

درس طراحی ماشین‌های الکتریکی

مرجع اصلی درس:

کتاب طراحی ماشین‌های الکتریکی آ. ک. ساوینی

A Course in Electrical Machine Design, by A. K. Sawhney

سرفصل درس:

۱- اصول طراحی ماشین‌های الکتریکی

Principle of Electrical Machine Design

۲- موادهای بکاررفته در مهندسی برق

Electrical Engineering Materials

۳- گرم‌شدن و خنک‌کردن ماشین‌های الکتریکی (مدلسازی حرارتی)

Heating and Cooling of Electrical Machines (Thermal Modeling)

۴- مدارهای مغناطیسی و محاسبات شار پراکندگی

Magnetic Circuits

۵- اصول کلی طراحی ماشین‌های گردان

General Concepts and Constraints of Design of Rotating Machines

۶- طراحی موتور القایی سه‌فاز

Design of Three-Phase Induction (Asynchronous) Motor

نحوه ارزیابی:

- ✓ امتحان میان ترم: ۷ نمره
- ✓ امتحان پایان ترم: ۱۱ نمره
- ✓ پروژه تحلیل استاتیکی موتور سوئیچ رلوکتانس با نرم افزار انسیس: ۲ نمره و مهلت تحویل تا هفته آخر کلاس ها
- ✓ حضور غیاب : ۲ نمره اضافه بر بیست
- ✓ پروژه تحلیل دینامیکی یک ماشین الکتریکی خاص با مکسول: ۲ نمره اضافه بر بیست و مهلت تحویل تا یک هفته بعد از امتحان پایان ترم

مقدمه : اصول طراحی ماشین های الکتریکی

- ✓ مهندسی به معنی کاربرد اقتصادی اصول علمی برای طرح مسائل عملی
- ✓ حذف مساله هزینه و دوام از طراحی ← طرح فاقد ارزش مهندسی
- ✓ اهمیت کمتر اثر الکترواستاتیکی (الکتریسیته ساکن) در ماشینهای معمولی به خاطر پایین بودن سطح ولتاژ
- ✓ در نظر گرفتن اثر الکترواستاتیکی در طراحی مولدهای فشارقوی و ترانسفورماتورها مخصوصاً در محاسبات عایقی

بخش های مختلف ماشین عبارت اند از:

- ۱- مدار مغناطیسی یا مسیر شار
- ۲- مدار الکتریکی یا سیم پیچی
- ۳- عایق
- ۴- مدار حرارتی
- ۵- اجزاء مکانیکی

← بررسی کمیتهای مختلف الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی در مسائل طراحی ماشین باید صورت پذیرد.

محدودیت در طراحی به خاطر عوامل زیر بوجود می آید:

- ۱- اشباع: افزایش جریان تحریک و افت بیشتر نیروی محرکه مغناطیسی در آهن
- ۲- افزایش درجه حرارت: آسیب رساندن به عایق ماشین و کاهش عمر ماشین
- ۳- عایق بندی: شکست عایق به خاطر شدت میدان الکتریکی زیاد رخ می دهد و عایق در برابر خطرات مکانیکی و حرارتی باید محافظت شود.
- ۴- بازده: استفاده از مواد بیشتر برای طراحی یک ماشین پربازده که منجر به افزایش هزینه ساخت می شود.
- ۵- طرح مکانیکی: اجزاء ماشین با تنش های مکانیکی مواجه می شوند، بخصوص در ماشین های سرعت زیاد.
- ۶- کموتاسیون: تغییر توان خروجی به خاطر کموتاسیون در ماشینهای کموتاتوری

اصول طراحی

- ✓ طراحی ماشین به تجربیات به دست آمده در این زمینه به خصوص برای طراحی عایق بندی، تهویه و اجزاء مکانیکی وابستگی دارد.
- ✓ برای رسیدن به یک طرح رضایت بخش مقادیر استفاده شده تغییر می یابد (تکرار مراحل طراحی)
- ✓ امکان طراحی مدارهای الکتریکی و مغناطیسی براساس قوانین علمی وجود دارد.

