مسئله طراحی

یک موتور القایی سه فاز 50Hz قفس سنجابی با سرعت سنکرون 1500 r.p.m ، 2.2 KW و 400V را طراحی کنید. ماشین به روش ستاره ـ مثلث راه اندازی می شود. بازده موتور در بار کامل 0.8 و ضریب توان 0.825 می باشد. عایق درجه A که از لحاظ درجه حرارت حداکثر مجاز آن 150°C است در این ماشین بکار رفته است.

حل ـ

ابعاد اصلی

سرعت سنکرون $n_s = \frac{1500}{60} = 25 \text{ rps}$

تعداد قطب‌ها $p = \frac{2f}{n_s} = \frac{2 \times 50}{25} = 4$

ماشین در بازار با ستی با رقابت عرضه شده و لذا قیمت آن مورد توجه خاص بوده و در این راستا مشخصه‌های عملکرد آن مانند بازده و ضریب توان از اهمیت فراوانی برخوردارند. در این گونه ماشین‌ها B_{av} و a_c باید بزرگ انتخاب شوند.

چگالی شار متوسط $B_{av} = 0.44 \text{ wb/m}^2$

آمپرهادی بر متر $a_c = 21000$

ضریب سیم پیچی $K_w = 0.955$

توان ورودی $Q = \frac{2.2}{0.8 \times 0.825} = 3.33 \text{ KVA}$

ثابت توان خروجی $C_o = 11 K_w B_{av} a_c \times 10^{-3} = 11 \times 0.955 \times 0.44 \times 21000 \times 10^{-3} = 97$

$$D^2 L = \frac{Q}{C_o n_s} = \frac{3.33}{97 \times 25} = 0.001375 \text{ m}^3 = 1375 \text{ cm}^2$$

برای طرح اقتصادی L/τ باید بین 1.5 تا 2 باشد.

با در نظر گرفتن $\frac{L}{\tau} = 1.5$

$$\frac{L}{\pi D/4} = 1.5 \quad \text{یا} \quad \frac{L}{D} = 1.18$$

$$D^2 \times 1.8 D = 1375 \Rightarrow D = 10.5 \text{ cm} \quad , \quad L = \frac{1375}{(10.5)^2} = 12.5 \text{ cm}$$

گام قطب $\tau = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi \times 10.5}{4} = 8.25 \text{ cm}$

طول هسته 12.5cm بوده و لذا به مجرای تهویه شعاعی نیازی نیست.

طول خالص آهن $L_i = 0.9 \times 12.5 = 11.25 \text{ cm}$ طول ناخالص آهن $L_s = 1.25 \text{ cm}$

ورقهای Lohys بضخامت 0.5mm برای این ماشین بکار برده میشود.

طرح استاتور

سیم پیچی - ماشین باید برای اتصال مثلث طرح شود چون راه اندازستاره مثلث دارد.

ولتاژ هر فاز استاتور $E_s = 400V$

شار قطب $\Phi_m = B_{av} \tau L = 0.44 \times 0.0825 \times 0.125 = 4.54 \times 10^{-3}$ wb

تعداد دور هر فاز استاتور $T_s = \frac{E_s}{4.44 f \Phi_m K_{ws}} = \frac{400}{4.44 \times 50 \times 4.54 \times 10^{-3} \times 0.955} = 416$

گام شیار باید بین 7.5 تا 2.5 سانتی متر باشد ولی میتوانند برای شیارهای نیمه بسته کمتر از 1.5 cm باشد.

شیار در قطب در فاز $q_s = 2$

شیارهای کل استاتور $S_s = 3 \times 4 \times 2 = 24$

گام شیار استاتور $\gamma_{ss} = \frac{\pi \times 105}{24} = 3.75$ cm

تعداد کل هادیهای استاتور $= 6T_s = 6 \times 416 = 2496$

تعداد هادی در شیار استاتور $Z_{ss} = \frac{2496}{24} = 104$

سیم پیچی زنجیری در شیارهای نیمه بسته دو زنقه ای استاتور بکار میرود. سیم پیچی زنجیری سیم پیچی یک طبقه ای است که تعداد کل پیچکهای استاتور مساوی تعداد شیارهای استاتور است، یعنی ۲۴.

گام پیچ $C_s = \frac{\text{شیارها}}{\text{قطب}} \times \frac{24}{4} = 6$

ولی گام پیچ در سیم پیچی زنجیری نباید زوج باشد، لذا گام پیچ 5 شیار است. لذا پیچکها باندازه یک گام شیار کوتاه شده اند.

زاویه کوتاهی گام $\alpha = \frac{1}{6} \times 180 = 30°$

ضریب گام $K_p = \cos \alpha/2 = 0.9659$

ضریب توزیع $K_d = \frac{\sin \pi/2}{9 \sin \pi/29} = \frac{\sin 30°}{2 \sin 15°} = 0.966$

$K_w = K_d \cdot K_p = 0.966 \times 0.9659 = 0.934$

مشخصات هادی

جریان هر فاز استوانه $I_s = \frac{2.2 \times 10^3}{3 \times 400 \times 0.8 \times 0.925} = 2.77$ A

جریان خطا استوانه $= \sqrt{3} \times 2.77 = 4.8$ A

با انتخاب چگالی جریان $4\ A/mm^2$

سطح مقطع هادی لازم $= \frac{2.77}{4} = 0.6925\ mm^2$

قطر هادی لخت لازم $= 0.94\ mm^2$

از جدول استاندارد نزدیکترین هادی استاندارد دارای قطر: 0.95 mm $= d$ لخت.

