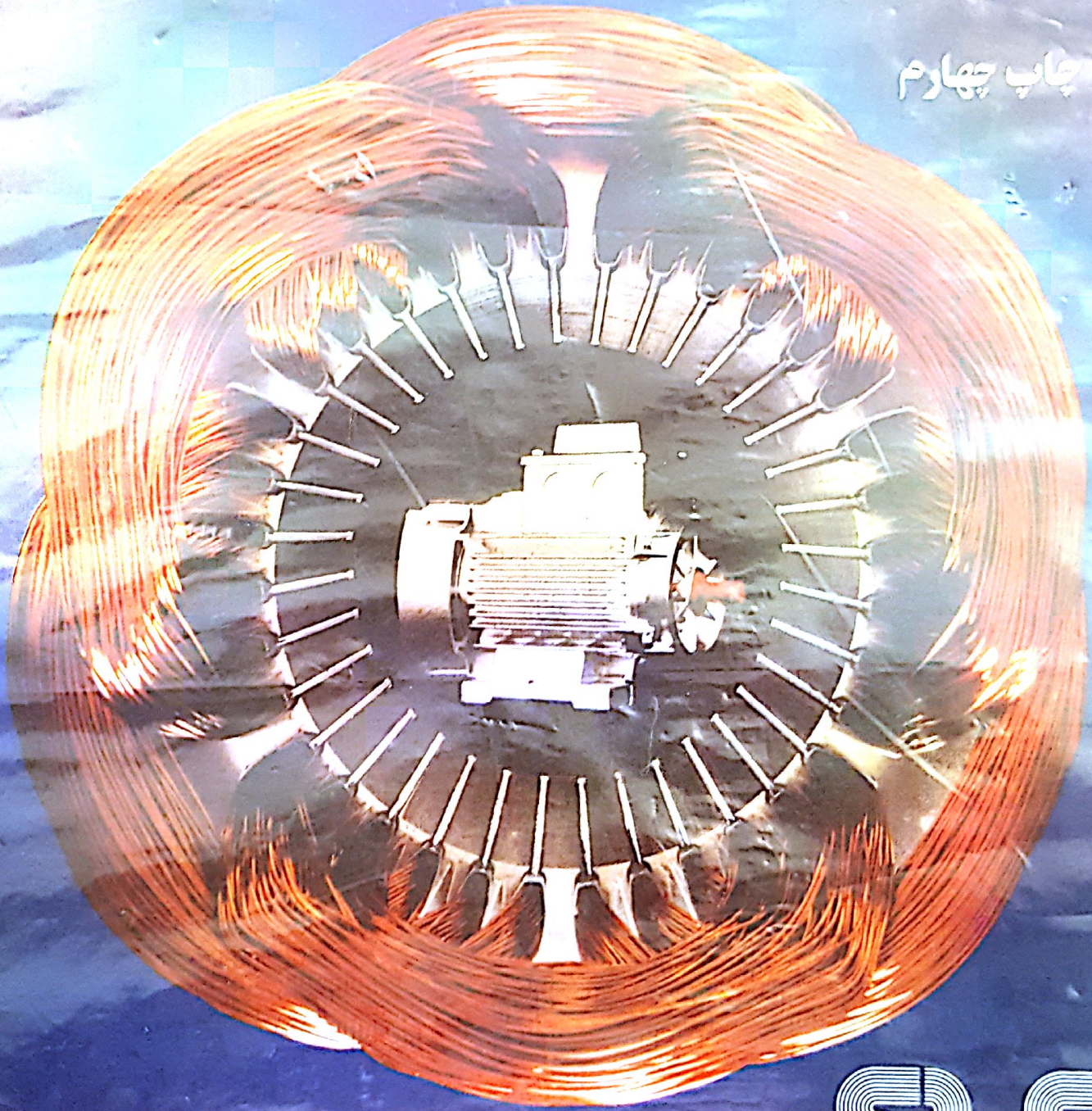
جلد اول

۲

محاسبه و طراحی

موتورهای الکتریکی القایی سه فاز

چاپ چهارم



SKF

سیم لاکی فارس

فصل دوم

محاسبات سیم‌پیچی استاتور موتورهای الکتریکی

تعیین تعداد دور هر کلاف از سیم‌پیچی موتور، و همچنین محاسبه قطر سیم مورد نیاز، به یک سری اطلاعات نیاز دارد که در این اطلاعات بعضی اصطلاحات خاص سیم‌پیچی بکار می‌رود. بدین منظور لازم است قبل از محاسبات با اصطلاحات سیم‌پیچی کاملاً آشنا شویم.

گام قطبی

تعداد شیارهایی که بین مراکز دو قطب متوالی قرار دارند گام قطبی نامیده می‌شود که آن را به y_p نشان خواهیم داد، به عبارت دیگر، گام قطبی سطحی از استاتور است که توسط یک قطب محاصره می‌شود. اگر تعداد شیارهای یک موتور را به z و تعداد قطبهای آنرا به $2p$ نمایش دهیم گام قطبی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$y_p = \frac{z}{2p}$$

گام سیم‌بندی یا گام کلاف

تعداد شیارهایی که بین دو بازوی یک کلاف از سیم پیچی استاتور قرار می‌گیرد گام کلاف یا گام سیم‌بندی نامیده می‌شود که آنرا به y_z نشان خواهیم داد.

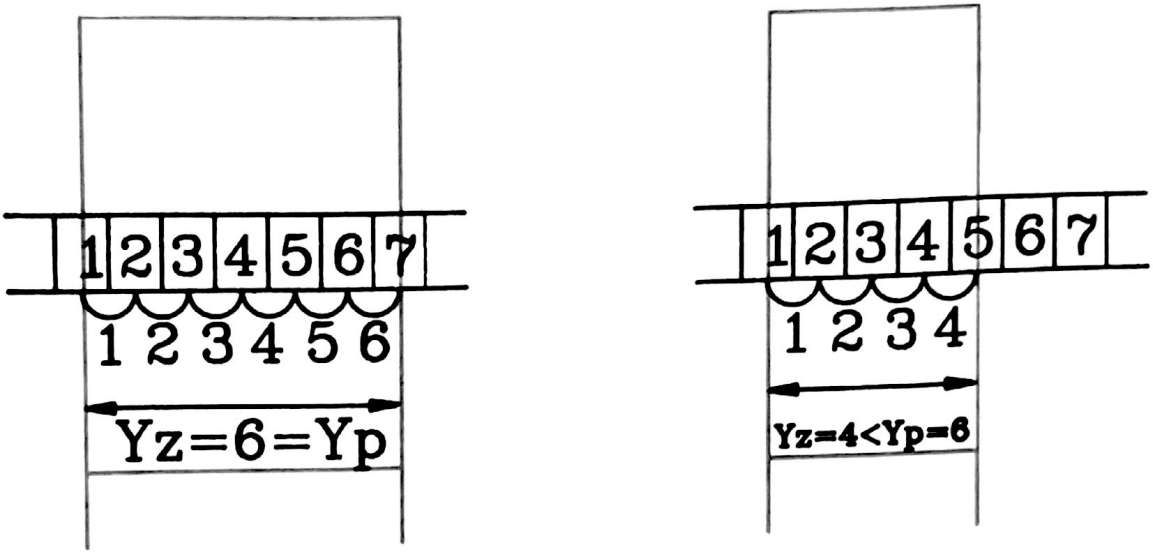
اگر $y_p = y_z$ باشد گام سیم‌بندی را گام کامل می‌گویند