قانون القای فارادی

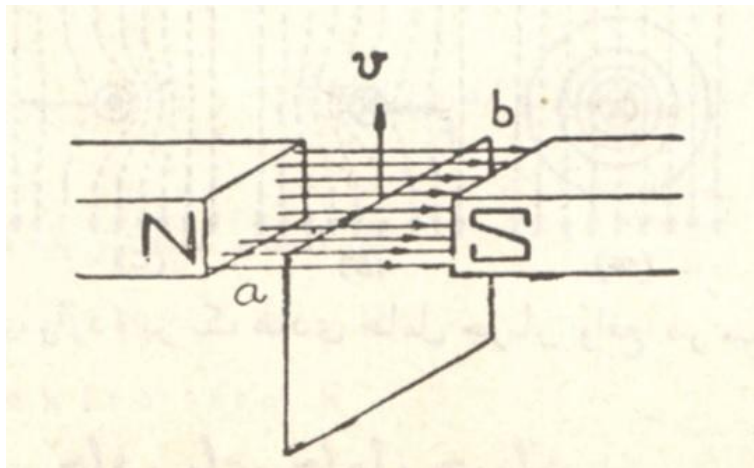
$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

القاه ولتاژ درون یک حلقه با عبور شار متغیر با زمان :

شار متغیر با تغییر زمانی شار یک پیچک ساکن یا حرکت یک پیچک ساکن درون شار ثابت یا هر دو تحقق می یابد.

✓ علامت منفی به خاطر قانون لنز است.

القای نیروی محرکه الکتریکی در یک هادی متحرک درون میدان مغناطیسی مطابق شکل زیر:



ولتاژ از نوع حرکتی

ولتاژ القایی در هادی متحرک درون میدان مغناطیسی از رابطه زیر بدست می آید:

$$e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$$

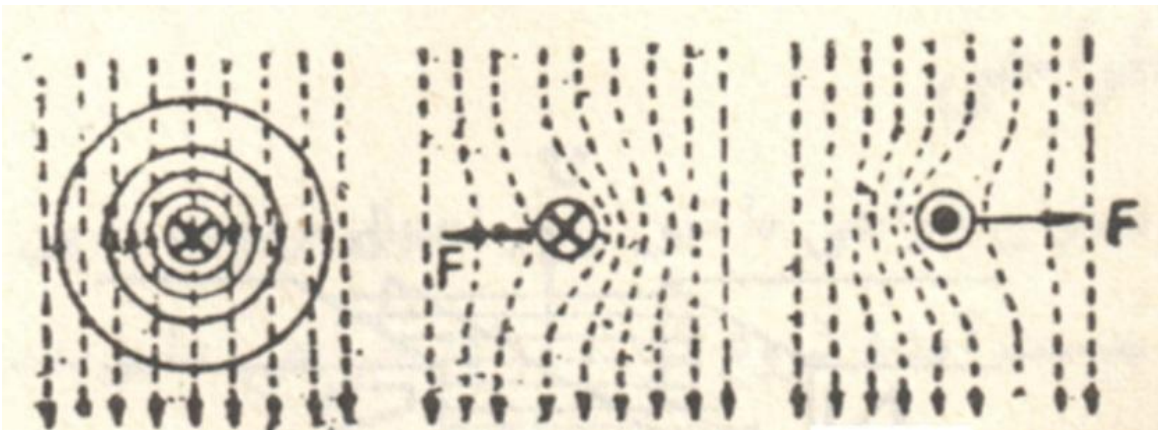
که در آن v بردار سرعت، B بردار چگالی شار و l بردار طول است.

قانون بیوساوار

نیروی وارد بر یک هادی حامل جریان درون میدان مغناطیسی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B})$$

که در آن i دامنه جریان است. نیروی اعمالی به هادی در شکل زیر نشان داده شده است.