سطح مقطع هادی مورد استفاده استاندارد $a_s = \frac{\pi}{4}(0.95)^2 = 0.709\ mm^2$

چگالی جریان برای هادی استوانه $\delta_s = \frac{2.77}{0.709} = 3.91\ A/mm^2$

از جدول قطر هادی لخت با عایق $d_1 = 1.041$ mm

ابعاد شیار

فضای لازم برای هادی لخت در شیار $= Z_{s1} \cdot a_s = 104 \times 0.709 = 73.6\ mm^2$

ضریب فضا برای شیارها 0.4 ملت

سطح در شیار $= \frac{73.6}{0.4} = 184\ mm^2$

قبل از انتخاب ابعاد شیار با سطح فوق باید عرض حداقل دندانه را که چگالی شار در حدود دندانه مجاز باشد بدست آورد چگالی شار حداکثر مجاز $1.7\ Wb/m^2$ است.

عرض حداقل دندانه استاتور

$$(W_t)_{min} = \frac{\Phi_m}{1.7 \times \frac{S_s}{\rho} \cdot L_i} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{1.7 \times \frac{24}{4} \times 0.1125} = 0.00395\ m = 3.95\ mm$$

یک دندانه با عرض ثابت 6 mm در نظر گرفته می‌شود. ابعاد شیار شبیه زیر است:

طبق شکل 10 را دهانه شیار را 1 mm و گلو را 3 mm می‌گیریم.

عرض شیار در $AB = \frac{\pi(105 + 2\times4 + 2h)}{24} - 6 = 8.8$ mm

فرض کنید h ارتفاع شیار بر حسب mm باشد

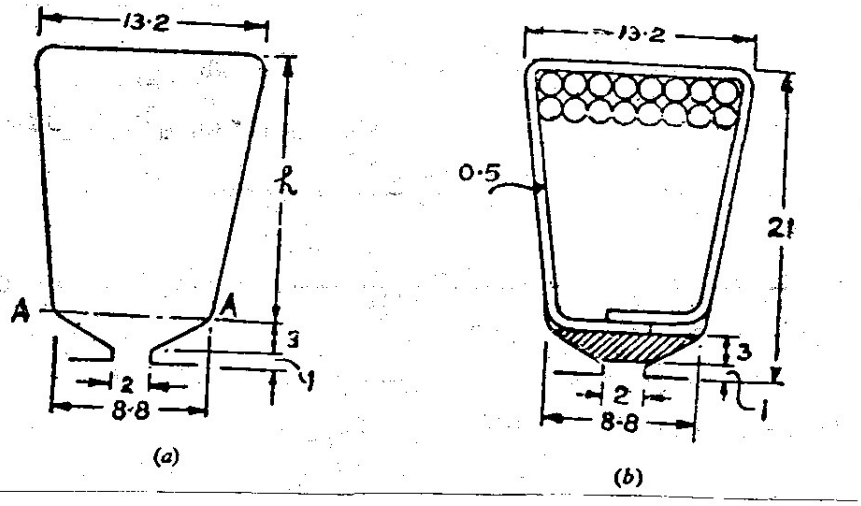
عرض شیار در تاج $= \frac{\pi(105 + 2\times4 + 2h)}{24} - 6 = 8.8 \frac{\pi h}{12}$ mm

سطح قسمت‌های مختلف شیار $= \frac{1}{2} h \left(8.8 + \frac{\pi h}{12} + 8.8\right) = 184\ mm^2 \Rightarrow h = 17$ mm

عرض شیار در تاج کل $= 8.8 + \frac{\pi \times 17}{12} = 13.2$ mm

ضخامت شیار با مانده گوه فلزی (عمق شیار) $d_{ss} = 17 + 4 = 21$ mm

وضعیت هادی ها و عایق در شکل b نشان داده شده است



طول حلقه متوسط $L_{mts} = 2L + 2.3\pi + 24 = 2 \times 12.5 + 2.3 \times 8.25 + 24 = 68$ cm

عرض دندانه استاتور $W_{ts} = 6mm = 0.006$ m

دندانه استاتور

چگالی شار در دندانه استاتور $= \frac{\Phi_m}{\frac{S_s}{p} . W_{ts} . L_i} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{\frac{24}{4} \times 0.006 \times 0.1825} = 1.12$ wb/m²

این مقدار خوب است چون انتظار داشتیم دندانه در چگالی شار کم کار کند.

ارتفاع دندانه استاتور = ضخامت شیار $= 21$ mm

یوغ استاتور

شار در یوغ استاتور $= \frac{4.54}{2} \times 10^{-3} = 2.27 \times 10^{-3}$ wb

چگالی شار را 1.2 wb/m² فرض می کنیم

سطح یوغ استاتور $A_{cs} = \frac{2.27 \times 10^{-3}}{1.2} = 1.89 \times 10^{-3}$ m²

ضخامت یوغ استاتور $d_{cs} = \frac{1.89 \times 10^{-3}}{0.1125} = 0.0168$ m $= 1.68$ cm

$d_{cs} = 1.7$ cm

چگالی شار در یوغ استاتور $B_{cs} = \frac{1.68}{1.7} \times 1.2 = 1.185$ wb/m²

قطر خارجی استاتور $D_o = D + 2 d_{ss} + 2 d_{cs} = 10.5 + 2(2.1 + 1.7) = 18.2$ cm

طرح روتور - فاصله هوائی $l_g = 0.2 + 2\sqrt{DL} = 0.2 + 2\sqrt{0.105 \times 0.125} = 0.43$ mm

این فاصله هوائی چون ماشین مقاطیس کننده بزرگی ایجاد خواهد کرد و باید کوچک انتخاب شود. با توجه به جدول فاصله هوائی 0.3 mm مناسب است. $l_g = 0.3$ mm

قطر روتور $D_r = D - 2l_g = 10.5 - 2 \times 0.03 = 10.44$ cm

شیارهای روتور تعداد شیارهای روتور را $S_r = 22$ در نظر میگیریم. نتیجه ترکیب $S_s = 24$ و $S_r = 22$ ایجاد سروصدا است که در ماشین های کوچک خیلی اثری ندارد.

