و قدرت و دور آن نباید تغییر کنند. سایر مشخصات این موتور به قرار زیر است :

تعداد قطب‌ها $۲P = ۴$ و تعداد شیارها $Z = ۳۶$ و تعداد شیار زیر هر قطب مربوط به هر فاز $q = ۳$ و سیم‌پیچی یک طبقه و هرفاز موتور دارای دو گروه کلاف و هر کلاف نیز از $N_Z = ۲۴$ دور تشکیل شده است.

قطر سیم بدون لاک $d = ۱/۳$ و جنس آن از مس و سطح مقطع آن بدون لاک $A = ۱/۳۲۷mm^۲$ می‌شود.

قطر سیم با لاک $d_{is} = ۱/۳۶$ و سطح مقطع آن با لاک برابر با $A_{is} = ۱/۴۵۲mm^۲$ است.

سطح اشغال شده در هر شیار، برابر با $N_Z . A_{is} = ۲۴ \times ۱/۴۵۲ = ۳۴/۸۴۸mm^۲$ است. این سطح باید توسط هادی‌های عایق‌دار جدید پر شود. تعداد کلاف‌های هرفاز $\frac{۳۶}{۳ \times ۲}$ است. و بنابراین تعداد حلقه‌های کل یک فاز

$$N = \frac{N_Z . Z}{۲m} = \frac{۲۴ \times ۳۶}{۲ \times ۳} = ۱۴۴ \text{ دور می‌شود.}$$

با توجه به این که مقادیر مغناطیسی موتور باید ثابت بماند، پس تعداد دور جدید N_2 برابر است با :

$$N_2 = N\frac{U_2}{U} = ۱۴۴ \times \frac{۲۲۰}{۱۲۷} = ۲۴۹/۴ \text{ دور}$$

$$N_{Z2} = \frac{۲۴۹/۴ \times ۲ \times ۳}{۳۶} = ۴۱/۶ \simeq ۴۲ \text{ هادی}$$

سطح مقطع هادی جدید را نیز با توجه به ولتاژ قدیم و جدید می‌توانیم به‌طریق زیر حساب کنیم :

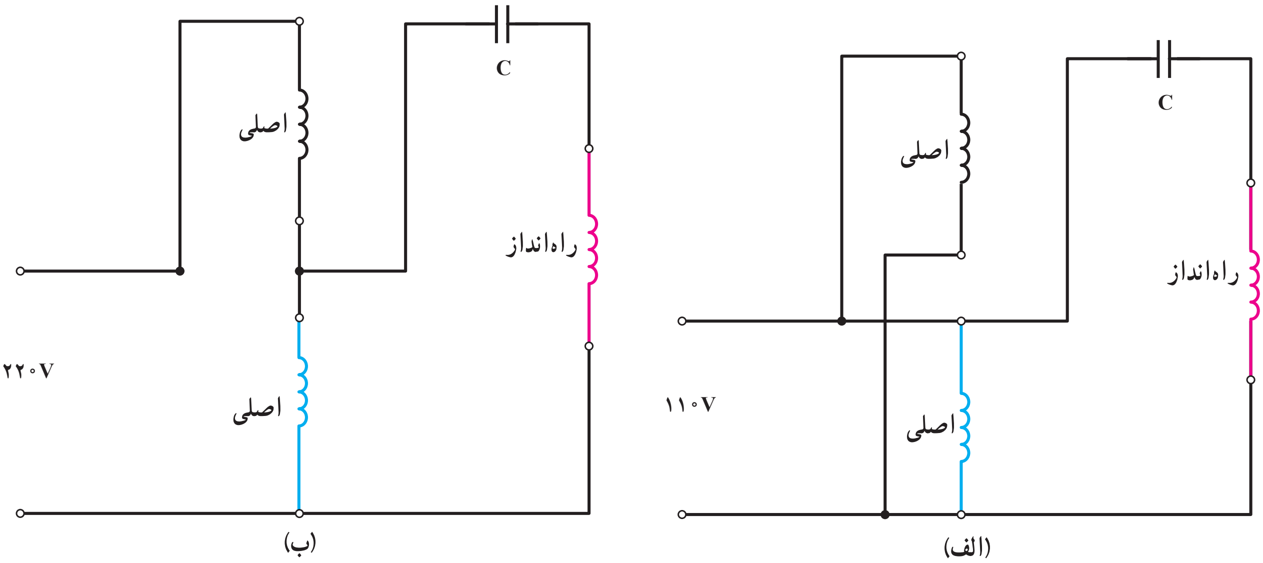
$$A_2 = A_1\frac{U_1}{U_2} = ۱/۳۲۷ \times \frac{۱۲۷}{۲۲۰} = ۰/۷۶۷mm^2$$