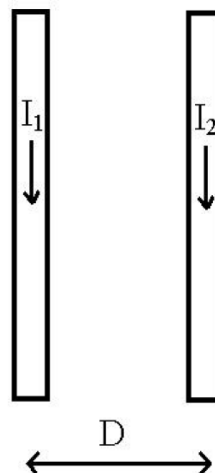
نیروی بین هادی های حامل جریان از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi D}$$

$$F = Bil = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi D} I_2 \times l = \frac{\mu_0 l}{2\pi D} I_1 I_2$$

نیرو از نوع جاذبه در صورت هم جهت بودن جریانها

و از نوع دافعه برای جریانهای در خلاف جهت یکدیگر



مثال: یک هادی به طول 50 cm حامل جریان 100 A می باشد و عمود بر میدان مغناطیسی به چگالی شار 0.8 T قرار گرفته است. مطلوب است محاسبه:

۱- نیروی مکانیکی اعمال شده

۲- قدرت لازم برای چرخش هادی با سرعت 40 m/s

۳- نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در هادی

۴- قدرت الکتریکی تولیدی

$$F = Bil = 0.8 \times 100 \times 0.5 = 40 \text{ N} \quad \text{نیروی مکانیکی:}$$

$$P = Fv = 40 \times 40 = 1600 \text{ W} \quad \text{قدرت مکانیکی:}$$

$$e = Blv = 0.8 \times 0.5 \times 40 = 16 \text{ V} \quad \text{ولتاژ تولیدی:}$$

$$P_e = e \times i = 16 \times 100 = 1600 \text{ W} \quad \text{قدرت الکتریکی:}$$

فصل اول : مهندسی مواد

۱-۱- ویژگی های مواد هادی

- ✓ مواد با هدایت بالا که برای ساختن انواع سیم پیچی ها و شبکه های انتقال انرژی استفاده می شود.
- ✓ مواد با مقاومت زیاد که برای وسایل پرمقاومت و گرم کننده به کار می رود.

۱-۲- ویژگی های مواد با هدایت بالا عبارت اند از:

- ✓ حداکثر رسانایی (حداقل مقاومت)
- ✓ حداقل ضریب ازدیاد مقاومت حرارتی
- ✓ مقاومت مکانیکی مناسب (مقاومت کششی و قابلیت انعطاف)
- ✓ قابلیت نورد شدن برای ساخت سیم های کم مقطع
- ✓ قابلیت جوشکاری و لحیم کاری
- ✓ مقاومت در برابر فساد و زوال

مشخصات مزبور با هدف طرح تغییر می کنند. برای مثال، در ساخت سیم پیچ ماشین الکتریکی به مقاومت مکانیکی بالا و قابلیت انعطاف خوب با حداقل مقاومت الکتریکی نیاز است و مقاومت کششی اهمیت کمتری دارد.

۱-۲-۱- مس

پراستفاده ترین هادی الکتریکی است.

مشخصات مس عبارت اند از:

- ✓ هدایت الکتریکی بالا
- ✓ مشخصات مکانیکی عالی
- ✓ مصون از اکسیداسیون و فساد با شرط بازنگری و نگهداری
- ✓ قابلیت نورد و کشش به خاطر خاصیت چکش خواری و نرم بودن آن
- ✓ قابلیت لحیم کاری به سادگی

۱-۲-۲- آلومینیم

به دلایل اقتصاد مهندسی مورد استعمال زیاد قرار میگیرد.

	Unit	Aluminum (Al)	Copper (cu)
Density	gr/cm ³	2.7	8.9
Melting point	°C	657	1083
Thermal conductivity	W/m ² °C	200	350
Resistivity	Ω.m	2.8×10 ⁻⁸	1.7×10 ⁻⁸
Resistance temperature coefficient at 20°C	1/°C	0.0043	0.0039

چون آلومینیوم نرم تر از مس است ← امکان نورد به صورت ورق های نازک وجود دارد ولی امکان ساخت سیم های نازک به دلیل استقامت مکانیکی کم نیست.

