

ساعات آموزش		
نظری	عملی	جمع
۱	۱۱	۱۲

تغییر سیم پیچی

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

- ۱- تعداد دور هر کلاف را محاسبه کند.
- ۲- قطر سیم مورد نیاز را محاسبه کند.
- ۳- برای تغییر ولتاژ، تعداد دور و قطر سیم را محاسبه کند.
- ۴- برای سرعت کم‌تر موتور، تعداد دور و قطر سیم را محاسبه کند.
- ۵- برای تعویض هادی‌های مسی یا آلومینیمی، قطر سیم را محاسبه کند.
- ۶- برای تعویض هادی‌های آلومینیمی یا مسی، قطر سیم را محاسبه کند.

۸- تغییر سیم پیچی

تعداد دور سیم پیچی و قطر سیم با توجه به مقادیر به دست 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 به کار می‌رود، به عوامل متعددی از قبیل شرایط کار، اندازه، مواد اولیه و... بستگی دارد و قابل تغییر است. قدرت خروجی موتور P_2 برحسب KW و یا اسب بخار (PS)، مقدار ضریب بهره موتور . برحسب درصد، ولتاژ خطی U برحسب ولت، جریان خط برحسب آمپر ضریب قدرت و نوع اتصال سیم پیچ‌های موتور به شبکه معمولاً بر روی پلاک موتور نوشته می‌شود و در محاسبات می‌توان از آن‌ها استفاده کرد (شکل ۸-۱).

در کارگاه‌های تعمیراتی اغلب لازم می‌شود که سیم پیچی ماشین‌های سه فاز یا یک فاز را تعویض کنند. سیم پیچی جدید یا براساس مشخصات قبلی ماشین انجام می‌گیرد یا این که برای کاربرد جدیدی که مورد نیاز است محاسبه می‌شود.

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

در صورتی که سیم پیچی معیوب در ماشین موجود نباشد یا لازم باشد مقادیر نامی ماشین یا سیم پیچی آن تغییر یابد، باید محاسبه‌های لازم را انجام داد. در این جا ابتدا به محاسبه‌ی

۱					
Typ ۲					
۳	۴	Nr ۵			
۶	۷	۷	۸	A	
۹	۱۰	۱۱	cos .	۱۲	
۱۳	۱۴	/min	۱۵	Hz	
۱۶	۱۷	۱۸	V	۱۹	A
Isol-Kl ۲۰	p ۲۱	۲۲	t		
۲۳					

شکل ۸-۱- پلاک موتور

جدول ۸-۱

شماره	توضیح
۱	سازنده - علامت کارخانه
۲	تیپ - 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
۶ و ۷	(۶) نوع اتصال استاتور مانند λ (اتصال ستاره) Δ (اتصال مثلث) (۷) ولتاژ نامی
۸	جریان نامی
۹ و ۱۰ و ۱۱	(۹، ۱۰) 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
۱۳ و ۱۴	(۱۳) جهت گردش مثلاً راست گرد از طرف محور (۱۴) دور نامی
۱۵	فرکانس نامی
۱۶	Err (۱۶) (تحریک) در ماشین‌های جریان مستقیم
۱۷	Lff (رتور) در ماشین‌های (سنکرون)
۱۸	(۱۷) نوع اتصال سیم پیچ رتور (۱۸) تحریک نامی هم‌چنین ولتاژ رتور در حالت سکون
۱۹	۱۹ جریان تحریک نامی - جریان رتور
۲۰	کلاس عایقی مانند A, E, B و غیره
۲۱	نوع حفاظت مانند P33
۲۲	وزن به تن در ماشین‌های بزرگ‌تر از یک تن
۲۳	توضیحات دیگر

برحسب دور در دقیقه U/\min ، P_{S_1} قدرت ظاهری ورودی
برحسب VA، C ضریب برحسب $\frac{VA}{Cm^3} \times \frac{\min}{U}$ است.

منحنی ۸-۱ 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. در صورتی که مقدار C به حد بالایی
منحنی نزدیک باشد، موتور از نوع باز است و باید تهویه در آن
به خوبی انجام گیرد. در صورتی 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 هر یک، از رابطه‌ی ضریب C و انتقال ضریب به دست آمده
به منحنی ۸-۱ قدرت موتور را به دست آورد. اگر ضریب C
به دست آمده در خارج از منحنی یا در داخل سطح هاشور خورده
قرار گرفته باشد اما در نزدیکی حد مورد نظر نباشد، باید قدرت
دیگری را انتخاب کرد و همین عمل را تکرار نمود تا بالاخره
فاکتور C در نزدیکی حد مورد نظر واقع شود.

در هنگام محاسبه‌ی پارامترهای لازم برای سیم‌بندی موتور،
باید توجه داشت که به علت وجود تلفات در ماشین، قدرتی که برای
محاسبات استفاده می‌شود باید بیش‌تر از توان خارجی P_2 باشد.
توانی که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد، توان ظاهری ورودی
بوده و برحسب ولت‌آمپر است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$P_{S_1} = \frac{P_2}{\cos.}$$

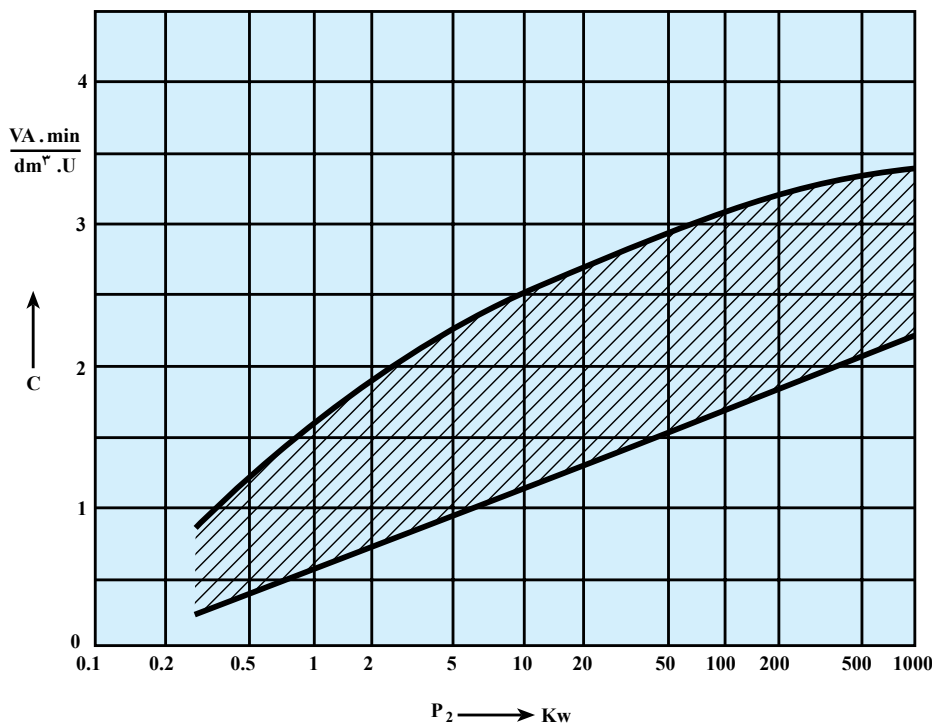
قدرت ظاهری ورودی (P_{S_1}) یک موتور با مجذور قطر
داخلی استاتور (Di^2) و طول شیارهای استاتور (l) و تعداد
دور سنکرون موتور n_s ، متناسب است. پس می‌توان نوشت:

$$P_{S_1} = C \cdot Di^2 \cdot l \cdot n_s$$

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.