سطح مقطع سیم استاندارد برابر با $A_2 = ۰/۷۸۶mm^2$ و قطر آن $d_2 = ۱mm$ است. قطر این سیم با لاک برابر $d_{2is} = ۱/۰۶$ و سطح مقطع آن با لاک $A_{2is} = ۰/۸۸۲mm^2$ می‌باشد و چون باید در هر شیار ۴۲ عدد از این سیم‌ها قرار گیرد، پس سطح کل اشغال شده در هر شیار برابر با $N_{Z_2}.A_{2is} = ۴۲ \times ۰/۸۸۲ = ۳۷/۰۴۴mm^2$ خواهد شد. این مقدار ۶ درصد بیش‌تر از سطح اشغالی توسط هادی‌های قبلی است.

درصورتی که شیار جا نداشته باشد و نتوان هادی‌های جدیدی را در درون آن جای داد، باید از سیم با قطر کم‌تر ــ که در این مثال ۰/۹۵ بدون لاک می‌باشد ــ به‌جای سیم یک استفاده کرد. در این حالت، قدرت موتور تا حدود ۹ درصد کاهش می‌یابد.

گاهی موتور را برای دو ولتاژ مختلف ــ که ولتاژ بیش‌تر دو برابر ولتاژ کم‌تر می‌باشد، مثلاً ۲۲۰ و ۴۴۰ ولت ــ سیم‌پیچی می‌کنند. برای این کار، سیم‌پیچ هریک از فازها به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و در ولتاژ کم‌تر، این دو قسمت با یک‌دیگر به‌صورت موازی و در ولتاژ بیش‌تر، با یک‌دیگر به‌صورت سری قرار می‌گیرند. مثلاً اگر هر فاز موتور دارای ۴ گروه کلاف باشد، برای ولتاژ کم‌تر، هر دو گروه کلاف با یک‌دیگر سری می‌شوند و سپس طوری به هم اتصال پیدا می‌کنند که درمجموع دو مدار موازی را تشکیل دهند اما برای ولتاژ بیش‌تر، باید هر چهار گروه کلاف را با یک‌دیگر به‌صورت سری قرار داد. در این صورت، ولتاژ هر کلاف صرف‌نظر از ولتاژ تغذیه‌ی موتور، همیشه برای ولتاژ کم‌تر و ولتاژ بیش‌تر یکی خواهد بود.

اگر موتور یک فاز باشد، سیم‌پیچ اصلی دو قسمت می‌شود و سیم‌پیچ راه‌انداز نیز برمبنای ولتاژ کم‌تر پیچیده شده ودر هر حالت با یک قسمت از سیم‌پیچ اصلی، به‌صورت موازی قرار می‌گیرد (شکل ۲ــ۸ــ الف و ب).



(الف)

(ب)

شکل ۲ــ۸ــ موتور یک فاز با دو ولتاژ کار

۴ــ۸ــ محاسبه سیم‌پیچی برای دور کم‌تر موتور

با افزایش تعداد قطب‌ها از دور موتور کاسته می‌شود و با کم کردن تعداد قطب‌ها دور موتور افزایش می‌یابد. لذا افزایش دورموتور به‌دلیل محدودیت‌های مکانیکی چندان عملی نیست و بنابراین، در این‌جا فقط به کاهش دور موتور از طریق افزایش تعداد قطب‌ها می‌پردازیم.

چنان‌چه در یک موتور بخواهیم سیم‌پیچی را برای تعداد قطب بیش‌تر از حالت نامی تغییر دهیم، سطح زیر هر قطب از حالت اول کم‌تر می‌شود. و با ثابت ماندن اندکسیون در فاصله‌ی هوایی، فوران نیز نسبت به حالت قبل کاهش می‌یابد. در این مورد می‌توان نوشت:

$$\frac{\varphi_۱}{\varphi_۲} = \frac{\tau_۱}{\tau_۲} = \frac{۲P_۲}{۲P_۱} \qquad (۱)$$

(اندیس ۲ در روابط مشخص کننده‌ی حالت دوم یعنی با تعداد قطب بیش‌تر است.)