گام شیار روتور در فاصله هوائی $\gamma_{sr} = \frac{\pi D_r}{S_r} = \frac{\pi \times 10.44}{22} = 1.49$ cm

میله های روتور

$$I_b = \frac{2m_s K_{ws} T_s}{S_r} \cdot I_s \cos\varphi = \frac{2 \times 3 \times 0.934 \times 416}{22} \times 2.77 \times 0.825 = 244 \text{ A}$$

برای بدست آوردن گشتاور راه اندازی خوب باید چگالی جریان بزرگی در میله های روتور بکار برم چگالی جریان روتور را $\delta_b = 6 \text{ A/mm}^2$ در نظر میگیریم.

سطح مقطع میله روتور $a_b = \frac{244}{6} = 40.7 \text{ mm}^2$

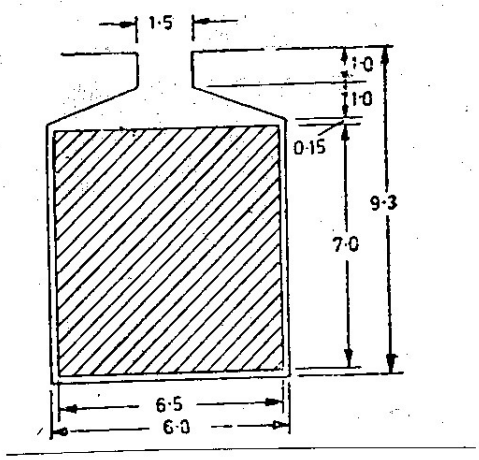
هادی مورد استفاده از جدول 7 mm ضخامت و 6.5 mm عرض دارد.

سطح میله مورد استفاده $a_b = 44.6 \text{ mm}^2$

شیار مورد استفاده در شکل زیر داده شده است

عرض شیار روتور $W_{sr} = 6.8$ mm

ضخامت شیار روتور $d_{sr} = 9.3$ mm



قبل از انتخاب زبانی ابعاد شیارهای روتور چگالی شار در دندانه روتور در ریشه دندانه را باید امتحان کرد.

گام شیار در ته شیار روتور $= \frac{\pi(10.44 - 2\times 0.93)}{22} = 1.2\ cm$

عرض دندانه در ریشه $W_t = 1.22 - 0.68 = 0.54\ cm$

چگالی شار در ریشه دندانه روتور $= \frac{\Phi_m}{\frac{S_r}{P} \cdot L_i \cdot W_t} = \frac{2.54\times 10^{-3}}{\frac{22}{4}\times 0.1125\times 0.0054} = 1.36\ wb/m^2$

این چگالی شار در حدود مجاز قرار دارد

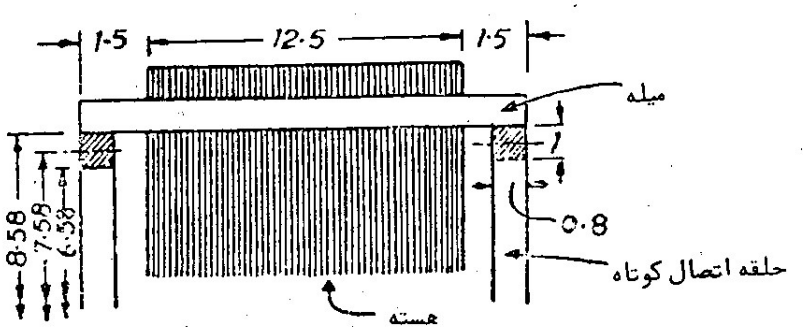
میله‌ها با اندازه یک گام شیار ساخته می‌شوند. میله‌ها در هر طرف هسته اتصال کوتاه $1.5\ cm$ گسترش یافته و میله‌ها با تقریب مقدار اضافی جهت تغییرات احتمالی طول در نظر گرفته می‌شوند.