اگر $y_z < y_p$ باشد گام سیم‌پیچی را گام کسری می‌نامند. کسری گام سیم‌پیچی حداکثر $\frac{1}{3}$ گام قطبی و حداقل یک شیار خواهد بود. نمونه‌ای از یک گام کامل و یک گام کسری برای موتور ۲۴ شیار چهار قطب در شکل ۱۴ (الف و ب) نشان داده شده‌اند. بطوریکه مشاهده می‌شود کسری گام در گام کسری، دو شیار است.

$$y_p = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$\text{حداکثر کسری گام} = \frac{1}{3} y_p = \frac{1}{3} \times 6 = 2$$

$$\text{کسری گام} = y_p - y_z = 6 - 2 = 4$$



ب: سیم‌بندی با گام کسری　　الف: سیم‌بندی با گام کامل

شکل ۱۴

در سیم‌بندی گام کامل به علت آنکه اختلاف فاز بین دو بازوی کلافها ۱۸۰ درجه الکتریکی است لذا نیروی محرکه بازوها با هم جمع‌جبری می‌شوند، ولی در سیم‌بندی گام کسری چون اختلاف بین دو بازوی کلاف کمتر از ۱۸۰ درجه الکتریکی است، لذا نیروی محرکه بازوها با هم جمع‌بُرداری می‌شوند. چون اندازه نیروی محرکه در هر دور از بازوهای کلاف یکسان است لذا جمع جبری نیروهای محرکه در گام کامل برای یک فاز و دور معین کلاف‌ها، از جمع‌برداری آنها بیشتر خواهد بود.

برای آنکه در گام کسری نیروی محرکه حالت گام کامل را بدست آوریم لازم است تعداد دور هر کلاف را افزایش دهیم تا موتور برای ولتاژ معین شبکه بتواند در قدرت اسمی کار کند، بنابراین در گام کسری برای دور کلاف ضریبی لازم است تا آنرا به مشخصات گام کامل برساند. این ضریب را ضریب کوتاهی گام می‌نامند و با ε نشان خواهیم داد.

زاویه الکتریکی هر شیار:

زاویه الکتریکی هر شیار بیان کنندهٔ این است که هر شیار با شیار ماقبل خود چند درجه الکتریکی اختلاف فاز دارد، و آنرا با α_{ez} نشان خواهیم داد. چون بین دو بازوی یک کلاف

۱۸۰ درجه‌الکتریکی اختلاف‌فاز وجود دارد، برای محاسبه زاویه الکتریکی هر شیار می‌توان از رابطه $\alpha_{ez} = \frac{۱۸۰}{y_p}$ استفاده کرد. y_p گام قطبی است که تعداد شیارهای بین دو بازوی کلاف را در گام کامل بیان می‌کند. از آنجایی که $y_p = \frac{z}{۲P}$ می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$\alpha_{ez} = \frac{۱۸۰}{y_p} = \frac{۱۸۰}{\frac{z}{۲P}}$$

$$\alpha_{ez} = \frac{۳۶۰ \times P}{z}$$

P تعداد زوج قطبهای موتور و z تعداد شیارهای استاتور می‌باشد.

بطور مثال زوایه الکتریکی هر شیار موتور ۲۴ شیار ۴ قطب به صورت $\frac{۲\times۳۶۰}{۲۴} = ۳۰^\circ$ محاسبه می‌شود.

ضریب کوتاهی وتر

ضریب کوتاهی وتر از رابطه $K_p = \sin\left(\frac{y_z \times \alpha_{ez}}{۲}\right)$ بدست می‌آید.(y_z گام سیم‌بندی و α_{ez} زاویه الکتریکی هر شیار است.) با توجه به شکل(ب ـ ۱۴) ضریب کوتاهی وتر به قرار زیر محاسبه می‌گردد:

$z = ۲۴$ و $۲P = ۴$

$$y_p = \frac{z}{۲P} = \frac{۲۴}{۴} = ۶$$

$$\text{کسری گام} = \frac{۱}{۳} y_p = \frac{۱}{۳} \times ۶ = ۲$$

$$\text{گام کلاف} = y_p - \text{کسری گام} = ۶ - ۲ = ۴$$

$$\alpha_{ez} = \frac{P \times ۳۶۰}{z} = \frac{۲ \times ۳۶۰}{۲۴} = ۳۰^\circ$$

$$K_p = \sin\left(\frac{y_z \times \alpha_{ez}}{۲}\right) = \sin\left(\frac{۴ \times ۳۰}{۲}\right) = ۰/۸۶۶$$

زاویه مکانیکی هر شیار: (α_{em})

زاویه مکانیکی هر شیار از رابطه $\alpha_{em} = \frac{۳۶۰}{z}$ بدست می آید. از مقایسه $\alpha_{ez} = \frac{P\times۳۶۰}{z}$ و $\alpha_{em} = \frac{۳۶۰}{z}$ می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\alpha_{ez} = P \times \alpha_{em}$$

ضریب توزیع (K_z)

چون امکان قرار دادن تمام سیم‌پیچی هر فاز در دو شیار امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا

جمع‌بُرداری را در مقابل جمع جبری بازگو می‌کند. لازم است برای جبران کاهش نیروی محرکه دور کلاف را افزایش داد. برای این منظور دور کلاف ضریب جدیدی خواهد داشت، که آن را ضریب توزیع سیم‌پیچی می‌نامند و از رابطه زیر تعیین و محاسبه می‌شود:

$$\text{ضریب توزیع } K_z = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q\sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}$$

در این رابطه m تعداد فازهای موتور، و q تعداد شیارهایی است که در هر فاز زیر پوشش یک قطب قرار می‌گیرد که می‌توان آن را از رابطه $q = \frac{z}{2Pm}$ محاسبه کرد.