درصورتی که ولتاژ فازی ثابت بماند، باید حاصل $\varphi.N.K = Const$ باشد. ضریب ولتاژ سیم‌پیچی K فقط به‌مقدار خیلی جزئی با تغییر قطب تغییر می‌کند.

$$\varphi_۱ N_۱ = \varphi_۲ N_۲ \qquad (۲)$$

از ترکیب دو رابطه‌ی ۱ و ۲ می‌توان نوشت:

$$\frac{\varphi_۲}{\varphi_۱} = \frac{۲P_۱}{۲P_۲} = \frac{N_۱}{N_۲}$$

درصورت ثابت بودن ولتاژ، تعداد دور سیم‌پیچی، متناسب با تعداد قطب‌ها تغییر می‌کند. افزایش تعداد دور سیم‌پیچی برای هر فاز، باعث کم شدن سطح مقطع سیم نیز می‌شود.

می‌توان چنین نتیجه گرفت که در یک تجدید سیم‌پیچی موتور آسنکرون از تعداد قطب کم‌تر به تعداد قطب بیش‌تر، درصورت ثابت بودن نوع اتصال و اختلاف پتانسیل تغذیه‌ی سیم‌پیچی، تعداد دور سیم‌پیچی یک فاز، سطح مقطع سیم و قدرت موتور براساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$N_۲ = N_۱ \frac{۲P_۲}{۲P_۱} = N_۱ \frac{n_{s۱}}{n_{s۲}}$$

$$A_۲ = A_۱ \frac{۲P_۱}{۲P_۲} = A_۱ \frac{n_{s۲}}{n_{s۱}}$$

$$P_{u۲}[W] = P_{u۱}[W] \frac{۲P_۱}{۲P_۲} = P_{u۱}[W] \frac{n_{s۲}}{n_{s۱}}$$

در این فرمول P_u، توان مفید موتور است.

با اضافه کردن تعداد قطب‌های یک موتور با تجدید سیم‌پیچی، تعداد دور موتور کاهش می‌یابد، موتور خوب خنک نمی‌شود و ضریب قدرت ماشین کم می‌شود.

اگر علاوه بر تغییر قطب یک موتور، لازم باشد که با ثابت ماندن نوع اتصال، ولتاژ تغذیه نیز تغییر کند یا این که با ثابت ماندن ولتاژ شبکه، نوع اتصال نیز تغییر کند، باید ابتدا $N_۲$ و $A_۲$ و $P_۲$ را با کمک روابط گفته شده برای تغییر قطب محاسبه کنیم و پس از آن، محاسبات را برای تغییر ولتاژ درصورت ثابت ماندن توان به‌کار ببریم.

مثال: مقادیر زیر از روی پلاک یک موتور سه‌فاز آسنکرون خوانده شده است.

$P = ۷KW$

$U = ۳۸۰/۲۲۰V$

λ / Δ

$I = {}^{۱۲/۴۲}\!/_{۲۱/۵۲A}$

$n = ۱۴۷۰\ r.p.m$

$\eta = ٪۸۶$

$\cos\varphi = ۰/۸۵۶$

استاتور دارای $Z = ۳۶$ شیار و سیم‌پیچی استاتور به‌صورت یک طبقه است. گروه کلاف‌ها با یک دیگر سری هستند و تعداد آن‌ها برابر با $P = ۲$ است. کلاف‌ها با سه سیم‌موازی با قطر $d = ۱/۹۵$ میلی‌متر و ۱۵ دور پیچیده شده‌اند. درنتیجه، در هر شیار ۴۵ سیم وجود دارد. سطح مقطع هر سیم برابر با ۲/۹۸ میلی‌متر مربع و سطح مقطع هر هادی کلاف (سه سیم موازی) $۳ \times ۲/۹۸ = ۸/۹۴mm^۲$ است.

این موتور را می‌خواهیم برای حالت $۲P = ۶$ قطب مجدداً سیم‌پیچی کنیم. اختلاف پتانسیل و نوع اتصال سیم‌پیچ‌ها تغییری نمی‌کنند.