طول هر میله $L_b = 12.5 + 2 + 1.5 + 1 = 16.5\ cm$

مقاومت هر میله $r_b = \frac{0.021\times 0.165}{44.6} = 0.776\times 10^{-4}\ \Omega$

تلفات مس در هر میله $= I_b^2 r_b = 244^2 \times 0.76\times 10^{-4} = 4.62\ W$

تلفات کل مس در میله‌ها $= S_r I_b^2 r_b = 22\times 4.62 = 101\ W$



حلقه‌های اتصال کوتاه

جریان حلقه اتصال کوتاه $I_b = \frac{S_r I_b}{\pi P} = \frac{22\times 244}{\pi\times 4} = 428\ A$

چگالی جریان را در حلقه اتصال کوتاه $\delta_e = 6\ A/mm^2$ در نظر می‌گیریم

سطح حلقه اتصال کوتاه $a_e = \frac{428}{6} = 71.3\ mm^2$

با استفاده از حلقه اتصال کوتاه به مقطع $10\times 8\ mm$:

عرض حلقه اتصال کوتاه $d_e = 10\ mm$

ضخامت حلقه اتصال کوتاه $t_e = 8\ mm$

سطح حلقه اتصال کوتاه $a_e = 80\ mm^2$

قطر خارجی حلقه اتصال کوتاه = قطر روتور در تهٔ شیارهای روتور $= 10.44 - 2 \times 0.93 = 8.58\ cm$

قطر داخلی حلقه اتصال کوتاه $= 8.58 - 2de = 6.58\ cm$

قطر متوسط حلقه اتصال کوتاه $De = 7.58\ cm$

مقاومت هر حلقه $re = \frac{\rho \pi De}{ae} = \frac{0.021 \times \pi \times 0.0758}{80} = 0.625 \times 10^{-4}\ \Omega$

تلفات مس در دو حلقه اتصال کوتاه $= 2 Ie^2 re = 2 \times 428^2 \times 0.625 \times 10^{-4} = 23\ W$

تلفات کل مس $= 101 + 23 = 124\ W$

لغزش با بار کامل $\frac{\text{تلفات مس روتور}}{\text{توان ورودی روتور}} = \frac{S}{1-S} \Rightarrow S = 5.3\%$

که برای ماشین 2.2 kW مناسب است.

هسته روتور مقدار ضخامت هسته روتور مساوی ضخامت هسته استاتور درنظر گرفته میشود.

ضخامت هسته روتور $dcr = 1.7\ cm$

چگالی شار در هسته روتور $Bcr = 1.185\ wb/m^2$

قطر داخل ورق روتور $Di = Dr - 2dsr - 2dcr = 10.44 - 2 \times 0.93 \times 1.7 = 5.18\ cm$

جریان بی باری

جریان مغناطیس کننده

نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای اجزاء مختلف مدار مغناطیسی در زیر محاسبه میشود:

۱- فاصله هوائی

$\frac{\text{دهانه شیار}}{\text{طول فاصله هوائی}} = \frac{2}{0.3} = 6.66$

از شکل مربوط به ضریب کارتر متناظر با 6.66 برای شیارهای نیمه باز $Kcs = 0.68$ خواهد بود. از معادله مربوط به ضریب تجمع فاصله هوائی برای شیارهای استاتور

$$Kgsr = \frac{\gamma sr}{\gamma sr - Kcs \omega o} = \frac{1.375}{1.375 - 0.68 \times 0.2} = 1.11$$

برای شیارهای روتور $\frac{\text{دهانه شیار}}{\text{طول فاصله هوائی}} = \frac{1.5}{0.3} = 5 \Rightarrow Kcs = 0.6$

ضریب تجمع فاصله هوائی برای شیارهای روتور $Kgsr = \frac{\gamma sr}{\gamma sr - Kcs.\omega o} = \frac{1.49}{1.49 + 0.6 \times 0.15} = 1.064$

ضریب کجم برای شیارها: $K_{gs} = K_{gss} \cdot K_{gsr} = 1.11 \times 1.064 = 1.18$

چون تعدیه نداریم $K_{gd} = 1$

ضریب کجم فاصله هوا $K_g = K_{gs} \cdot K_{gd} = 1.18 \times 1 = 1.18$

سطح فاصله هوا $A_g = \frac{\pi D}{p} L = \frac{\pi \times 0.105}{4} \times 0.125 = 0.0103\ m^2$

$B_{g60} = 1.36\ B_{av} = 1.36 \times 0.44 = 0.6\ wb/m^2$

طول مؤثر فاصله هوا $l_{ge} = 1.18 \times 0.3 = 0.354\ mm$

نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای فاصله هوا $AT_g = 800000\ B_{g60}\ K_g\ l_g = 800000 \times 0.6 \times 1.18 \times \frac{0.3}{1000}$

$= 170\ A$

۲ـ دندانه استاتور

دندانه استاتور دارای لقلاق موازی لبواره و موضوعی است. $W_{ts} = 6\ mm$ می‌باشد.

سطح دندانه مقطع $= \frac{S_s}{p} \cdot W_{ts} \cdot L_i = \frac{24}{4} \times \frac{6}{1000} \times 0.1125 = 4.05 \times 10^{-3}\ m^2$

چگالی شار در دندانه استاتور

$B_{ts} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{4.05 \times 10^{-3}} = 1.12\ wb/m^2$

$B_{ts60} = 1.36 \times 1.12 = 1.52\ wb/m^2$

مناظر با این نیروی محرکه مغناطیسی برحسب از منحنی مربوط برای فولاد $at_{ts} = 1200\ A/m \times h_{ts}$ بدست می‌آید.

ارتفاع دندانه استاتور $= 21\ mm$

نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای دندانه استاتور $= 1200 \times \frac{21}{1000} = 25\ A$

۳ـ هسته استاتور

سطح هسته استاتور $A_{cs} = L_i d_{cs} = 0.1125 \times 0.017 = 1.915 \times 10^{-3}\ m^2$

چگالی شار در هسته استاتور $= \frac{4.54 \times 10^{-3}}{2 \times 1.915 \times 10^{-3}} = 1.185\ wb/m^2$

طول میانگین مغناطیسی در هسته استاتور

$L_{cs} = \frac{\pi (D + 2 d_{ss} + d_{cs})}{3p}\ cm = \frac{(10.5 + 2.1 + 1.7)}{3 \times 4} = 0.43\ m$

مناظر با چگالی شار $1.85\ wb/m^2$ نیروی محرکه مغناطیسی برحسب $at_{cs} = 280\ A$ خواهد شد.

نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای هسته استاتور $AT_{cs} = 289 \times 0.43 = 12\ A$

۴- دندانه روتور - عرض دندانه روتور در $\frac{1}{3}$ ارتفاع از طرف تنگ شیار

$$= W_{tr\frac{1}{3}} \frac{\pi(D_r - \frac{4d_{sr}}{3})}{S_r} - W_{sr} = \frac{\pi(10.44 - \frac{4\times0.93}{3})}{22} - 0.68 = 0.63\,cm = 0.0063\,m$$

سطح دندانه هر قطب در $\frac{1}{3}$ ارتفاع از طرف تنگ شیار

$$A_{tr} = \frac{S_r}{p} l_i W_{tr\frac{1}{3}} = \frac{22}{4} \times 0.125 \times 0.0063 = 0.0039\ m^2$$

چگالی شار در دندانه روتور در $\frac{1}{3}$ ارتفاع

$$B_{tr\frac{1}{3}} = \frac{4.54\times10^{-3}}{3.9\times10^{-3}} = 1.16\ wb/m^2$$

$$B_{tr60} = 1.36 \times 1.16 = 1.575\ wb/m^2$$

مناظر با این چگالی شار نیروی مرکه مغناطیسی بر متر:

$$a_{tr} = 2000A$$

نیروی مرکه مغناطیسی دندانه روتور

$$AT_{tr} = 2000\frac{9.3}{1000} = 19\,A$$

۵- هسته روتور

سطح هسته روتور $A_{cr} = l_i d_{cr} = 0.1125 \times 0.017 = 1.915\times10^{-3}\ m^2$

چگالی شار در هسته روتور $= \frac{4.54\times10^{-3}}{2\times1.915\times10^{-3}} = 1.185\ wb/m^2$

مناظر با این چگالی شار نیروی مرکه مغناطیسی بر متر

$$AT_{cr} = 280A$$

طول میانگین شار در هسته روتور

$$l_{cr} = \frac{\pi(D_r - 2d_{sr} - 2d_{cr})}{3p} = \frac{\pi(10.44 - 2\times0.93 - 1.7)}{3\times4}\,cm = 0.018\,m$$

نیروی مرکه مغناطیسی هسته روتور $= a_{tcr}\, l_{cr} = 280 \times 0.018 = 5A$

مشخصه مغناطیسی در جدول زیر آمده است

نام قسمت	سطح m^2	طول m	B wb/m^2	B_{60} wb/m^2	a_t	AT
فاصله هوایی	0.0103	0.354×10^{-3}	0.44	0.6	48000	170
دندانه استاتور	0.00405	21×10^{-3}	1.12	10.52	1200	25
هسته استاتور	0.001915	43×10^{-3}	1.185	—	280	12
دندانه روتور	0.0039	9.3×10^{-3}	1.16	1.575	2000	19
هسته روتور	0.001915	1.8×10^{-3}	1.185	—	280	5
جمع						$AT_{60} = 231$

جریان مغناطیس کننده هر فاز $I_m = \frac{0.427\, P\, AT_{60}}{K_{w1}\, T_1} = \frac{0.427 \times 4 \times 1231}{0.934 \times 416} = 1\,A$

ضد لنه تلفات

تلفات آهن در دندانه استاتور

ارتفاع × طول خالص آهن × تعداد = حجم دندانه استاتور

$= 24 \times 6 \times 10^{-3} \times 11.25 \times 10^{-2} \times 2.1 \times 10^{-3} = 0.34 \times 10^{-3}\ m^3$

وزن دندانه استاتور $= 0.34 \times 10^{-3} \times 7.6 \times 10^{-3} = 2.6\ kg$

چگالی شار حداکثر در دندانه $= \frac{\pi}{2} \times 1.12 = 1.76\ wb/m^2$

با استفاده از ورقهای با ضخامت 0.5 mm

مناظر با این چگالی شار از شکل مربوط تلفات باز ای در کیلوگرم 11.5 W خواهد بود.

تلفات آهن در دندانه استاتور $= 11.5 \times 2.6 = 30\ W$

تلفات آهن در هسته استاتور

طول خالص آهن × ضخامت هسته × محیط متوسط هسته = حجم هسته استاتور

$= \pi (D + 2d_{ss} + d_{cs}) \cdot d_{cs} \cdot L_i = (10.5 + 2 \times 2.1 + 1.7) \times 10^{-2}$

$\times 1.7 \times 10^{-2} \times 11.25 \times 10^{-2} \times \pi = 0.985 \times 10^{-3}\ m^3$

وزن هسته استاتور $= 0.985 \times 10^{-3} \times 7.6 \times 10^{3} = 7.5\ kg$

چگالی شار در هسته استاتور $= 1.185\ wb/m^2$

مناظر با این چگالی شار تلفات آهن هر kg آهن 4.9 W میباشد.

تلفات آهن در هسته استاتور $= 7.5 \times 4.9 = 37\ W$

تلفات کل آهن $= 30 + 37 = 67\ W$

تلفات دلتا آهن حدود دو برابر این تلفات خواهد بود.