مثال: ضریب توزیع سیم‌پیچی الکتروموتور سه‌فاز ($m = 3$) چهار قطب ($2P = 4$) با تعداد شیارهای ۲۴ را بدست آورید.

حل:

$2P = 4$ و $m = 3$ و $z = 24$

$$q = \frac{z}{2Pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

$$K_z = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q\sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{180}{2\times3}\right)}{2\sin\left(\frac{180}{2\times3\times2}\right)} = \frac{0/5}{2\sin(15)} = 0/966$$

ضریب سیم‌پیچی

حاصلضرب ضریب توزیع و ضریب کوتاهی وتر را ضریب سیم‌پیچی می‌گویند با Kd نمایش داده می‌شود.

$$K_d = K_P \times K_z = \sin\left(\frac{y_z \times \alpha_{ez}}{2}\right) \times \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q\sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}$$

کاهش یا خنثی‌کردن اثر هارمونیک‌ها

وجود پس‌ماند مغناطیسی در هسته روتور و استاتور، و اثر متقابل میدانهای آنها بر همدیگر موجب می‌گردد که توزیع میدان در سطح استاتور از حالت سینوسی خارج شود.

منحنی آن، مطابق منحنی ABCEFG شکل ۱۵ می‌شود. امواج را می‌توان به موج‌های DC ، سینوسی و کسینوسی، که فرکانس آنها مضرب صحیحی از فرکانس موج اصلی باشد، تجزیه کرد. امواج حاصل از تجزیه موج اصلی هر چقدر فرکانس بیشتری داشته باشند، از دامنه کمتری برخوردار خواهند بود. بدین علت اولین موج تجزیه‌شده که فرکانس آن با فرکانس موج اصلی برابر است از حداکثر دامنه برخودار است. امواج تجزیه‌شده، که از جمع آنها موج اصلی بدست می‌آید و فرکانس‌هایشان مضرب صحیحی از موج اصلی می‌باشند، هارمونیک‌های موج اصلی نامیده می‌شوند. هارمونیک‌های یک موج را می‌توان از آنالیز سری فوریه بدست آورد. همانطوریکه در شکل‌های ۱۵ مشاهده می‌شود، شکل b (هارمونیک سوم) و شکل c (هارمونیک پنجم) موج از جمله هارمونیک‌های فرد می‌باشند که از دامنه قابل توجهی برخوردارند و بیشتر به غیرسینوسی‌شدن موج اصلی کمک می‌کنند. لازم به توضیح است که در تجزیه موج شکل ۱۵ ، هارمونیک‌های کسینوسی صفر می‌شوند و از هارمونیک‌های سینوسی فقط هارمونیک‌های فرد باقی می‌مانند. برای آنکه هارمونیک موردنظر را حذف کنیم گام سیم‌بندی را کسری می‌پیچیم. برای حذف هارمونیک سوم کافی است $\frac{۱۸۰}{۳}$، و برای حذف هارمونیک پنجم $\frac{۱۸۰}{۵}$، و برای حذف هارمونیک nام، $\frac{۱۸۰}{n}$ درجه الکتریکی گام کامل سیم‌بندی را کوتاه می‌کنیم. اگر $\frac{۱۸۰}{n}$ را به α_{ez} (زاویه الکتریکی شیارها) تقسیم کنیم، کسری گام به‌دست می‌آید:

$$\text{کسری گام} = \frac{۱۸۰}{n \times \alpha_{ez}}$$

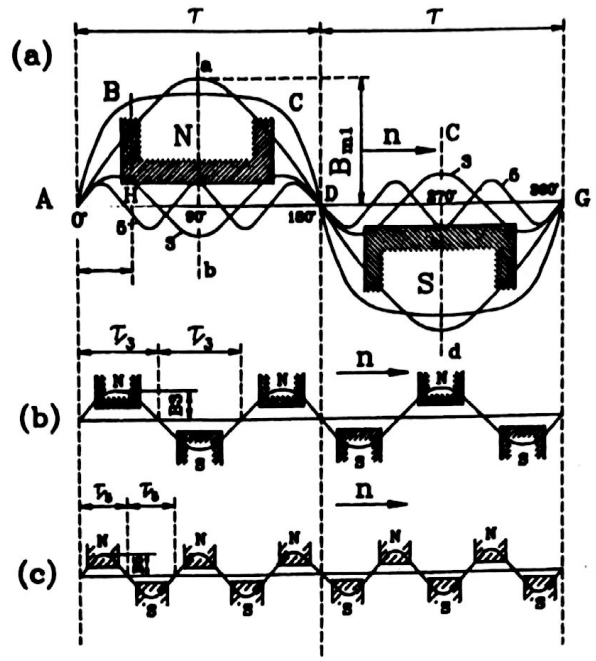
n نوع هارمونیکی است که در سیم‌بندی حذف می‌شود. برای هارمونیک نوع سوم $n = ۳$ و پنجم $n = ۵$ می‌باشد.

حداکثر کسری گام برای هارمونیک نوع سوم می‌باشد. اگر ε ضریب کوتاهی گام برای تعیین گام سیم‌بندی، و y_p گام قطبی باشد و $\varepsilon = (۱ - \frac{۱}{n})$ منظور شود، خواهیم داشت:

$$y_z = \varepsilon \times y_p \Rightarrow y_z = (۱ - \frac{۱}{n}) \times y_p \quad \text{(گام سیم‌بندی)} \quad (۱)$$

ضریب کوتاهی وتر را می‌توان با جایگزین کردن مقادیر $\alpha_{ez} = \frac{۲\pi \times P}{Z}$ و $y_z = \varepsilon \times y_p$ از رابطه ساده‌تر زیر محاسبه کرد:

$$K_p = \sin\left(\frac{y_z \times \alpha_{ez}}{۲}\right) = \sin\left(\frac{\varepsilon \frac{Z}{۲p} \times \frac{۲\pi P}{Z}}{۲}\right) \Rightarrow K_p = \sin\left(\frac{\pi}{۲} \times \varepsilon\right)$$



شکل ۱۵

محاسبه تعداد دور هر کلاف

نیروی محرکه الکتریکی در ماشین‌های جریان متناوب از رابطه $E = ۴/۴۴ \times f \times \varphi m \times N$ معین می‌شود. (f فرکانس شبکه، φm مقدار ماکزیمم فوران مغناطیسی در فاصله هوایی، و N تعداد دور سیم‌ها در هر فاز ماشین می‌باشد.)