راه حل: تعداد دور سیم‌پیچ قبلی برای هر فاز برابر است

با : $$N_۱ = N\frac{Z}{۲m}$$

$$N_۱ = ۱۵\frac{۳۶}{۲\times ۳} = ۹۰$$ دور

تعداد دور سیم‌پیچی جدید برای هر فاز برابر خواهد شد

با : $$N_۲ = \frac{۲P_۲}{۲P_۱}N_۱ = \frac{۶}{۴}\times ۹۰ = ۱۳۵$$ دور

تعداد هادی‌هایی که در هر شیار واقع می‌شوند، برابر است

با : $$N_{z۲} = \frac{N_۲\times ۶}{Z} = \frac{۱۳۵\times ۶}{۳۶} = ۲۲/۵$$ دور

سطح مقطع هادی جدید برابر است با :

$$A_۲ = A_۱\frac{۲P_۱}{۲P_۲} = ۳\times ۲/۹۸\times\frac{۲}{۳} = ۵/۹۶mm^۲$$

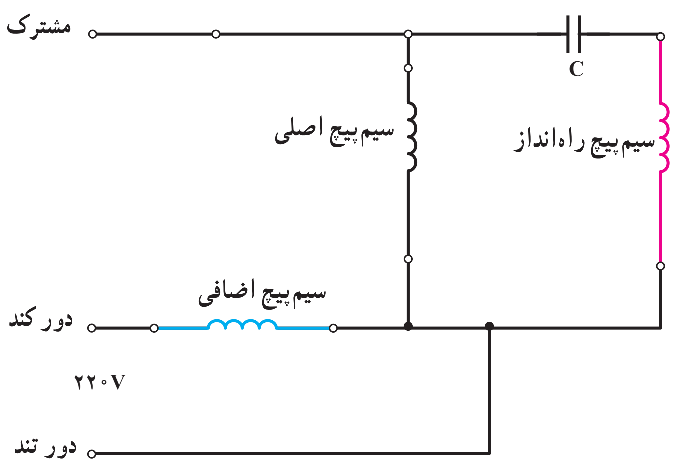
تعداد سیم‌های واقع در هر شیار برای حالت قبل ۴۵ دور بود اما اکنون برای حالت ۶ قطب، تعداد هادی‌های هر شیار ۲۲/۵ و با سطح مقطع $۵/۹۶mm^۲$ است. به‌جای این که این سطح مقطع زیاد را مثلاً از دو سیم موازی با یک‌دیگر به‌دست آوریم، می‌توانیم با دو برابر کردن تعداد هادی هر شیار ($۴۵ = ۲ \times ۲۲/۵$) و نصف کردن سطح مقطع آن ($\frac{۵/۹۶}{۲} = ۲/۹۸$) و سپس موازی کردن دو کلاف هر گروه کلاف با هم، به‌نتیجه‌ی ۴۵ دور از سیم با سطح مقطع $۲/۹۸mm^۲$ برای هر کلاف (یا هر شیار) برسیم که با نتیجه‌ی محاسبه شده نیز برابری می‌کند. بدین ترتیب، دیگر نیازی نیست که تعداد هادی‌های محاسبه شده را به عدد صحیح تبدیل کنیم. هر کلاف از ۴۵ دور سیم تکی با قطر $d = ۱/۹۵mm^۲$ و سطح مقطع $۲/۹۸mm^۲$ پیچیده شده است. سپس دو کلاف هر گروه کلاف با یک‌دیگر موازی می‌شوند و پس از آن سه گروه کلاف با هم به‌صورت سری قرار می‌گیرند. درمجموع، سیم‌پیچ یک فاز شامل ۱۳۵ دور سری و دو راه موازی جریان خواهد بود.

با تغییر قطب، قدرت موتور نیز تغییر می‌کند و نسبت تغییر برابر است با :

$$\frac{P_{u_۲}}{P_{u_۱}} = \frac{۲P_۱}{۲P_۲} = \frac{۲}{۳}$$

در این‌جا چون تعداد دور موتور کم‌تر شده است و درنتیجه، موتور خوب خنک نمی‌شود، بهتر است قدرت آن باز هم کمی کاهش یابد.

در موتورهای یک فازه، برای تغییر تعداد دور می‌توان از روش تغییر ولتاژ سیم‌پیچی نیز استفاده کرد. با تغییر ولتاژ سیم‌پیچی، شدت میدان مغناطیسی و درنتیجه لغزش موتور تغییر خواهد کرد. بدین منظور، با سری کردن یک سیم‌پیچ اضافی با سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز یا فقط با سیم‌پیچ اصلی می‌توان افت ولتاژ روی سیم‌پیچی و دور را کاهش داد (شکل ۳ــ۸). سیم‌پیچی اضافی ذکر شده می‌تواند در همان شیارهای مربوط به سیم‌پیچ اصلی پیچیده شود.