تلفات کل آهن $= 2 \times 67 = 134\ W$

تلفات اصطکاک و مالش هوا

از جدول مربوط تلفات اصطکاک و مالش هوا حدود ۲ درصد توان خروجی است. با استفاده از یاطاقانهای ساچمه ای و غلطک تلفات حدود ۱٫۵ درصد توان خروجی است.

تلفات اصطکاک و مالش هوا $= \frac{1.5}{100} \times 2200 = 33\ W$

تلفات کل بی‌بار : $134+33 = 167$ W

مؤلفهٔ تلفات جریان بی‌بار هرفاز $I_1 = \frac{167}{3\times 400} = 0.139$ A

جریان بی‌بار $I_0 = \sqrt{1^2 + 0.139^2} = 1$ A

درصد جریان بی‌بار نسبت به درصد جریان بار کامل عبارتست از : $\frac{1}{2.77}\times 100 = 36$

این مقدار از حدود مجاز است با توجه به جدول مربوط

ضریب توان بی‌بار $\cos\theta_0 = \frac{I_1}{I_0} = \frac{0.139}{1} = 0.139 \Rightarrow \theta_0 = 82^\circ, 4'$

جریان اتصال کوتاه

مقاومت القاتی پراکندگی ، برای شیارهای باز نشونده (دوذقه‌ای) هدایت مخصوص مغناطیسی :

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \left[\frac{2h_1}{3(w_s+w_2)} + \frac{2h_2}{w_1+w_2} + \frac{2h_3}{w_1+w_0} + \frac{h_4}{w_0} \right]$$

$$= 4\pi\times 10^{-7}\left[\frac{2\times 17}{2(13.2+8.8)} + \frac{2\times 3}{8.8\times 2} + \frac{1}{2} \right] = 19.7\times 10^{-7}$$

پراکندگی شیارروتور برای شیارهای بالفلام موازی (مستطیل)

$$\lambda_{sr} = \mu_0 \left[\frac{h_1}{3w_s} + \frac{h_2}{w_s} + \frac{2h_3}{w_s+w_0} + \frac{h_4}{w_0} \right] = 4\pi\times 10^{-7}\left[\frac{7}{3\times 6.8} + \frac{2\times 1}{6.8+1.5} + \frac{1}{1.5} \right]$$

$$= 15.7\times 10^{-7}$$

مقدار ارجاع شده بطرف استاتور

$$\lambda'_{sr} = \lambda_{sr} \cdot \frac{K_{ws}^2 S_s}{K_{wr}^2 S_r} = 15.7\times 10^{-7} \times \frac{0.934^2 \times 24}{1\times 22} = 14.95\times 10^{-7}$$

هدایت مخصوص مغناطیسی شیار

$$\lambda_s = \lambda_{ss} + \lambda'_{sr} = 19.7\times 10^{-7} + 14.95\times 10^{-7} = 34.65\times 10^{-7}$$

مقاومت القاتی پراکندگی شیار $X_s = 8\pi f T_{ph}^2 L \left[\frac{\lambda_s}{pq} \right]$

$$X_s = 8\pi\times 50\times 416^2 \times 0.125 \times \frac{34.65\times 10^{-7}}{4\times 2} = 11.8\ \Omega$$

پراکندگی کله پیچکی

$$L_0\lambda_0 = \mu_0 \frac{K_s \tau^2}{\pi \gamma_{ss}}$$

نسبت عرض شیار به گام قطب $\frac{\text{عرض شیار}}{\text{گام قطب}} = \frac{\delta}{\tau} = 0.833$ است مناظر با مقدار این نسبت مقدار K_s از شکل مربوطه برابر با 0.875

$$L_0\lambda_0 = 4\pi\times 10^{-7}\,\frac{0.875\times 0.0825^2}{\pi\times 0.01375} = 1.73\times 10^{-7}$$

مقاومت القایی راکتانسی القایی آن $X_0 = 8\pi f T_s^2 \frac{L_0 \lambda_0}{pq}$

$X_0 = 8\pi \times 50 \times 4160^2 \times \frac{1.73 \times 10^{-7}}{4 \times 2} = 4.7\,\Omega$

راکتانسی زیگزاگ: دارای مغناطیس کننده، هر فاز ۲۸ ولتاژ هر فاز ۴۰۰ ولت است.

مقاومت مغناطیس کننده $X_m = \frac{400}{1} = 400\,\Omega$

از معادله مربوط به مقاومت القایی راکتانسی زیگزاگ هر فاز:

$X_Z = \frac{5}{6} \cdot \frac{X_m}{m_s^2} \left(\frac{1}{q_s^2} + \frac{1}{q_r^2} \right)$

q_s شیار در قطب و فاز استاتور $= \frac{24}{3 \times 4} = 2$

q_r شیار در قطب و فاز روتور $= \frac{22}{3 \times 4} = 1.835$

$X_Z = \frac{5}{6} \times \frac{400}{8^2} \left[\frac{1}{2^2} + \frac{1}{1.835^2} \right] = 20.3\,\Omega$

ج: مقاومت القایی راکتانسی را در کتابهای مقدماتی صرفنظر کرد.