$$C = \frac{P_{S_1}}{Di^2 \cdot l \cdot n_s}$$

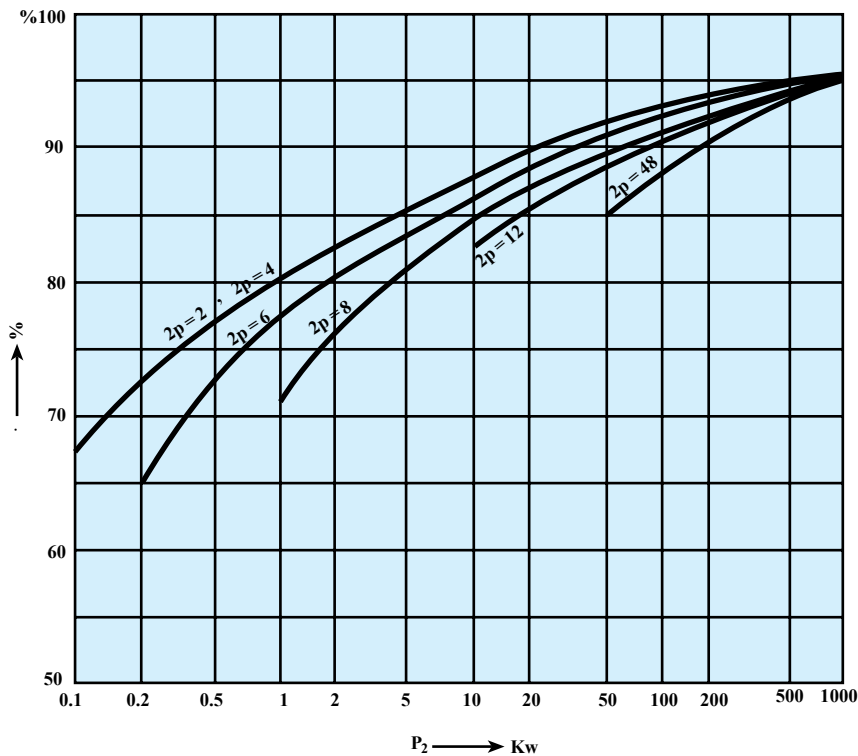
در این رابطه، Di قطر دهانه استاتور برحسب Cm ، l طول
شیار و یا ضخامت ورقه‌ها برحسب Cm ، n_s دور سنکرون



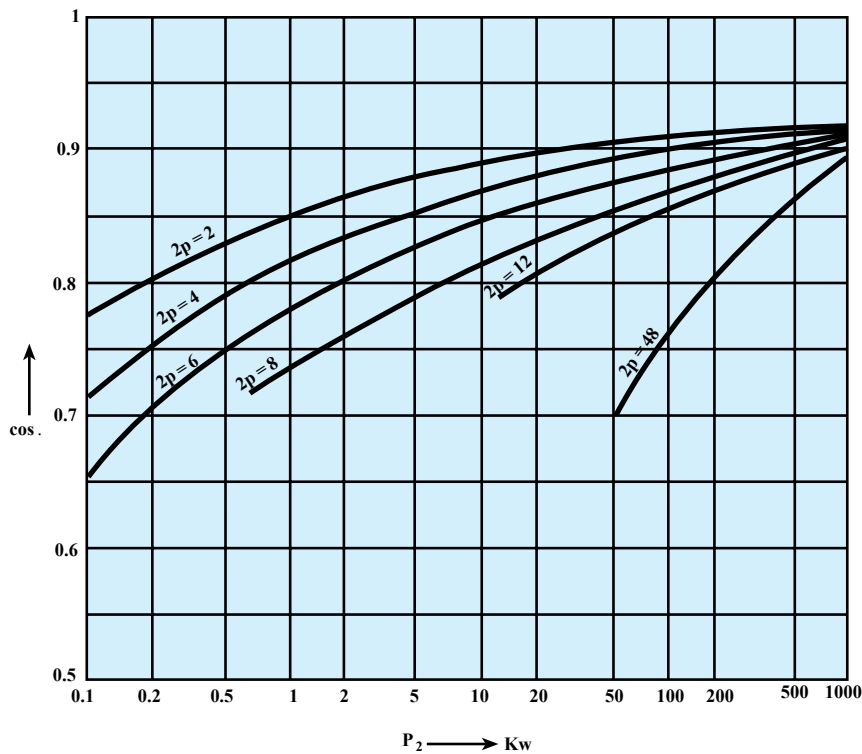
منحنی ۸-۱ - ضریب C نسبت به توان خروجی

نشده باشد، می‌توان مقدار تقریبی آن‌ها را از این دو منحنی به دست آورد و در محاسبات تعداد دور کلاف و قطر سیم، از آن‌ها استفاده کرد. در زیر به شرح این محاسبات می‌پردازیم.

در منحنی ۸-۲ مقدار ضریب بهره و در منحنی ۸-۳ مقدار ضریب قدرت موتورها داده شده است. در صورتی که موتور فاقد پلاک باشد یا این مقادیر در روی پلاک آن مشخص



منحنی ۸-۲ - راندمان نسبت به توان خروجی



منحنی ۸-۳ - ضریب قدرت نسبت به توان خروجی

۸-۱- محاسبه‌ی تعداد دور هر کلاف

نیست و فرم سینوسی دارد؛ بنابراین، ابتدا مقدار اندکسیون ماکزیمم را از منحنی ۸-۴ و سپس مقدار متوسط اندکسیون را از رابطه‌ی $B_{av} = \frac{2}{\pi} B_{max}$ 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.

تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز استاتور را می‌توان از رابطه‌ی

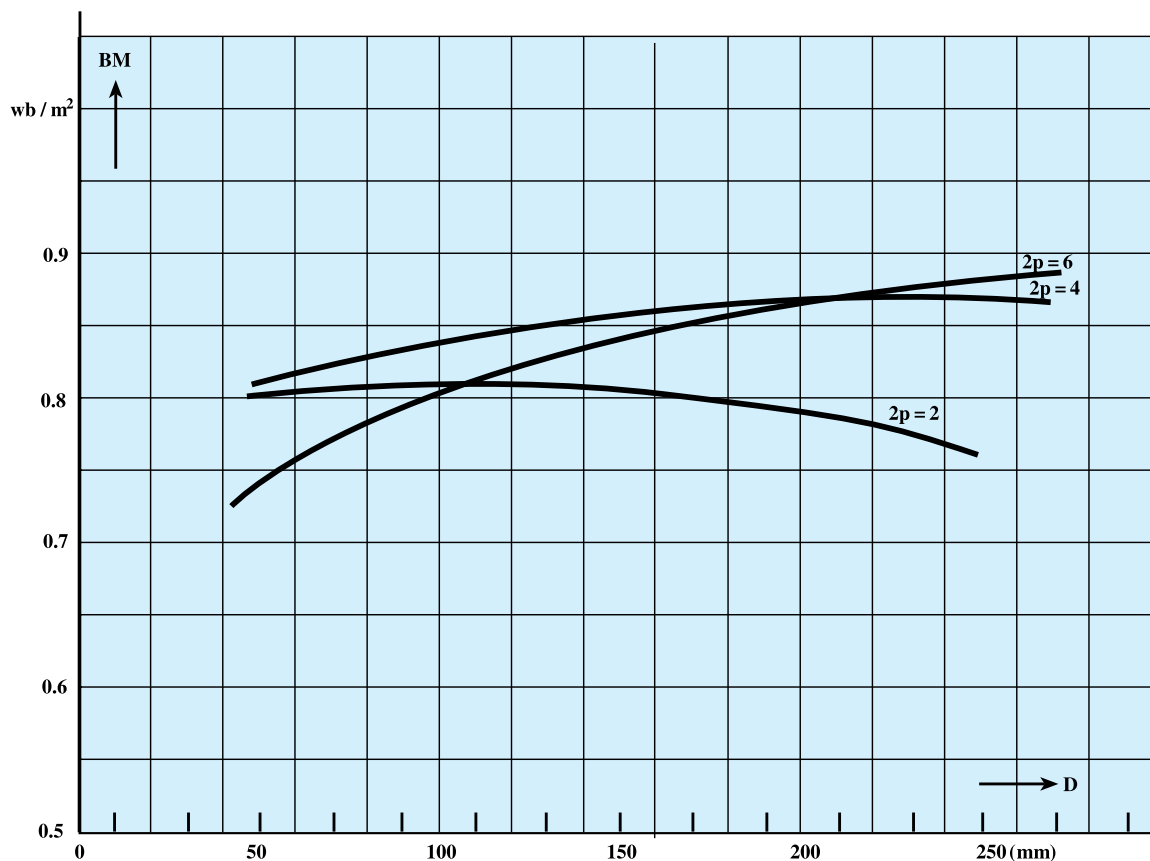
$$E = 4/44 \times f \times \phi \times N \times K$$

فوران متوسط زیر هر قطب است و از رابطه‌ی $\phi = B_{av} \cdot \tau_p \cdot l$

به‌دست می‌آید. τ_p نیز طول هر قطب و مقدار آن برابر است با:

$$\tau_p = \frac{D_i \cdot \pi}{2p}$$

تقسیم اندکسیون مغناطیسی در زیر هر قطب، یک‌نواخت



منحنی ۸-۴ چگالی میدان نسبت به قطر روتور

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 $N_z = \frac{N}{q \cdot p}$ استفاده کرد. در صورتی که سیم‌پیچی به صورت

بدین ترتیب، رابطه‌ای که برای محاسبه‌ی تعداد دور باید

از آن استفاده کرد به صورت زیر است.

$$N = \frac{E}{4/44 \times f \times \phi \times K} = \frac{K'U}{4/44 \times f \times \phi \times K}$$

ضریب K' نسبت بین E و U و مقدار آن بین ۰/۹۵ تا

دو طبقه انجام گیرد، باید تعداد هادی‌های واقع در هر شیار زوج باشد تا تعداد حلقه‌های هر کلاف عدد صحیح به دست آید.

۱-۱-۸- تعیین ضریب ولتاژ سیم پیچی: یکی از

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

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

در صورتی که هادی‌های یک فاز در زیر هر قطب، در شیارهای مختلف تقسیم شوند - یعنی $q = 1$ باشد - ولتاژ القایی در هر یک از کلاف‌ها با یک دیگر اختلاف فاز دارد. اختلاف سطح کل از جمع برداری ولتاژهای القایی در کلاف‌ها به دست می‌آید و بنابراین کوچک‌تر از جمع جبری آن‌ها می‌شود. در صورتی که هادی‌های یک فاز در زیر یک قطب، در یک شیار واقع شده باشند - یعنی $q = 1$ باشد - می‌توانیم بگوییم که در همه‌ی هادی‌های واقع در یک شیار، ولتاژها تقریباً یکسان و هم‌فازند. در این صورت، جمع برداری ولتاژهای القایی در هادی‌ها با جمع جبری آن‌ها برابر خواهد بود.

دلیل این که در حالت اول جمع برداری ولتاژهای القایی، از جمع جبری ولتاژها کوچک‌تر شد، در حقیقت تأثیر ضریبی به نام

$$K_Z = \frac{\text{جمع برداری ولتاژها}}{\text{جمع جبری ولتاژها}}$$

می‌باشد. در حالت دوم، جمع برداری ولتاژهای القایی با جمع جبری آن‌ها برابر می‌شود؛ در نتیجه، ضریب منطقه‌ای $K_Z = 1$ بود. هرچه گروه کلاف مربوط به یک فاز به طور 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 سیم پیچی سه فاز

که در آن $q = 2$ باشد، برابر با $K_Z = 0.966$ و اگر $q = 2$ باشد برابر با $K_Z = 0.956$ محاسبه می‌شود^۱. مشاهده می‌شود که مقدار q عملاً در ضریب پخش تأثیر زیادی ندارد و می‌توان در محاسبات یک سیم پیچی سه فازه برای حالتی که q از ۲ بزرگ‌تر باشد، مقدار ضریب منطقه‌ای را برابر با $K_Z = 0.96$ منظور داشت.

در سیم پیچی یک فازه، در صورت استفاده از تمام شیارهای زیر هر قطب برای یک فاز، ضریب پخش $K_Z = 0.637$ و در صورت استفاده از $\frac{2}{3}$ شیارها برای یک فاز، ضریب پخش برابر با $K_Z = 0.825$ خواهد شد^۲. بنابراین، نسبت ولتاژ القایی در دو حالت برابر است با:

$$\frac{1}{3} \times \frac{0.637}{0.825} \approx 1/16$$

نسبت به دست آمده بدین معنی است که در موتور یک فازه در حالتی که تمام شیارها برای فاز اصلی سیم پیچی شوند، با وجود این که مواد مصرفی بیش از ۵۰ درصد حالتی است که فقط $\frac{2}{3}$ شیارها مربوط به یک فاز باشند، اما تنها حدود ۱۶ درصد اضافه ولتاژ خواهیم داشت. به همین دلیل، در سیم پیچی موتورهای یک فاز اغلب $\frac{2}{3}$ شیارها توسط سیم پیچی اصلی پر می‌شود.