محاسبات زیر را دنبال می‌کنیم:

$$E = ۴/۴۴ \times f \times \varphi_m \times N$$

$$N_{\text{دور}} = \frac{E}{۴/۴۴ \times f \times \varphi_m} \qquad (۲\text{-}۱)$$

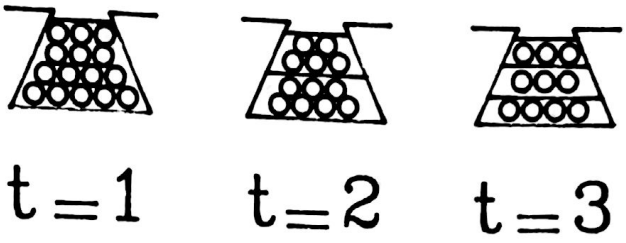
اگر k_b ضریب سیم‌بندی و γ تعداد شیارهای هر فاز باشد، از رابطه (۲-۱) دور هر کلاف به قرار زیر به‌دست می‌آید:

$$N_1 = \frac{E}{۴/۴۴ \times f \times \varphi_m \times K_d \times \gamma} \qquad (۲\text{-}۲)$$ عناصر هر کلاف

اگر تعداد شیارهای یک موتور ۴ قطب ۲۴ شیار باشد، و موتور یک طبقه سیم بندی شود، یعنی در هر شیار موتور یک بازوی کلاف قرار گیرد، برای هر فاز ۸ شیار و هر دو شیار توسط یک کلاف پُر می‌شود ۴ کلاف در هر فاز لازم است تا سیم بندی موتور را کامل کند. اگر تعداد طبقات سیم بندی را به t نشان دهیم تعداد شیارهای استفاده شده در یک فاز از رابطه زیر معین می‌شود.

$$\gamma = \frac{t \times z}{m} \qquad (۲-۳)$$

در رابطه (۲-۳) z تعداد شیارهای استاتور، t تعداد طبقات سیم‌بندی، و m تعداد فازها می‌باشد.



شکل ۱۶

E نیروی محرکه موتوراست که از ولتاژ شبکه، به اندازه افت ولتاژ سیم‌پیچ‌های هر فاز کمتر است اگر افت ولتاژ سیم‌پیچ هر فاز را به ΔV و ولتاژ فازی شبکه را به V_{ph} نشان دهیم برای نیروی محرکه E موتور می‌توان نوشت:

$$E = V_{ph} - \Delta V \qquad (۲-۴)$$

چون افت ولتاژ به درصد از رابطه $\%\Delta V = \frac{\Delta V \times ۱۰۰}{V_{ph}}$ به‌دست می‌آید اگر به جای ΔV مقدار به‌دست آمده را منظور کنیم رابطه ۴-۲ به صورت زیر بیان خواهد شد.

$$E = V_{ph} - \frac{V_{ph} \times \%\Delta V}{۱۰۰} \Rightarrow E = V_{ph}\left(۱ - \frac{\%\Delta V}{۱۰۰}\right) \qquad (۲-۵)$$

$\%\Delta V$ را بطور تقریبی از جدول زیر در محاسبات انتخاب می‌کنند.

۲P تعدادِ قطبها	۲	۴	۶	۸
ΔV افت‌ولتاژ به درصد	۲	۲/۵	۳	۳/۵

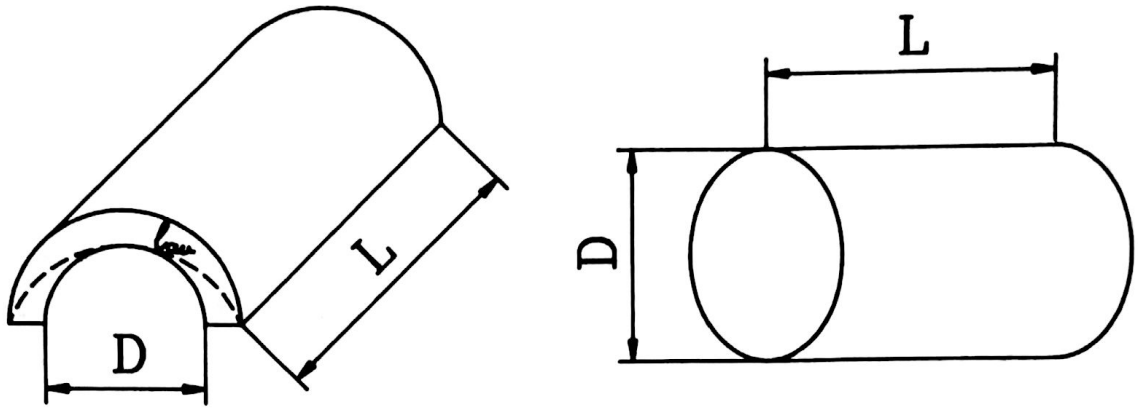
حداکثر افت ولتاژ را تقریباً ۳/۵٪ در محاسبات در نظر می‌گیرند. رابطه (۲-۳) با منظور کردن رابطه (۲-۵) بصورت رابطه (۲-۶) بیان خواهد شد.

$$N_b = \frac{V_{ph}\left(۱ - \%\Delta V\right)}{۴/۴۴ \times f \times \varphi_m \times \gamma \times K_d \times ۰/۹۵} \qquad (۲-۶)$$

۰/۹۵ ضریب تورق است که این مقدار برای فرکانس ۵۰ هرتز و ضخامت ورق ۰/۵ میلی‌متر منظور شده است.

$$\varphi_m = B_m \times A \qquad (۲-۷)$$

با توجه به شکل ۱۷ مقدار A را از رابطه $A_{av} = \frac{S_{av}}{۲P}$ بدست می‌آوریم. $\frac{S_{av}}{۲P}$ سطح متوسط هر قطب استاتور راکه به شکل استوانه است بیان می‌کند.



شکل ۱۷

$$\text{سطح جانبی استاتور} = S_{av} = l_{av} \times L \Rightarrow S_{av} = \frac{۲}{\pi} I^{(1)} \times L = \frac{۲}{\pi} D\pi L$$

$$\text{سطح محصور توسط یک قطب } A = \frac{S_{av}}{۲P} = \frac{۲DL}{۲P}$$

$$\varphi_m = B_m \times A = \frac{B_m \times ۲ \times D \times L}{۲P} \qquad (۲-۸)$$

در اینجا حرکت شار مغناطیسی طوری است که به صورت سینوسی در قطب توزیع می‌شود.