X_s مقاومت القایی راکتانسی کل ارجاع شده به استاتور $= 11.8 + 4.7 + 20.3 = 36.8\,\Omega$

مقاومت مقاومت استاتور

$r_s = \frac{0.021 \times 416 \times 0.68}{0.709} = 8.37\,\Omega$

تلفات مس کل استاتور $= 3 \times 2.77^2 \times 3.37 = 193\,W$

تلفات مس کل روتور $= 124\,W$

تلفات مس هر فاز روتور $= \frac{124}{3} = 41.3\,W$

r'_r مقاومت مقدار ارجاع شده به استاتور $= \frac{41.3}{2.77^2} \times \frac{1}{0.825^2} = 7.83\,\Omega$

R_s مقاومت کل ارجاع شده به استاتور $= 8.37 + 7.83 = 16.2\,\Omega$

مقاومت ظاهری ـ مقاومت ظاهری کل روتور (حال سکون)

$Z_s = \sqrt{36.8^2 + 16.2^2} = 40.2\,\Omega$

جریان اتصال کوتاه هر فاز $I_{sc} = \frac{400}{40.2} = 9.95\,A$

ضریب توان اتصال کوتاه $\cos \varphi_{sc} = \frac{16.2}{40.2} = 0.403 \Rightarrow \varphi_{sc} = 66^\circ, 12'$

تلفات دیازده

تلفات مس استاتور $= 193\,W$

تلفات مس روتور $= 124\,W$

تلفات هسته آهن $= 134\,W$

تلفات اصطکاک و هوا $= 33\,W$

تلفات کل در بار کامل $= 484\,W$

توان خروجی بار کامل $= 2200\,W$

توان ورودی در بار کامل $= 2200 + 484 = 2684\,W$

$\eta = \frac{2200}{2684} \times 100 = 81.9\,\%$

نمودار دایره‌ای ـ با توجه به شکل نمودار دایره‌ای نتایج زیر حاصل می‌شود.

ضریب قدرت در بار کامل $\cos\theta = \cos 34^\circ = 0.829$

جریان بار کامل هر فاز $I_s = OA = 2.63\ A$

$$\frac{\text{گشتاور در راه اندازی}}{\text{گشتاور در بار کامل}} = \frac{BG}{AK} = 1$$

$$\frac{\text{گشتاور حداکثر}}{\text{گشتاور در بار کامل}} = \frac{DO}{AK} = 2$$

$$\frac{\text{جریان در حداکثر گشتاور}}{\text{جریان خط در بار کامل}} = \frac{MN}{AL} = 1.67$$

افزایش درصد دمای استاتور:

تلفات مس استاتور $W_c = 193\ W$

تلفات مس گشتاور حداکثر $= \frac{2L}{L_{nls}} W_c = \frac{2\times 12.5}{88} \times 193 = 71\ W$

تلفات هسته در استاتور $= 134\ W$

تلفات کل که باید سطح هسته استاتور انتقال دهد $= 71 + 134 = 205\ W$

سطح خارجی استوانه‌ای استاتور $= \pi \times 18.1 \times 12.5\ cm^2 = 0.0712\ m^2$

ضریب خنک کردن از جدول 3-6، 0.03 انتخاب می‌شود.

تلفات انتقال برای از سطح هسته $= \frac{0.0712}{0.03} = 2.38\ W$

سطح داخل استوانه استاتور $= \pi \times 10.5 \times 12.5\ cm^2 = 0.0412\ m^2$

سرعت محیطی $V_a = \pi \times 0.105 \times 25 = 8.25\ m/s$

از جدول 3.6 ضریب خنک کردن

$$= \frac{0.04}{1 + 0.1 V_a} = \frac{0.04}{1 + 0.1 + 8.25} = 0.022$$

تلفات انتقال برای $1^\circ C$ از سطح داخل استاتور

$$= \frac{0.0411}{0.022} = 1.87\ W$$

سطح خنک کننده لوله $= 2 \times \frac{\pi}{4}(18.1^2 - 10.5^2)\ cm^2 = 0.0444\ m^2$

سرعت هوا در سطح تبخیر $= 0.1 \times 9.25 = 0.825$ m/s

ضریب خنک کردن $= \frac{0.15}{Va} = \frac{0.15}{0.825} = 0.182$

تلفات انتقال بر °C از سطح تبخیر $= \frac{0.044}{0.182} = 0.242$

کل تلفات انتقال بر °C $= 2.38 + 1.87 + 0.242 = 4.492 \approx 4.5$ W

افزایش درجه دارت $\theta m = \frac{205}{4.5} = 45.6$ °C

که در حدود مجاز می‌باشد.

روتور		
۱ـ طول فاصله هوایی	δ_r	0.3 mm
۲ـ قطر روتور	D_r	10.44 cm
۳ـ نوع لمینه بندی		ضربه‌ای
۴ـ تعداد شیارها	S_r	22
۵ـ شیار در هر قطب و فاز	q_r	1.835
۶ـ گام در شیار	Z_{sr}	1
۷ـ ضریب سیم‌بندی	K_{wr}	1
۸ـ گام شیار	N_{sr}	1.49 cm
۹ـ جریان میله روتور	E_b	244 A
۱۰ـ میله روتور: سطح مقطع		7 × 16.5 mm
مساحت	a_{cb}	44.6 mm²
طول	L_b	16.5 cm
چگالی جریان	δ_b	5.47 A/mm²
۱۱ـ مقاومت هر میله	r_b	0.76×10^{-4} Ω
۱۲ـ تلفات مس در میله‌ها	$S_r E_b^2 r_b$	101 W
۱۳ـ جریان حلقه اتصال کوتاه	E_e	428 A
۱۴ـ حلقه اتصال کوتاه: سطح مقطع		10 × 8 mm²
مساحت	a_e	80 mm²
قطر متوسط	D_e	7.58 cm
چگالی	δ_e	5.35 A/mm²
۱۵ـ مقاومت هر حلقه اتصال کوتاه	r_e	0.628×10^{-4} Ω
۱۶ـ تلفات مس در حلقه‌های اتصال کوتاه	$2E_e^2 r_e$	23 W
۱۷ـ تلفات مکانیکی		124 W
۱۸ـ مقاومت معادل اجزاء ثابت	r'_r	7.83 Ω
۱۹ـ ضریب هسته روتور	d_{cr}	1.7 cm