ب - ضریب ولتاژ کوتاهی گام K_S (فاکتور گام)^۲: اگر

گام سیم پیچی از گام قطبی کوچک‌تر باشد، اختلاف سطح القایی در سیم پیچی، کم‌تر از حالتی خواهد بود که گام سیم پیچی با گام قطبی برابر است. ضریبی که در این رابطه به کار می‌رود، ضریب ولتاژ کوتاهی گام نامیده می‌شود و مقدار آن برای چند حالت در جدول ۸-۲ داده شده است.

برای سادگی محاسبات، در جدول ۸-۳ مقدار ضریب ولتاژ سیم پیچی برای بعضی از سیم پیچ‌ها داده شده است.

۱ و ۲ - هنجریان برای بی‌بردن به روش‌های محاسبه، می‌توانند به کتاب‌هایی که در این زمینه موجود است، مراجعه کنند.

جدول ۲-۸- ضریب ولتاژ کوتاهی گام

$\varepsilon = \frac{yZ}{y} =$	$\frac{5}{6}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
$K_S =$	۰/۹۶۶	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۷۱

جدول ۳-۸- ضریب ولتاژ سیم پیچی

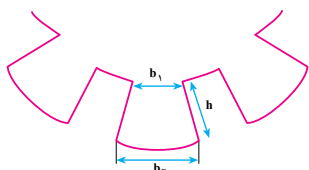
$q =$	۲			۳			
$\frac{yZ}{y} =$	$\frac{6}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{9}{9}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{7}{9}$	$\frac{6}{9}$
$K =$	۰/۹۶۶	۰/۹۳۳	۰/۸۳۶	۰/۹۶۰	۰/۹۴۵	۰/۹۰۲	۰/۸۳۱

۲-۸- تعیین قطر سیم

به جای سیم کلفت استفاده کرد. در این صورت، باید مجموع سطح مقطع سیم‌های موازی با سطح مقطع سیم مورد نظر برابر باشد. قطر سیم را پس از مشخص کردن چگالی جریان می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$A = \frac{d^2}{4} = \frac{I}{J} \Rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{4I}{J}}$$

اگر بخواهیم از n سیم موازی با قطرهای d_1 و d_2 و ... و d_n به جای سیم محاسبه شده با قطر d استفاده کنیم، باید قطر سیم‌های مورد استفاده در رابطه‌ی $d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}$ صدق کند. اگر قطر سیم‌ها برابر باشد، قطر هر یک از آن‌ها $d_1 = \frac{d}{\sqrt{n}}$ می‌شود. در صورتی که یک شیار دوزنقه‌ای شکل کاملاً از سیم گرد پر شود، 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 به دست آورد.



$$d^2 N_Z = (b_1 + b_2 - 2)(h_n - 3)f$$

در این رابطه d قطر سیم با لاک بر حسب میلی‌متر و N_Z تعداد کل هادی‌های هر شیار، b_1 و b_2 دو قاعده کوچک و بزرگ شیار بر حسب میلی‌متر و h_n عمق شیار بر حسب میلی‌متر

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، $\sqrt{3}$ برابر کم‌تر می‌باشد. جریان خط از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_L = \frac{P_\gamma}{\sqrt{3} \cdot U_L \cos \phi}$$

پس از مشخص شدن مقدار جریانی که از سیم پیچ 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، سیم پیچ‌های موتور بیش‌تر گرم می‌شوند. پس چگالی جریان برای موتورهای به شرایط کار، نوع کار، مدت زمان کار کردن و خاموش بودن موتور و هم چنین شرایط تهویه و تعداد قطب‌های آن بستگی دارد. اغلب برای موتورهای معمولی باز، چگالی جریان بین $4/5$ تا 10 آمپر بر میلی‌متر مربع و در موتورهای معمولی بسته، چگالی جریان بین $3/5$ تا $8/5$ آمپر بر میلی‌متر مربع با توجه به نوع و محل مصرف آن انتخاب می‌شود. بدین ترتیب، با مشخص شدن چگالی جریان می‌توان قطر سیم را محاسبه کرد. در ماشین‌های کوچک و متوسط تا حدود 1000 PS، 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 به صورت موازی

است. عددهای ۲ و ۳ به خاطر وجود عایق در شیار و هم چنین

$$C = \frac{P_{S_1}}{Di^2 \cdot l \cdot n_s} = \frac{24/0.5 \times 10000}{25^2 \times 15 \times 10000}$$

$$= 2/57 \times 10^{-3} \frac{V.A.min}{Cm^3}$$

گوه روی شیار منظور می شوند. ضریب f نیز برای سیم پیچی یک طبقه برابر با 0.4 و برای سیم پیچی دو طبقه برابر با 0.36 است. برای مثال، در یک شیار دوزنقه ای شکل با اندازه های $b_1 = 10mm$ و $b_2 = 14mm$ و $h_n = 26mm$ که تعداد 80 عدد هادی در آن قرار می گیرد و سیم پیچی به صورت دو طبقه است، قطر سیم برابر است با:

$$d^2 = \frac{(b_1 + b_2 - 2)(h_n - 3)}{N_z} \times 0.36 = \frac{22 \times 23 \times 0.36}{80}$$

$$d^2 = 2/28 \Rightarrow d = 1/5mm$$

در صورتی که ضخامت لاک روی سیم حدود 0.1 میلی متر باشد. باید از سیم لاکی نمره $1/4$ که قطر آن با لاک، $1/5$ میلی متر می شود، استفاده کرد. برای آشنایی بیش تر شما با توضیحات داده شده به ذکر یک مثال می پردازیم.

مثال: محاسبه ی تعداد دور و قطر سیم لازم برای سیم پیچی یک موتور آسنکرون رتور قفسی به صورت دو طبقه و $q = 3$ و با گام کسری و ضریب کوتاهی گام $\epsilon = \frac{1}{q}$ مورد نظر است. سایر مشخصات این موتور عبارت است از:

قدرت خروجی	$P_2 = 18KW$
تعداد شیارهای استاتور	$Z = 54$
قطر دهانه ی استاتور	$Di = 250mm$
طول شیار	$l = 150mm$
ولتاژ و نوع اتصال	$\lambda = 380V$
تعداد دور سنکرون	$n_s = 1000 \text{ r.p.m}$

راه حل: از روی منحنی های $2-8$ و $3-8$ مقدار ضریب بهره $\eta = 0.87$ و ضریب قدرت $\cos \phi = 0.86$ برای این موتور به دست می آید.