رابطه (۲-۸) را در رابطه (۲-۶) قرار می‌دهیم.

$$\text{عناصر هر کلاف } N_1 = \frac{V_{ph}(۱ - \%\Delta V)}{۴/۴۴ \times f \times \frac{۲ \times B_m \times L \times D}{۲P} \times K_d \times ۰/۹۵ \times \gamma} \qquad (۲-۹)$$

چون هر کلاف دو شیار را اشغال می‌کند تعداد دور هر کلاف از رابطه زیر بدست خواهد آمد: (۲γ تعداد شیارها در هر فاز است و در رابطه ۲-۱۰ بطور کلی با γ بیان شده است) (در مخرج معادله عدد ۲ حذف می‌شود)

1- $$l_{av} = \frac{۱}{\pi} \int_{۰}^{\pi} I_m \sin \alpha t \, d\alpha t = \frac{۱}{\pi} [I_m \cos \alpha t]_{۰}^{\pi} = \frac{I_m}{\pi} [-\cos \pi - (-\cos ۰)]$$

$$= \frac{I_m}{\pi} [-(-۱) - (-۱)] \quad \Rightarrow \quad l_{av} = \frac{۲}{\pi} I_m$$

$$N_b = \frac{V_{ph}\,(۱ - \%\Delta V) \times ۲P}{۴/۴۴ \times f \times B_m \times L_s \times D_s \times K_d \times \gamma \times ۰/۹۵} \qquad (۲-۱۰)$$

در رابطه (۱۰-۲)، V_{ph} ولتاژ فازی است. اگر موتور به صورت ستاره طراحی شود، در سیستم شبکه ایران $V_{ph}=220v$ ، اگر موتور به صورت مثلث باشد، $V_{ph}=380v$ (که همان ولتاژ خطی شبکه است) در محاسبات منظور می‌گردد. B_m ماکزیمم اندکسیون مغناطیسی است که از منحنی شماره ۱ $[B_m = f(D)]$ معلوم می‌شود. L_s طول هسته و D_s قطر داخلی هسته استاتور است و در رابطه (۱۰-۲) واحد هر دو به متر است.

مثال: موتور سه فاز ۳۶ شیار ۴ قطب مفروض است. می‌خواهیم استاتور این موتور را به صورت دو طبقه سیم‌بندی کنیم، اگر ولتاژ شبکه ۳۸۰ ولت و قطر استاتور $D_s = ۹۰\ mm$ و طول استاتور $L_s = ۴۵\ mm$ و $f = ۵۰\ H_z$ باشد، مطلوبست:

الف : تعداد دور هر کلاف موتور در اتصال ستاره در حذف هارمونیک سوم،

ب : تعداد دور هر کلاف موتور در اتصال مثلث در حذف هارمونیک پنجم.

حل:

الف : تعداد دور هر کلاف موتور در اتصال ستاره در حذف هارمونیک سوم،

$Z = ۳۶$ و $2P = ۴$ و $V_L = ۳۸۰$ و $t = ۲$ و $D_s = ۹۰mm$

$L_s = ۴۵\ mm$ و $f = ۵۰\ Hz$ و $n_1 = ۳$ و $n_2 = ۵$

با توجه به قطر استاتور $(D_s = ۹۰\ mm)$ و $۲P = ۴$ ، و منحنی شماره ۱ $B_m = f(D)$، اندازه B_m برای موتور تقریباً $۰/۸۴ \frac{Wb}{m^2}$ تعیین می‌شود.

$$\gamma = \frac{t \times z}{m} = \frac{۲ \times ۳۶}{۳} = ۲۴$$

$$K_d = K_p \times K_z$$

$$K_p = \sin\left(\frac{y_z \times \alpha_{ez}}{۲}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{۲} \times ۴\right)$$

$$\alpha_{ez} = \frac{P \times ۳۶۰}{z} = \frac{۲ \times ۳۶۰}{۳۶} = ۲۰^\circ$$

$$y_z = \varepsilon \times y_p \Rightarrow \varepsilon = ۱ - \frac{۱}{n_۱} = ۱ - \frac{۱}{۳} = \frac{۲}{۳} \quad \text{و} \quad y_p = \frac{z}{۲P} = \frac{۳۶}{۴} = ۹$$

$$y_z = \varepsilon \times y_p = \frac{۲}{۳} \times ۹ = ۶$$

ضریب کوتاهی وتر

$$K_p = \sin\left(\frac{۶ \times ۲۰}{۲}\right) = \sin ۶۰ = ۰/۸۶۶$$

یا $$K_p = \sin\left(\frac{\pi}{۲} \times \frac{۲}{۳}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{۳}\right) = ۰/۸۶۶$$

$$K_z = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{۲m}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{۲mq}\right)}$$

$$q = \frac{z}{۲Pm} = \frac{۳۶}{۴ \times ۳} = ۳$$

ضریب توزیع

$$K_z = \frac{\sin\left(\frac{۱۸۰}{۲ \times ۳}\right)}{۳ \sin\left(\frac{۱۸۰}{۲ \times ۳ \times ۳}\right)} = \frac{\sin(۳۰)}{۳ \sin(۱۰)} = ۰/۹۶$$

ضریب سیم‌پیچی

$$K_d = K_p \times K_z = ۰/۸۶۶ \times ۰/۹۶ = ۰/۸۳$$

از جدول افت ولتاژها $\Delta V = ۲/۵$ تعیین می‌شود $L_s = ۰/۰۴۵\ m$ $D_s = ۰/۰۹۰\ m$

$$N_b = \frac{۲۲۰\left(۱ - \frac{۲/۵}{۱۰۰}\right) \times ۴}{۴/۴۴ \times ۵۰ \times ۰/۸۴ \times ۰/۰۴۵ \times ۰/۰۹۰ \times ۰/۸۳ \times ۲۴ \times ۰/۹۵} = ۶۰ \text{ دور}$$

ب : تعداد دور هر کلاف موتور در اتصال مثلث در حذف هارمونیک پنجم.