جریان بی‌باری		
۱ـ نیروی محرکه مغناطیس‌کننده پرقطب		231
۲ـ جریان مغناطیس‌کننده فاز	E_m	1 A
۳ـ مقاومت القائی مغناطیس‌کننده	X_m	400 Ω
۴ـ تلفات هسته		134 W
۵ـ تلفات اصطکاک و مالش هوا		33 W
۶ـ تلفات بی‌باری		167 W
۷ـ مقاومت تلفات	E_d	0.139 A
۸ـ جریان بی‌باری فاز	E_o	1 A
۹ـ جریان بی‌باری خط		1.73 A
۱۰ـ ضریب توان بی‌باری	$\cos\varphi_o$	0.139

جریان اتصال کوتاه		
۱ـ مقاومت القائی پراکندگی شیار	X_s	11.8 Ω
۲ـ مقاومت القائی پراکندگی انتهای	X_o	4.7 Ω
۳ـ مقاومت القائی پراکندگی زوزنی	X_2	20.3 Ω
۴ـ مقاومت القائی پراکندگی کل	X_s	36.8 Ω
۵ـ مقاومت کل	R_s	16.2 Ω
۶ـ مقاومت ظاهری اتصال کوتاه	Z_s	40.2 Ω
۷ـ جریان اتصال کوتاه هر فاز	E_{sc}	9.95 A
۸ـ جریان اتصال کوتاه خط		17.5 A
۹ـ ضریب توان اتصال کوتاه	$\cos\varphi_{sc}$	0.043

مشخصات طرح - موتور سه فاز قفس سنجابی، قدرت 2.2KW، ولتاژ 400V، فرکانس 50Hz
اتصال مثلث

مقادیر نامی		
۱- توان خروجی با بار کامل		2.2KW
۲- ولتاژ خطی		400 V
۳- فرکانس	f	50Hz
۴- تعداد فاز		3
۵- بازده	η	0.8
۶- ضریب توان	$\cos\varphi$	0.825
۷- تعداد قطب ها	p	4
۸- سرعت سنکرون	n_s	25 rps
۹- توان ورودی		3.33 KVA
۱۰- جریان خطی با بار کامل		4.8 A

بارگیری		
۱- بارگیری مغناطیسی مفروض	B_{av}	0.44 wb/m²
۲- بارگیری مفروض الکتریکی	a_c	21000 آمپر دور/m
۳- ضریب، توان خروجی	C_0	97
۴- D^2L		1375 cm³

ابعاد اصلی		
۱- قطر داخل استاتور	D	10.5 cm
۲- طول ناخالص هسته	L	12.5 cm
۳- مجاری	n_d	ندارد
۴- طول ناخالص آهن	L_s	12.5 cm
۵- طول خالص آهن	L_i	11.25 cm
۶- گام قطب	τ	8.25 cm

استاتور		
۱- نوع ورق	ورق	0.5mm ضخامت Lohys
۲- نوع سیم پیچی		زنجیری یک طبقه
۳- نوع اتصال		مثلث
۴- ولتاژ فازی	E_s	400 V
۵- شار قطب	Φ_m	4.54 mwb
۶- تعداد دور در فاز	T_s	416
۷- تعداد شیارها	S_s	24
۸- شیار در قطب		6
۹- شیار در قطب و فاز	q_s	2
۱۰- گام پیچه	C_s	۵ شیار
۱۱- ضریب توزیع	K_d	0.966
۱۲- ضریب گام	K_p	0.9659
۱۳- ضریب سیم پیچی	K_{ws}	0.934
۱۴- گام شیار	D_{ss}	1.375 cm
۱۵- تعداد هادی در شیار	Z_{ss}	104
۱۶- هادی: قطر مدار		0.95 mm
قطر عایقدار		1.041 mm
سطح مقطع		0.709 mm²
۱۷- چگالی جریان	δ_s	3.91 A/mm²
۱۸- طول متوسط حلقه	L_{mtc}	68 cm
۱۹- مقاومت هر فاز در 75°c	r_s	8.37 Ω
۲۰- تلفات مس در بار کامل	$3I_s^2r_s$	193 W
۲۱- ضخامت هسته استاتور	d_{cs}	1.7 cm
۲۲- قطر خارجی استاتور	D_c	18.1 cm

عملکرد ماشین		
۱- در بار کامل		
تلفات	۴۸۷ W	
توان خروجی	۲۲۰۰ W	
توان ورودی	۲۶۸۷ W	
بازده	۰.۸۱۳	
لغزش	۵.۳ %	
۲- حداکثر توان خروجی		
توان خروجی ناحیه	۱.۶۷	
۳- گشتاور حداکثر		
گشتاور ناحیه	۲	
۴- گشتاور راه‌اندازی		
گشتاور ناحیه	۱	
۵- افزایش دمای سیم‌پیچ	θ_m	۴۵.۶°C