قدرتی که سیم پیچ های موتور باید بر اساس آن طراحی شود، برابر است با:

$$P_{S_1} = \frac{P_2}{\eta \cdot \cos \phi} = \frac{18}{0.87 \times 0.86} = 24/0.5 KVA$$

اگر مقدار C را برای مقادیر داده شده $Di = 25Cm$ و

اگر مقدار C را که از رابطه ی بالا به دست آمده، در منحنی $1-8$ برای $P_2 = 18KW$ جست و جو 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 به خوبی انجام می گیرد، قدرت انتخابی برای آن مناسب است اما در صورتی که موتور از نوع بسته بود و مقدار C نیز همین مقدار به دست می آمد، برای قدرت موتور می بایست اعدادی کم تر از 18 کیلووات انتخاب شوند و سپس با محاسبه ی اعدادی که برای C به دست می آیند و انتقال آن ها بر روی منحنی، توان واقعی موتور را به دست آورد.

برای محاسبه ی تعداد دور سیم پیچ های هر فاز استاتور، باید ولتاژ فازی محاسبه شود. ولتاژ خط $380V$ و نوع اتصال آن ستاره است. پس ولتاژی که بر روی سیم پیچ های هر فاز قرار می گیرد، برابر است با:

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

اندکسیون مغناطیسی در فاصله هوایی برای این موتور در حالت بی باری از روی منحنی $4-8$ $B_{max} = 8750G$ در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب، در هر قطب مقدار ϕ برابر است با:

$$\phi = \frac{2}{\pi} B_{max} \cdot l \cdot \tau_p = \frac{B_{max} \cdot l \cdot Di}{P}$$

$$\phi = \frac{8750G \times 25Cm \times 15Cm}{3} = 1/0.9 \times 10^6 M$$

$$= 1/0.9 \times 10^{-2} V.S$$

ضریب ولتاژ سیم پیچی K نیز از روی جدول $2-8$ برای $P = 3$ و $q = 3$ و ضریب کوتاهی گام $\frac{1}{q}$ ، برابر با $K = 0.945$ می شود. بدین ترتیب، تعداد دور در هر فاز برابر است با:

$$N = \frac{E}{4/44 \times f \times \phi \times K} = \frac{K'U}{4/44 \times f \times \phi \times K}$$

می توان چگالی جریان را بیش تر انتخاب کرد. در غیر این صورت، باید موتور را برای قدرت کم تری طراحی نمود.

$$N = \frac{0.96 \times 220}{4/44 \times 50 \times 0.945 \times 1/0.9 \times 10^{-2}} = 92 \text{ دور}$$

تعداد هادی های واقع در هر شیار برابر است با:

$$N_z = \frac{N}{q.p} = \frac{92}{3 \times 3} = 10/22$$

همان طور که پیش از این نیز گفته شد، در سیم پیچی دو طبقه باید تعداد هادی هایی که در هر شیار قرار می گیرند، عدد زوج باشد تا تعداد حلقه های هر کلاف، عدد صحیح بشود. لذا برای این موتور، $N_z = 12$ و در نتیجه $N = 108$ را انتخاب می کنیم. به این ترتیب، چون در هر شیار دو کلاف قرار می گیرد، هر کلاف دارای $\frac{12}{2} = 6$ حلقه خواهد بود.

برای محاسبه ی قطر سیم، باید ابتدا جریانی را که از هر حلقه عبور می کند به دست آوریم. چون در این جا سیم پیچ ها به صورت ستاره بسته شده اند. با دانستن ضریب بهره و ضریب قدرت، جریان خط را که با جریان فاز برابر است به دست می آوریم.

$$I_L = I_{ph} = \frac{P_2}{3 \cdot \cos \phi \cdot U_{ph}}$$

$$I_{ph} = \frac{18000}{3 \times 0.87 \times 0.86 \times 220} = 36/5 A$$

با انتخاب چگالی جریان $J = 5 \frac{A}{mm^2}$ قطر هادی برابر می شود با:

$$d = 1/13 \sqrt{\frac{I_{ph}}{J}} = 1/13 \sqrt{\frac{36/5}{5}} = 3 mm$$

به جای یک سیم گرد با قطر 3 mm بدون لاک، می توان از دو هادی که به صورت موازی با یک دیگر پیچیده می شوند، استفاده کرد. در این صورت، قطر هادی جدید d' برابر است با:

$$\frac{d}{d'} = \sqrt{2} \Rightarrow d' = \frac{d}{\sqrt{2}}$$

$$d' = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2/1 mm$$

پس از محاسبه ی قطر و تعداد دور سیم، باید بررسی کرد که سیم های محاسبه شده و عایق در شیارهای استاتور جای می گیرند یا خیر. در صورتی که هادی ها در درون شیار جای نگیرند و امکان خنک کردن و تهویه ی بهتر موتور نیز وجود داشته باشد،

۳-۸- محاسبه ی سیم پیچی برای تغییر ولتاژ

گاهی لازم می شود که سیم پیچی یک موتور را برای یک ولتاژ - غیر از ولتاژ نامی - تغییر دهیم. در این صورت، با توجه به اطلاعاتی که از سیم پیچ قبلی موتور به دست می آید، باید محاسبات مجددی را برای تعداد دور و قطر سیم پیچ جدید انجام دهیم. این مورد با ذکر یک مثال شرح داده می شود.

موتوری که ولتاژ آن باید تغییر کند، یک موتور سه فاز با رتور قفسی است و لازم است از ولتاژ $220V/220/127$ به ولتاژ $380V/220/127$ تغییر سیم پیچی داده شود تا قابل استفاده در ایران باشد. سیم پیچی این موتور که در حالت اتصال کلاف های آن به صورت مثلث، به ولتاژ 127 ولت و در صورت اتصال ستاره به ولتاژ 220 ولت سه فازه اتصال پیدا می کرد، باید تغییر کند. به طوری که در صورت اتصال مثلث به ولتاژ سه فازه 220 ولت و در صورت اتصال ستاره، به ولتاژ سه فازه 380 ولت اتصال یابد. با این تغییر سیم پیچی، نوع اتصال (ستاره - مثلث) و قدرت و دور آن نباید تغییر کنند. سایر مشخصات این موتور به قرار زیر است: تعداد قطب ها $2P = 4$ و تعداد شیارها $Z = 36$ و تعداد شیار زیر هر قطب مربوط به هر فاز $q = 3$ و سیم پیچی یک طبقه و هر فاز موتور دارای دو گروه کلاف و هر کلاف نیز از $N_z = 24$ دور تشکیل شده است.

قطر سیم بدون لاک $d = 1/3$ و جنس آن از مس و سطح مقطع آن بدون لاک $A = 1/327 mm^2$ می شود.