شکل ۳ــ۸ــ موتور دو دور با سیم‌پیچ تعدیل ولتاژ یک فاز

۵ــ۸ــ محاسبه برای تعویض هادی‌های مسی با آلومینیومی

گاهی لازم می‌شود که بدون تغییر دادن ولتاژ و فرکانس و تعداد قطب‌های موتور، در تجدید سیم‌پیچی به‌جای سیم مسی از آلومینیمی و یا به‌جای سیم آلومینیمی از سیم مسی استفاده کنیم. مثلاً در تجدید سیم‌پیچی یک موتور یک فاز که در آن برای مقاومت اهمی سیم‌پیچ راه‌انداز از سیم آلومینیمی استفاده شده است، به‌علت نداشتن سیم آلومینیمی از سیم مسی استفاده می‌کنیم. در این‌جا ابتدا به بررسی تعویض سیم‌های مسی با آلومینیومی ــ که در عمل به‌ندرت پیش می‌آید ــ می‌پردازیم و سپس عکس آن را شرح می‌دهیم.

اگر بخواهیم با این تغییر در جنس سیم‌پیچی در جریان موتور تغییری حاصل نشود، باید سطح مقطع سیم‌آلومینیمی را بیش‌تر از مس درنظر بگیریم اما چون اندازه‌ی شیار و ضخامت عایق شیار ثابت است و به اندازه هادی‌های اولیه‌ی خود طراحی شده و تعداد هادی‌های آلومینیمی نیز باید به‌همان تعداد هادی‌های مسی باشد، در انجام این کار با مشکل مواجه خواهیم شد. معمولاً نمی‌توانیم سطح مقطع سیم آلومینیمی را بیش‌تر از سطح مقطع سیم مسی بگیریم و مقطع آن با سیم مسی برابر خواهد شد. در این‌صورت، در مقادیر و اندازه‌های الکتریکی ماشین تغییراتی ایجاد خواهد شد. این تغییرات از متفاوت بودن قابلیت هدایت الکتریکی دو فلز نتیجه می‌شود. مقاومت مخصوص آلومینیم از مس بیش‌تر است و بنابراین، چگالی جریان برای هادی آلومینیمی باید کم‌تر از هادی مسی انتخاب شود.

اگر با ثابت بودن تعداد دور و سطح مقطع طول هر دو سیم‌پیچ را مساوی فرض کنیم، در این صورت :

$$R_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \times R_{Cu} = \frac{۰/۰۲۷۸}{۰/۰۱۷۵} R_{Cu}$$

$$\Rightarrow R_{Al} = ۱/۵۸ R_{Cu}$$

یعنی اگر به‌جای سیم‌پیچی مسی، یک سیم‌پیچی آلومینیمی با همان مشخصات را قرار دهیم، مقاومت اهمی آن در حدود ۱/۵۸ برابر خواهد شد.

در سیم‌پیچی مسی (سیم‌پیچی اول قبل از تعویض) و در حالت کار نامی موتور، تلفات ژولی سیم‌پیچ‌های هر فاز $R_{Cu}I_۱^۲$ می‌شود که $I_۱$ جریان نامی فازی است و مقدار آن را می‌توان از روی پلاک موتور به‌دست آورد.

چون موتور با سیم‌پیچ آلومینیمی باید به‌همان اندازه گرم شود که با سیم‌پیچ قبلی خود ــ یعنی با سیم‌پیچ مسی ــ گرم می‌شده است، تلفات ژولی در سیم آلومینیمی نیز باید برابر با تلفات ژولی در سیم‌پیچ مسی باشد و چون در این‌جا $R_{Al} > R_{Cu}$ است، پس جریان $I_۲$ ــ یعنی جریان فازی که از سیم‌پیچ آلومینیمی عبور می‌کند ــ باید از $I_۱$ کوچک‌تر باشد.

بنابراین، برای این که موتور پس از سیم‌پیچی مجدد با سیم آلومینیمی، به همان اندازه‌ی نامی اولیه گرم شود، باید $I_۲ = ۰/۷۹۵۵I_۱$ باشد. در حالت استفاده از سیم آلومینیمی به‌جای سیم مسی، جریان ۲۰/۴۵ درصد کوچک‌تر می‌شود و به‌همین ترتیب، قدرت موتور نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این موضوع، یک موتور با سیم‌پیچی مسی و با قدرت $P_{n۱} = ۱۰۰KW$ پس از تجدید سیم‌پیچی توسط سیم آلومینیمی و با تعداد دور و سطح مقطع مساوی سیم مسی و با همان ولتاژ و اندازه‌های عایق اولیه اگر قدرتی برابر با $P_{n۲} = ۷۹/۵۵KW$ داشته باشد، به‌همان اندازه‌ی نامی گرم خواهد شد و صدمه‌ای نخواهد دید پس نتیجه می‌گیریم که با تعویض یک سیم‌پیچ مسی با سیم آلومینیمی در اندازه‌های مساوی، مقاومت اهمی هر فاز حدود ۵۸ درصد افزایش می‌یابد و باید از جریان نامی و هم‌چنین قدرت موتور به اندازه‌ی ۲۰/۴۵ درصد نسبت به سیم‌پیچی مسی کاست. به‌همین جهت، از این حالت به‌ندرت در عمل استفاده می‌شود.