با دقت در محاسبات بالا می‌بینیم که در این حالت ولتاژ فازی را باید به جای ۲۲۰ برابر ۳۸۰ ولت منظور نمود. ضمناً ضریب سیم پیچی نیز تغییر می‌کند.

$$y_z = \varepsilon \times y_p$$

$$\varepsilon = ۱ - \frac{۱}{n_۲} = ۱ - \frac{۱}{۵} = \frac{۴}{۵}$$

$$y_z = \frac{۴}{۵} \times ۹ = ۷/۲ \Rightarrow y_z = ۷$$

$$K_p = \sin\left(\frac{۷ \times ۲۰}{۲}\right) = ۰/۹۴$$

ضریب سیم پیچی در اتصال مثلث

$$K_d = K_p \times K_z = ۰/۹۴ \times ۰/۹۶ = ۰/۹۰$$

دور

$$N_b = \frac{۳۸۰\left(۱ - \frac{۲/۵}{۱۰۰}\right) \times ۴}{۴/۴۴ \times ۵۰ \times ۰/۸۴ \times ۰/۰۴۵ \times ۰/۰۹۰ \times ۰/۰۹۰ \times ۲۴ \times ۰/۹۵} \simeq ۹۶$$

محاسبه قطر سیم مورد نیاز استاتور

از روی پلاک موتور اطلاعات زیر را برای محاسبه قطر سیم به‌دست می‌آوریم.

توان خروجی موتور = P

ولتاژ تغذیه موتور = V

راندمان موتور = η

ضریب توان موتور = $\cos\varphi$

جریان دریافتی موتور با توجه به اطلاعات حاصل از رابطه (۱۱-۲) تعیین می‌شود:

$$I_L = \frac{P_2}{\sqrt{3}\, U_L \cos\varphi} \qquad (۱۱-۲)$$

در رابطه (۱۱-۲)، P برحسب وات، و I_L برحسب آمپر و V_L برحسب ولت می‌باشد. پس از آن که مقدار جریان دریافتی موتور از شبکه معلوم شد، با توجه به اتصال موتور (ستاره یا مثلث) جریان فازی را تعیین می‌کنیم.

اگر اتصال ستاره باشد $I_L = I_p$

اگر اتصال مثلث باشد $I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$

چگالی جریان را از منحنی شماره ۴ یعنی $j = f(D)$ معین می‌کنیم. چگالی جریان مقدار جریانی است که هر میلی‌مترمربع از سیم آن را تحمل می‌کند و با واحد $\frac{A}{mm^2}$ بیان می‌گردد. چگالی جریان به قطر و تعداد قطب های استاتور بستگی دارد. با معلوم شدن جریان هر فاز موتور و چگالی جریان، سطح مقطع سیم به mm^2 و قطر سیم به mm به قرار زیر تعیین می‌شود.

سطح مقطع سیم $$(mm^2)\ S = \frac{I_P\,[A]}{j\left[\frac{A}{mm^2}\right]}$$

قطر سیم $$(mm)\ d = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}}$$

مثال: موتوری به مشخصات $P = 1\ Hp$ و $D = 90$ و $2P = 4$ و $\%\eta = \%80$ و $\cos\varphi = 0/8$ و $V_L = 380V$ مفروض است. با استفاده از منحنی شماره ۴ $j = f(D)$ و محاسبات مورد نظر، قطر سیم را برای اتصال ستاره و مثلث موتور معین کنید.

$$I_L = \frac{P_2}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos\varphi} = \frac{1 \times 736}{\sqrt{3} \times 380 \times 0/80 \times 0/80} = 1/74\ A$$

نوع اتصال $\lambda \Rightarrow I_P = I_L = ۱/۷۴\ A$

$$\Delta \Rightarrow I_P = \frac{I_L}{\sqrt{۳}} = \frac{۱/۷۴}{\sqrt{۳}} = ۱\ A$$

با استفاده از منحنی شماره ۴ برای $D = ۹۰\ mm$ و $۲P = ۴$ ، اندازه $j = ۶/۲ A/mm^2$ معین می‌شود.

$$S_\lambda = \frac{I_P}{j} = \frac{۱/۷۴}{۶/۲} = ۰/۲۸\ mm^۲$$

$$d_\lambda = \sqrt{\frac{۴S}{\pi}}$$

قطر سیم برای اتصال ستاره

$$d_\lambda = \sqrt{\frac{۴ \times ۰/۲۸}{۳/۱۴}} \simeq ۰/۶۰\ mm$$

$$S_\Delta = \frac{۱}{۶/۲} = ۰/۱۶\ mm^۲$$

قطر سیم برای اتصال مثلث

$$d_\Delta = \sqrt{\frac{۴S}{\pi}} = \sqrt{\frac{۴ \times ۰/۱۶}{۳/۱۴}} \simeq ۰/۴۵\ m.m$$

در مواردی که به پلاک موتور دسترسی نباشد یا مشخصات لازم در پلاک موجود نباشد، محاسبات را مطابق دستورات تقریبی زیر دنبال می‌کنیم. این محاسبات کاملاً دقیق نبوده و دقت محاسبات، تقریباً ۹۰٪ می‌باشد. با استفاده از محاسبات فوق، و تجربه و آزمایش، مقادیر مطلوب بدست می‌آید.

$$P_۲ = K B_m^۲ D_r^۲ L_r n_r \quad [Kw] \qquad (۲-۱۲)$$

$P_۲$، توان خروجی روتور، به کیلووات محاسبه می‌شود. K ضریب توان‌یابی است که از منحنی شماره ۲ $K = f(D)$ بدست می‌آید و به قطر روتور (D_r) و تعداد قطب های موتور $(۲P)$ بستگی دارد. B_m اندکسیون مغناطیسی است که از منحنی شماره ۱ $[B_m = f(D)]$ معلوم می‌شود. D_r قطر روتور به میلی‌متر، و L_r طول هسته استاتور یا روتور به میلی‌متر منظور می‌شود. n_r دور روتور در هر دقیقه است.

$$n_r = n_s\ (۱ - \%S)$$

n_s دور سنکرون یا دور میدان مغناطیسی دوار سطح استاتور است که در هر دقیقه استاتور را می‌پیماید و S لغزش یا ضریب لنگی موتور است. S را از منحنی شماره ۳ $S = f(D)$ که به قطر روتور و تعداد قطب‌ها بستگی دارد معلوم می‌شود، و n_s را از

$n_s = \frac{f \times ۱۲۰}{۲P}$ تعیین می‌کنیم که f فرکانس شبکه و ۲P تعداد قطب های موتور است. راندمان (η) و ضریب توان ($\cos\varphi$) به ترتیب از منحنی‌های شماره ۶ و ۵ بدست می‌آید. منحنی‌های ۶ و ۵ از تغییرات لگاریتمی برخوردارند و موقع تعیین مقدار موردنظر به دقت بیشتری نیاز می‌باشد.