قطر سیم با لاک $d_{is} = 1/36$ و سطح مقطع آن با لاک برابر با $A_{is} = 1/452 mm^2$ است.

سطح اشغال شده در هر شیار، برابر با $N_z \cdot A_{is} = 24 \times 1/452 = 34/848 mm^2$ است. این سطح

باید توسط هادی های عایق دار جدید پر شود. تعداد کلاف های هر فاز $\frac{36}{3 \times 2}$ است. و بنابراین تعداد حلقه های کل یک فاز

$$N = \frac{N_z \cdot Z}{2m} = \frac{24 \times 36}{2 \times 3} = 144 \text{ دور می شود.}$$

با توجه به این که مقادیر مغناطیسی موتور باید ثابت بماند،

پس تعداد دور جدید N_2 برابر است با:

$$N_2 = N \frac{U_2}{U} = 144 \times \frac{220}{127} = 249/4$$

$$N_{Z2} = \frac{249/4 \times 2 \times 3}{36} = 41/6 \approx 42 \text{ هادی}$$

سطح مقطع هادی جدید را نیز با توجه به ولتاژ قدیم و

جدید می‌توانیم به طریق زیر حساب کنیم:

$$A_2 = A_1 \frac{U_1}{U_2} = 1/327 \times \frac{127}{220} = 0/767 \text{ mm}^2$$

سطح مقطع سیم استاندارد برابر با $A_2 = 0/786 \text{ mm}^2$ و

قطر آن $d_2 = 1 \text{ mm}$ است. قطر این سیم با لاک برابر

می‌باشد و چون باید در هر شیار ۴۲ عدد از این سیم‌ها قرار گیرد،

پس سطح کل اشغال شده در هر شیار برابر با

مقدار ۶ درصد بیش‌تر از سطح اشغالی توسط هادی‌های قبلی

است. $N_{Z2} \cdot A_{2is} = 42 \times 0/882 = 37/044 \text{ mm}^2$ خواهد شد. این

در صورتی که شیار جا نداشته باشد و نتوان هادی‌های

در صورتی که شیار جا نداشته باشد و نتوان هادی‌های

جدیدی را در درون آن جای داد، باید از سیم با قطر کم‌تر – که در این مثال ۰/۹۵ بدون لاک می‌باشد – به جای سیم یک استفاده کرد. در این حالت، قدرت موتور تا حدود ۹ درصد کاهش می‌یابد.

گاهی موتور را برای دو ولتاژ مختلف – که ولتاژ بیش‌تر دو

برابر ولتاژ کم‌تر می‌باشد، مثلاً ۲۲۰ و ۴۴۰ ولت – سیم‌پیچی

می‌کنند. برای این کار، سیم‌پیچ هر یک از فازها به دو قسمت

مساوی تقسیم می‌شود و در ولتاژ کم‌تر، این دو قسمت با یک‌دیگر

به صورت موازی و در ولتاژ بیش‌تر، با یک‌دیگر به صورت 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 در مجموع دو مدار

موازی را تشکیل دهند اما برای ولتاژ بیش‌تر، باید هر چهار گروه

کلاف را با یک‌دیگر به صورت سری قرار داد. در این صورت،

ولتاژ هر کلاف صرف‌نظر از ولتاژ تغذیه‌ی موتور، همیشه برای

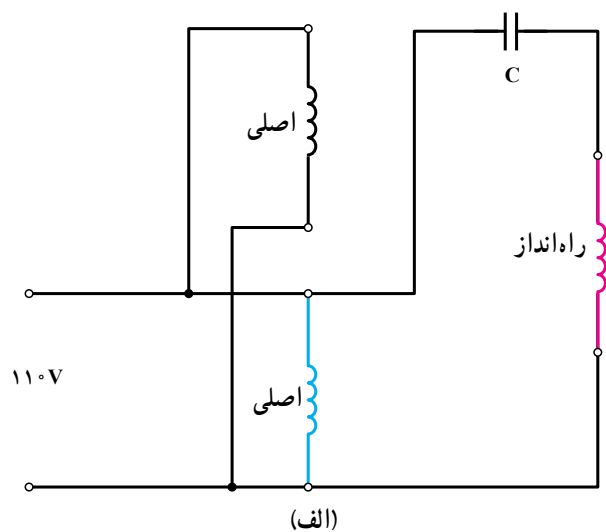
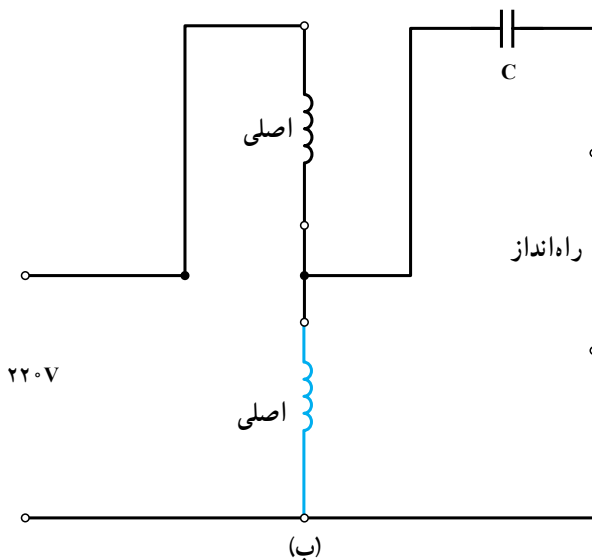
ولتاژ کم‌تر و ولتاژ بیش‌تر یکی خواهد بود.

اگر موتور یک فاز باشد، سیم‌پیچ اصلی دو قسمت می‌شود

و سیم‌پیچ راه‌انداز نیز بر مبنای ولتاژ کم‌تر پیچیده شده و در هر

حالت با یک قسمت از سیم‌پیچ اصلی، به صورت موازی قرار

می‌گیرد (شکل ۲-۸-الف و ب).



شکل ۲-۸- موتور یک فاز با دو ولتاژ کار

۴-۸- محاسبه سیم پیچی برای دور کم تر موتور

با افزایش تعداد قطب‌ها از دور موتور کاسته می‌شود و با کم کردن تعداد قطب‌ها دور موتور افزایش می‌یابد. لذا افزایش دور موتور به دلیل 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 سیم پیچی 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:

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{2P_2}{2P_1} \quad (1)$$

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

در صورتی که ولتاژ فازی ثابت بماند، باید حاصل $\phi \cdot N \cdot K = \text{Const}$ باشد. ضریب ولتاژ سیم پیچی K فقط به مقدار خیلی جزئی با تغییر قطب تغییر می‌کند.

$$\phi_1 N_1 = \phi_2 N_2 \quad (2)$$

از ترکیب دو رابطه‌ی ۱ و ۲ می‌توان نوشت:

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{2P_1}{2P_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

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

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

$$N_2 = N_1 \frac{2P_2}{2P_1} = N_1 \frac{n_{s1}}{n_{s2}}$$

$$A_2 = A_1 \frac{2P_1}{2P_2} = A_1 \frac{n_{s2}}{n_{s1}}$$

$$P_{u2}[W] = P_{u1}[W] \frac{2P_1}{2P_2} = P_{u1}[W] \frac{n_{s2}}{n_{s1}}$$

در این فرمول P_{u1} ، توان مفید موتور است.