مثال: سیم‌پیچی مسی یک موتور سه‌فاز آسنکرون رتور قفسی باید با سیم آلومینیمی تعویض شود، بدون این که اندازه‌های سیم و عایق و نوع اتصال و ولتاژ شبکه تغییر کنند. مقادیر نامی ماشین عبارت است از :

$$P_n = ۱۸/۴KW \text{ و } U = ۳۸۰/۲۲۰V \quad Y/\Delta$$

$$\eta = ۸۴/۸\% \qquad I = ۳۵/۶ \big/ ۶۱/۶A$$

پس از تعویض سیم‌پیچی با سیم آلومینیمی، موتور دارای مقادیر نامی زیر باید باشد تا حرارت آن بیش‌تر از حد مجاز نشود.

$$P_n = ۱۴/۶KW \text{ و } U = ۳۸۰/۲۲۰V \quad Y/\Delta$$

$$\text{و } I = ۲۸/۳/۴۹A$$

۶ـ۸ـ محاسبه برای تعویض هادی‌های آلومینیمی با مسی

آن چه در حالت قبل درمورد جایگزینی سیم آلومینیمی به‌جای سیم مسی گفتیم، درموردی بود که سطح مقطع سیم و قطر عایق روی آن و عایق داخل شیارها در هر دو حالت یکی باشد. درنتیجه، از نظر ابعاد شیار در جا زدن سیم‌ها در داخل شیار، اشکالی پیش نمی‌آمد. حال می‌خواهیم بررسی کنیم که اگر سیم‌پیچ اولیه از آلومینیم باشد و به‌جای آن بخواهیم از سیم مسی استفاده کنیم، در قطر سیم چه تغییری ایجاد می‌شود.

چون قابلیت هدایت مس، از آلومینیم بیش‌تر است، می‌توان به‌جای سیم آلومینیمی از یک سیم مسی با سطح مقطع کم‌تری استفاده کرد در این‌صورت در هنگام جا زدن کلاف‌ها در شیارها نیز مشکلی پیش نخواهد آمد. اگر با ثابت بودن تعداد دور سیم‌پیچی، طول دو سیم‌پیچ را برابر قرار دهیم، می‌توانیم قطر سیم مسی را که باید جایگزین سیم آلومینیمی شود، بدون تغییری در جریان یا قدرت موتور به‌دست آوریم.

$$R_{Al} = R_{Cu} \Rightarrow \rho_{Al} . L_{Al}/A_{Al} = \square_{Cu} L_{Cu}/A_{Cu}$$

$$L_{Al} = L_{Cu} \quad \text{و}$$

$$\frac{A_{Al}}{A_{Cu}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \quad \text{و} \quad A_{Al} = \frac{d^{۲}{}_{Al} . \pi}{۴} \quad \text{و}$$

$$A_{Cu} = \frac{d^{۲}{}_{Cu} . \pi}{۴} \Rightarrow \frac{d^{۲}{}_{Al}}{d^{۲}{}_{Cu}} = \frac{۰/۰۲۷۸}{۰/۰۱۷۵}$$

$$\Rightarrow d_{Cu} = ۰/۷۹۳ d_{Al}$$

یعنی اگر به‌جای سیم آلومینیمی از سیم مسی با قطر محاسبه شده استفاده کنیم، در جریان و قدرت نامی موتور تغییری حاصل نمی‌شود و موتور نیز بیش‌تر از مقدار نامی گرم نخواهد شد. درعین حال، چون سطح مقطع سیم نیز کم‌تر شده است، به‌راحتی در داخل شیارها جای خواهند گرفت. حتی می‌توان قطر سیم‌مسی را کمی بیش‌تر از مقدار گفته شده در نظر گرفت و بدین ترتیب، قدرت موتور را تا حدودی افزایش داد.