ارتفاع یوغ استاتور (H_c)

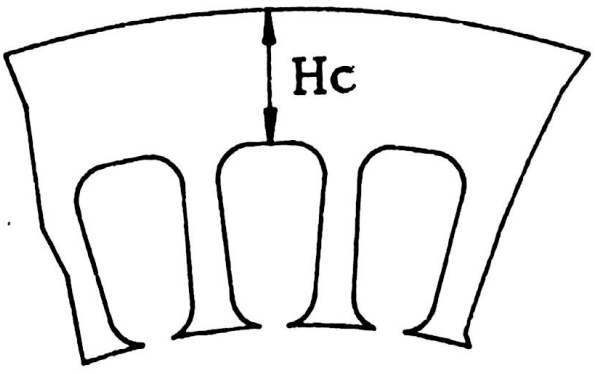
ضخامت هسته یا ارتفاع هسته که فوران مغناطیسی از طریق آن مدار مغناطیسی را کامل می‌کند به قطر هسته استاتور، تعداد قطب‌ها، ماکزیمم اندکسیون سطح کار B_m و ماکزیمم اندکسیونی که در یوغ می‌تواند جاری شود بستگی دارد. بنابراین:

$$H_c = \frac{B_m \times D_s}{B_c \times P} \qquad (۲-۱۳)$$

اندازه ارتفاع یوغ استاتور در شکل ۱۸ نشان داده شده است. B_c ، حداکثر اندکسیون یوغ، که در جدول زیر مشاهده می‌شود. B_m اندکسیون ماکزیمم است که از منحنی شماره ۱ بدست می‌آید، و D_s قطر استاتور، و P تعداد زوج قطبها است.

تعداد قطبها	۲	۴	۶
B_c wb/m^2	۱/۴۵	۱/۴۸	۱/۵

جدول اندکسیون ماکزیمم یوغ استاتور



شکل ۱۸: نمایش ارتفاع یوغ استاتور

در رابطه (۲-۱۳) B_m و B_c بر حسب Wb/m^2 یا تسلا، و D_s و H_c برحسب میلی‌متر است.

اگر در فرمول $H_c = \frac{B_m \times D_s}{B_c \times P}$ تغییر از ۲ قطب به ۶ قطب حدود ۵٪ مترمربع باشد، پس اگر $B_c \approx ۱/۵\ Wb/m^۲$ در نظر بگیریم، می‌توان از یوغ و D_s (قطر داخلی استاتور) تعداد قطب های موتور را حدس زد. رابطه (۱۳-۲) مشخص می کند که ارتفاع یوغ استاتور برای قطب معینی طراحی می‌شود اگر تعداد قُطب‌ها افزایش یابد ارتفاع یوغ استاتور کاهش می‌یابد این نتیجه مهم حاصل می‌شود که در کاهش قطب‌های یک موتور نیاز به افزایش ارتفاع یوغ استاتور است تا هسته به اشباع نرسد و قدرت موردنظر را تأمین کند. ولی افزایش قطب‌ها برای یک موتور معین از نظر اشباع مغناطیسی مسأله‌ساز نمی‌باشد. بنابراین در موتور معینی که برای قطب معینی طراحی شده است، کاهش قطب‌ها ـ به عبارت دیگر افزایش دور ـ مجاز نمی‌باشد زیرا در این حالت هسته به شدت داغ شده، و احتمال سوختن موتور بیشتر است.

مثال: موتور ۴ قطب به طول هسته $L_s = ۴۵mm$ و به قطر داخلی استاتور $D_s = ۹۰mm$ مفروض است. اگر فرکانس شبکه $f = ۵۰Hz$ ، و اتصال موتور به صورت ستاره، و $V_L = ۳۸۰v$ باشد، مطلوبست:

۱ - توان خروجی موتور

۲ - توان دریافتی موتور

۳ - قطر سیم مورد نیاز

حل:

برای $D_r = ۹۰mm$ و $۲P = ۴$ $\quad P_۲ = K B_m^۲ D_r^۲ L_r n_r$

$$N_s = \frac{۱۲۰ \times f}{۲P} = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۴} = ۱۵۰۰\ r.p.m$$

$$N_r = N_s\ (۱ - \%S) = ۱۵۰۰\ (۱ - \frac{۶/۵}{۱۰۰}) = ۱۴۰۲\ r.p.m$$

از منحنی شماره ۱ $B_m = ۰/۸۴ \frac{Wb}{m^2}$ بدست می‌آید

از منحنی شماره ۲ $K = ۱/۷۵ \times ۱۰^{-۹}$ حاصل می‌شود

از منحنی شماره۳، $S = ۶/۵$ بدست می‌آید

توان خروجی $P_۲ = ۱/۷۵ \times ۱۰^{-۹} \times ۰/۸۴^۲ \times ۹۰^۲ \times ۴۵ \times ۱۴۰۲ = ۰/۶۳\ KW$

از منحنی شماره ۶ و ۵ برای $P_۲ = ۰/۶۳\ KW$، مقدار $\eta = ۰/۷۵$ و $\cos\varphi = ۰/۷۵$ معین می‌شود.

توان دریافتی موتور $\quad P_۱ = \frac{P_۲}{\eta} = \frac{۶۳۰}{۰/۷۵} = ۸۴۰\ W$

$$I_L = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos\phi} = \frac{۸۴۰}{\sqrt{3} \times ۳۸۰ \times ۰/۷۵} = ۱/۷ A$$

در اتصال ستاره $I_P = I_L = ۱/۷ A$

از منحنی شماره ۴ $j = ۶/۲ \frac{A}{mm^2}$ بدست می‌آید.

$$S = \frac{I_P}{j} = \frac{۱/۷}{۶/۲} = ۰/۲۷۴ mm^2$$

قطر سیم $d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{۴ \times ۰/۲۷۴}{۳/۱۴}} \approx ۰/۶۰ mm$

اثر تغییرات ولتاژ در سیم‌پیچی الکتروموتورهای جریان متناوب

اگر یک موتور برای ولتاژ معینی طراحی شده باشد بخواهیم این الکتروموتور را برای ولتاژ دیگری تغییر دهیم، آنگاه دور هر کلاف و سطح مقطع سیم در صورت داشتن خازن از روابط زیر تعیین می‌شوند.