با اضافه کردن تعداد قطب‌های یک موتور با تجدید سیم پیچی، 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_2 و A_2 و P_2 را با کمک روابط گفته شده برای تغییر قطب محاسبه کنیم و پس از آن، محاسبات را برای تغییر ولتاژ در صورت ثابت ماندن توان به کار ببریم.

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

$$P = 7 \text{ KW}$$

$$U = 380 / 220 \text{ V}$$

$$\lambda / \Delta$$

$$I = 12 / 42 / 21 / 52 \text{ A}$$

$$n = 1470 \text{ r.p.m}$$

$$\eta = 86\%$$

$$\cos \phi = 0 / 856$$

استاتور دارای $Z = 36$ شیار و سیم پیچی استاتور به صورت یک طبقه است. گروه کلاف‌ها با یک دیگر سری هستند و تعداد آن‌ها برابر با $P = 2$ است. کلاف‌ها با سه سیم موازی با قطر $d = 1 / 95$ میلی‌متر و ۱۵ دور پیچیده شده‌اند. در نتیجه، در هر شیار ۴۵ سیم وجود دارد. سطح مقطع هر سیم برابر با $2 / 98$ میلی‌متر مربع و سطح مقطع هر هادی کلاف (سه سیم موازی) $3 \times 2 / 98 = 8 / 94 \text{ mm}^2$ است.

این موتور را می‌خواهیم برای حالت $2P = 6$ قطب مجدداً سیم پیچی کنیم. اختلاف پتانسیل و نوع اتصال سیم پیچ‌ها تغییری نمی‌کنند.

محاسبه شده نیز برابری می کند. بدین ترتیب، دیگر نیازی نیست که تعداد هادی های محاسبه شده را به عدد صحیح تبدیل کنیم. هر کلاف از ۴۵ دور سیم تکی با قطر $d = 1/95 \text{ mm}^2$ و سطح مقطع $2/98 \text{ mm}^2$ پیچیده شده است. سپس دو کلاف هر گروه کلاف با یک دیگر موازی می شوند و پس از آن سه گروه کلاف با هم به صورت سری قرار می گیرند. در مجموع، سیم پیچ یک فاز شامل ۱۳۵ دور سری و دو راه موازی جریان خواهد بود.

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

$$\frac{P_{u_2}}{P_{u_1}} = \frac{2P_1}{2P_2} = \frac{2}{3}$$

در این جا چون تعداد دور موتور کم تر شده است و در نتیجه، موتور خوب خنک نمی شود، بهتر است قدرت آن باز هم کمی کاهش یابد.

در موتورهای یک فاز، برای تغییر تعداد دور می توان از روش تغییر ولتاژ سیم پیچی نیز استفاده کرد. با تغییر ولتاژ سیم پیچی، شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه لغزش موتور تغییر خواهد کرد. بدین منظور، با سری کردن یک سیم پیچ اضافی با سیم پیچ اصلی و راه انداز یا فقط با سیم پیچ اصلی می توان افت ولتاژ روی سیم پیچی و دور را کاهش داد (شکل ۳-۸). سیم پیچی اضافی ذکر شده می تواند در همان شیارهای مربوط به سیم پیچ اصلی پیچیده شود.

راه حل: تعداد دور سیم پیچ قبلی برای هر فاز برابر است

$$N_1 = N \frac{Z}{2m} \quad \text{با:}$$

$$N_1 = 15 \frac{36}{2 \times 3} = 90 \quad \text{دور}$$

تعداد دور سیم پیچی جدید برای هر فاز برابر خواهد شد

$$N_2 = \frac{2P_2}{2P_1} N_1 = \frac{6}{4} \times 90 = 135 \quad \text{دور} \quad \text{با:}$$

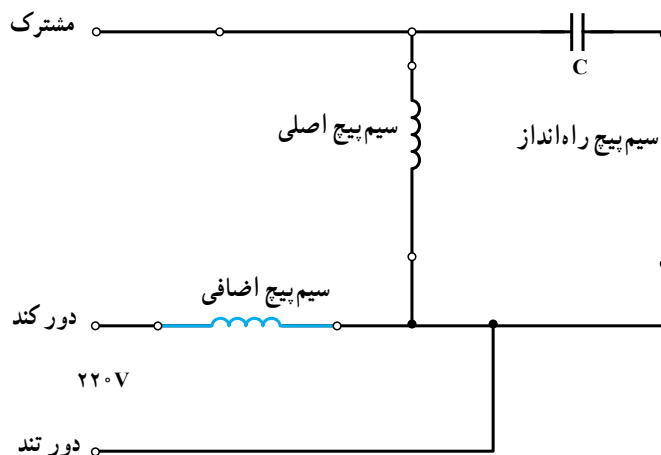
تعداد هادی هایی که در هر شیار واقع می شوند، برابر است

$$N_{z_2} = \frac{N_2 \times 6}{Z} = \frac{135 \times 6}{36} = 22/5 \quad \text{دور} \quad \text{با:}$$

سطح مقطع هادی جدید برابر است با:

$$A_2 = A_1 \frac{2P_1}{2P_2} = 3 \times 2/98 \times \frac{2}{3} = 5/96 \text{ mm}^2$$

تعداد سیم های واقع در هر شیار برای حالت قبل ۴۵ دور بود اما اکنون برای حالت ۶ قطب، تعداد هادی های هر شیار ۲۲/۵ و با سطح مقطع $5/96 \text{ mm}^2$ است. به جای این که این سطح مقطع زیاد را مثلاً از دو سیم موازی با یک دیگر به دست آوریم، می توانیم با دو برابر کردن تعداد هادی هر شیار $(2 \times 22/5 = 45)$ و نصف کردن سطح مقطع آن $(\frac{5/96}{2} = 2/98)$ و سپس موازی کردن دو کلاف هر گروه کلاف با هم، به نتیجه ی ۴۵ دور از سیم با سطح مقطع $2/98 \text{ mm}^2$ برای هر کلاف (یا هر شیار) برسیم که با نتیجه ی



شکل ۳-۸- موتور دو دور با سیم پیچ تعدیل ولتاژ یک فاز

۸-۵- محاسبه برای تعویض هادی‌های مسی با آلومینیومی

روی پلاک موتور به دست آورد.

چون موتور با سیم پیچ آلومینیومی باید به همان اندازه گرم شود که با سیم پیچ قبلی خود - یعنی با سیم پیچ مسی - گرم می‌شده است، تلفات ژولی در سیم آلومینیومی نیز باید برابر با تلفات ژولی در سیم پیچ مسی باشد و چون در این جا $R_{Al} > R_{Cu}$ است، پس جریان I_2 - یعنی جریان فازی که از سیم پیچ آلومینیومی عبور می‌کند - باید از I_1 کوچک‌تر باشد.

بنابراین، برای این که موتور پس از سیم پیچی مجدد با سیم آلومینیومی، به همان اندازه‌ی نامی اولیه گرم شود، باید به جای سیم مسی، جریان $20/45 I_1$ باشد. در حالت استفاده از سیم آلومینیومی به جای سیم مسی، جریان $20/45$ درصد کوچک‌تر می‌شود و به همین ترتیب، قدرت موتور نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این موضوع، یک موتور با سیم پیچی مسی و با قدرت $P_{n1} = 10 \text{ KW}$ پس از تجدید سیم پیچی توسط سیم آلومینیومی و با تعداد دور و سطح مقطع مساوی سیم مسی و با همان ولتاژ و اندازه‌های عایق اولیه اگر قدرتی برابر با $P_{n2} = 79/55 \text{ KW}$ داشته باشد، به همان اندازه‌ی نامی گرم خواهد شد و صدمه‌ای نخواهد دید پس نتیجه می‌گیریم که با تعویض یک سیم پیچ مسی با سیم آلومینیومی در اندازه‌های مساوی، مقاومت اهمی هر فاز حدود ۵۸ درصد افزایش می‌یابد و باید از جریان نامی و هم‌چنین قدرت موتور به اندازه‌ی $20/45$ درصد نسبت به سیم پیچی مسی کاست. به همین جهت، از این حالت به ندرت در عمل استفاده می‌شود.

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

$$P_n = 18/4 \text{ KW} \text{ و } U = 380/220 \text{ V } Y/\Delta$$

$$\eta = 84/8\% \quad I = 35/6 / 61/6 \text{ A}$$

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

$$P_n = 14/6 \text{ KW} \text{ و } U = 380/220 \text{ V } Y/\Delta$$

$$\text{و } I = 28/3/49 \text{ A}$$

گاهی لازم می‌شود که بدون تغییر دادن ولتاژ و فرکانس و تعداد قطب‌های موتور، در تجدید سیم پیچی به جای سیم مسی از آلومینیومی و یا به جای سیم آلومینیومی از سیم مسی استفاده کنیم. مثلاً در تجدید سیم پیچی یک موتور یک فاز که در آن برای مقاومت اهمی سیم پیچ راه‌انداز از سیم آلومینیومی استفاده شده است، به علت نداشتن سیم آلومینیومی از سیم مسی استفاده می‌کنیم. در این جا ابتدا به بررسی تعویض سیم‌های مسی با آلومینیومی - که در عمل به ندرت پیش می‌آید - می‌پردازیم و سپس عکس آن را شرح می‌دهیم. اگر بخواهیم با این تغییر در جنس سیم پیچی در جریان موتور تغییری حاصل نشود، باید سطح مقطع سیم آلومینیومی را بیش‌تر از مس در نظر بگیریم اما چون اندازه‌ی شیار و ضخامت عایق شیار ثابت است و به اندازه‌ی هادی‌های اولیه‌ی خود طراحی شده و تعداد هادی‌های آلومینیومی نیز باید به همان تعداد هادی‌های مسی باشد، در انجام این کار با مشکل مواجه خواهیم شد. معمولاً نمی‌توانیم سطح مقطع سیم آلومینیومی را بیش‌تر از سطح مقطع سیم مسی بگیریم و مقطع آن با سیم مسی برابر خواهد شد. در این صورت، 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 آلومینیومی باید کم‌تر از هادی مسی انتخاب شود.

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

$$R_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \times R_{Cu} = \frac{0/278}{0/175} R_{Cu}$$

$$\Rightarrow R_{Al} = 1/58 R_{Cu}$$

یعنی اگر به جای سیم پیچی مسی، یک سیم پیچی آلومینیومی با همان مشخصات را قرار دهیم، مقاومت اهمی آن در حدود $1/58$ برابر خواهد شد.

در سیم پیچی مسی (سیم پیچی اول قبل از تعویض) و در حالت کار نامی موتور، تلفات ژولی سیم پیچ‌های هر فاز $R_{Cu} I_1^2$ می‌شود که I_1 جریان نامی فازی است و مقدار آن را می‌توان از

۸-۶- محاسبه برای تعویض هادی‌های آلومینیومی با مسی

موتور به دست آوریم.

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

$$\text{و } L_{Al} = L_{Cu}$$

$$\frac{A_{Al}}{A_{Cu}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \text{ و } A_{Al} = \frac{d_{Al}^2 \cdot \rho_{Cu}}{4}$$

$$A_{Cu} = \frac{d_{Cu}^2 \cdot \rho_{Al}}{4} \Rightarrow \frac{d_{Al}^2}{d_{Cu}^2} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} = \frac{0.0278}{0.0175}$$

$$\Rightarrow d_{Cu} = 0.793 d_{Al}$$

یعنی اگر به جای سیم آلومینیومی 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. در عین حال، چون سطح مقطع سیم نیز کم‌تر شده است، به راحتی در داخل شیارها جای خواهند گرفت. حتی می‌توان قطر سیم مسی را کمی بیش‌تر از مقدار گفته شده در نظر گرفت و بدین ترتیب، قدرت موتور را تا حدودی افزایش داد.

آن چه در حالت قبل در مورد جایگزینی سیم آلومینیومی به جای سیم مسی گفتیم، در موردی بود که سطح مقطع سیم و قطر عایق روی آن و عایق داخل شیارها در هر دو حالت یکی باشد. در نتیجه، از نظر ابعاد شیار در جا زدن سیم‌ها در داخل شیار، اشکالی پیش نمی‌آید. حال می‌خواهیم بررسی کنیم که اگر سیم پیچ اولیه از آلومینیوم باشد و به جای آن بخواهیم از سیم مسی استفاده کنیم، در قطر سیم چه تغییری ایجاد می‌شود.

چون قابلیت هدایت مس، از آلومینیوم بیش‌تر است، می‌توان به جای سیم آلومینیومی از یک سیم مسی با سطح مقطع کم‌تری استفاده کرد در این صورت در هنگام جا زدن کلاف‌ها در شیارها نیز مشکلی پیش نخواهد آمد. اگر با ثابت بودن تعداد دور سیم پیچی، طول دو سیم پیچ را برابر قرار دهیم، می‌توانیم قطر سیم مسی را که باید جایگزین سیم آلومینیومی شود، بدون تغییری در جریان یا قدرت