تعداد دور اصلی هر کلاف × $\frac{\text{ولتاژ جدید}}{\text{ولتاژ اصلی}}$ = تعداد دور هر کلاف در سیم پیچی جدید

سطح مقطع اصلی × $\frac{\text{ولتاژ اصلی}}{\text{ولتاژ جدید}}$ = سطح مقطع جدید برای سیم‌ها

قطر سیم اصلی × $\sqrt{\frac{\text{ولتاژ اصلی}}{\text{ولتاژ جدید}}}$ = قطر سیم جدید

ظرفیت خازن اصلی μF × $(\frac{\text{ولتاژ اصلی}}{\text{ولتاژ جدید}})^2$ = ظرفیت خازن جدید

مثال: الکتروموتور یک‌فاز ۳۶ شیار با مشخصات زیر برای ولتاژ ۱۱۵ ولت طرح شده است. مشخصات این الکتروموتور را برای ولتاژ ۲۳۰ ولت بدست آورید.

مشخصات اصلی:

گام کلافها	۵ - ۱	و	۷ - ۱	و	۹ - ۱
دور کلافها	۲۳ دور	و	۲۵ دور	و	۲۸ دور

حل:

قطر سیم اصلی = ۱/۰۰mm

تعداد دور هرکلاف × $\frac{۲۳۰}{۱۱۵}$ = تعداد دوراصلی هرکلاف × $\frac{\text{ولتاژ جدید}}{\text{ولتاژ اصلی}}$ = تعداد دورهر کلاف

بنابراین دور هر کلاف دو برابر می‌شود و مشخصات دور جدید کلاف‌ها بقرار زیر خواهد

بود:

مشخصات اصلی:

گام کلافها ۵ - ۱ و ۷ - ۱ و ۹ - ۱

دور هر کلاف جدید ۴۶=۲×۲۳ و ۵۰=۲×۲۵ و ۵۶=۲×۲۸

$$\text{قطر سیم جدید} = \text{قطر سیم اصلی} \times \sqrt{\frac{\text{ولتاژ اصلی}}{\text{ولتاژ جدید}}} = ۱ \times \frac{۱۱۵}{۲۳۰} = ۰/۷۰\,mm$$

$$\text{ظرفیت جدید خازن} = C \times ۲(\frac{\text{ولتاژ اصلی}}{\text{ولتاژ جدید}}) ۲ \times C = (\frac{۱۱۵}{۲۳۰}) ۲ \times C = \frac{۱}{۴} C$$

تبدیل سیم‌مسی به آلومینیومی و بالعکس

بعضی از کارخانجات تولید کننده، به جای سیم مسی از سیم آلومینیومی استفاده می‌کنند که در تجدید سیم‌بندی با مسئله تبدیل سیم مسی به آلومینیومی یا برعکس مواجه می‌شویم. بنابراین لازم است چگونگی تبدیل سیم های مسی به آلومینومی یا برعکس را مورد بررسی قرار دهیم.

در تعویض سیم ها به یکدیگر نباید مقاومت اهمی سیم پیچ قبل و بعد از تعویض تغییر کند، یعنی:

مقاومت اهمی سیم‌پیچ هر فاز آلومینیومی R_{Al} = R_{Cu} مقاومت اهمی سیم‌پیچ هر فاز مسی

$$\rho_{Cu} \times \frac{L}{A_{Cu}} = \rho_{Al} \times \frac{l}{A_{Al}}$$

چون دور کلاف ها نباید تغییر کند، لذا طول کلاف در دو نوع سیم ثابت می‌ماند.

$$\frac{A_{Al}}{A_{Cu}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = \frac{\chi_{Cu}}{\chi_{Al}} \Rightarrow x_{Al} = \frac{۱}{\rho_{Al}} = ۳۵ \qquad \chi_{Cu} = \frac{۱}{\rho_{Cu}} = ۵۶$$

$$\frac{\frac{\pi D_{Al}^{۲}}{۴}}{\frac{\pi D_{Cu}^{۲}}{۴}} = \frac{۵۶}{۳۵}$$

$$d_{Cu} = \sqrt{\frac{۳۵}{۵۶}} \times d_{Al} = ۰/۷۹۳\ d_{Al}$$

$$d_{Al} = \sqrt{\frac{۵۶}{۳۵}} \times d_{Cu} = ۱/۲۶\ d_{Cu}$$

مثال: معادل سیم مسی، سیم آلومینیوم به قطر ۱/۵ میلی متر کدام است؟

$$d_{cu} = \frac{۳۵}{۵۶} \times ۱/۵ = ۱/۱۸ \approx ۱/۲۰$$

محاسبه معادل سیم های مسی برای مقاطع معین

در تجدید سیم بندی الکتروموتورها ممکن است سیم مورد نیاز الکتروموتورها در دسترس نباشد، یا در الکتروموتورهای پر قدرت که به سیم های مقطع بزرگ نیاز است، فرم دادن کلاف ها مشکل می‌باشد.

برای رفع این مشکل روابط زیر را در محاسبات بکار می‌بریم.

سطح مورد نیاز $= S_1 + S_2 + S_3 + ... S_n$

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi d_2^2}{4} + ... \frac{\pi d_n^2}{4}$$

قطر سیم مورد نیاز $$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + ... d_n^2} \qquad (۲-۱۴)$$

اگر $d_1 = d_2 = d_3 = ... = d_n$ باشد، یعنی از یک سیم با مقطع معین، بخواهیم معادل سیم مورد نیاز را به‌دست آوریم می‌توانیم رابطه (۲-۱۴) را به قرار زیر ساده کنیم.

$$d = \sqrt{n d_1^2} \quad \Rightarrow \quad d_1 = \frac{d}{\sqrt{n}}$$

d_1 قطر سیم جایگزین و d قطر سیم اصلی است و n تعداد رشته های سیم جایگزین شونده می‌باشد.

مثال: چند رشته سیم ۰/۵۰ میلی‌متری می‌تواند معادل سیم ۰/۷۰ میلی‌متری باشد.

حل: رشته

$$d_1 = \frac{d}{\sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{d^2}{d_1^2} = \frac{(۰/۷۰)^2}{(۰/۵۰)^2} = ۲$$

مثال: چه سیم مسی اگر با سیم ۰/۷۰ میلی متر مسی موازی شود معادل سیم مسی ۰/۸۰ میلی متری خواهد شد.

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} = d^2 = d_1^2 + d_2^2$$

حل:

$$(۰/۸۰)^2 = (۰/۷۰)^2 + d_2^2$$

$$d_2^2 = ۰/۱۵ \Rightarrow d = ۰/۳۰ \text{ m.m}$$