امکان جایگزینی آلومینیم بجای مس با یکسان سازی مقاومت الکتریکی آنها وجود دارد:

- مقاومت مخصوص آلومینیم ۱/۶ برابر مس است ← افزایش سطح مقطع آلومینیم به میزان ۶۰%
- جرم مخصوص مس ۳/۲ برابر آلومینیم ← وزن آلومینیم ۴۸% مس

- ✓ مساله محدودیت فضای سیم پیچی برای هادی آلومینیمی به عنوان یک اشکال است.
- ✓ پذیرش آلومینیم ← کاهش هزینه در ترانسفورماتور های کوچک ولی افزایش ابعاد و هزینه در ترانسهای بزرگ به همراه خواهد داشت.
- ✓ ظروف ترانس را به خاطر سبکی از آلومینیم می سازند.
- ✓ استفاده زیاد آلومینیم در ساخت رتور قفس سنجابی است.
- ✓ در شرایط عادی آلومینیم سریع اکسید می شود و لایه AL₂O₃ روی آن تشکیل می شود. به خاطر لایه مزبور از اکسید شدن بیشتر آلومینیوم جلوگیری می شود.
- ✓ به خاطر غیرعملی بودن استفاده از روش های معمولی لحیم کاری به دلیل نقطه ذوب بالای لایه AL₂O₃ (در حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد)، از لحیم های آهنی ماوراء یونی برای آلومینیم استفاده می شود.

۱-۲-۳- آهن و فولاد

- ✓ کاربرد آلیاژهای فولاد با کرم و آلومینیم در ساخت رئوستای راه انداز است، جایی که سبکی، استقامت مکانیکی و انتقال حرارت دارای اهمیت باشد.
- ✓ از آهن ریخته ای در سیم های مقاومت راه انداز موتورهای بزرگ استفاده می شود.

۱-۲-۴- آلیاژهای مس

۱- برنز (مفرغ) : ترکیب مس با قلع، کادیم یا برلیم

مقاومت مکانیکی بالا ولی مقاومت مخصوص زیاد دارد.

مس با برلیم:

افزودن ۱-۲/۵% برلیم به مس ← آلیاژ محکم برای نورد

کاربرد: فنرهای حامل جریان، کنتاکتهای لغزان و تیغه های کلیدهای چاقویی

مس با کادیم:

افزودن ۱/۱% کادیم به مس ← امکان ساخت سیم های سخت تر، محکمتر دارای مقاومت کششی بیشتر

۲- برنج : شامل ۶۶% مس و ۳۴% روی

- ✓ مقاومت مکانیکی و سائیدگی بزرگتر نسبت به مس
- ✓ هدایت کمتر
- ✓ قابلیت کشش، جوشکاری و لحیم کاری بهتر

۱-۳- مواد با مقاومت مخصوص بالا

- ✓ کاربرد این مواد در تبدیل انرژی الکتریکی به حرارتی است.
- ✓ آلیاژ مواد مختلف : نیکل ، نقره و آهن

۱- در دستگاههای اندازه‌گیری ظریف و دقیق و مقاومت های استاندارد و جعبه مقاومت به کار می‌رود.

مشخصه های اصلی این مواد عبارت اند از :

- ✓ داشتن حداقل ضریب تغییر مقاومت در اثر درجه حرارت
- ✓ پایین بودن ضریب نیروی محرکه الکتروحرارتی و در نتیجه کاهش خطا در اندازه گیری
- ✓ اهمیت کمتر هزینه در ساخت این مواد
- ✓ منگانه‌ها به عنوان مهمترین ماده مورد استفاده برای این منظور:

۸۶% مس ۱۲% منگنز ۲% نیکل

۲- مواد مورد استفاده برای رنوستا

مشخصات اصلی این مواد عبارت اند:

- ✓ اهمیت زیاد هزینه به دلیل حجم بالای مواد مصرفی
- ✓ تحمل درجه حرارت بالا
- ✓ اهمیت کم ضریب نیروی محرکه الکتروحرارتی

کنستانتان به عنوان مهمترین آلیاژ این دسته است دارای ترکیب زیر:

۶۰-۶۵% مس ۳۵-۴۰% نیکل مقدار کمی آهن یا ماده مغناطیسی

۳- مواد مورد استفاده در وسایل حرارتی

- ✓ تحمل درجه حرارت بسیار بالا ← کاربرد در کوره های الکتریکی و وسایل حرارتی
- ✓ داشتن نقطه ذوب بالا و ضد فساد و زوال
- ✓ کاربرد طلای سفید بخاطر نقطه ذوب بالا در کوره های الکتریکی آزمایشگاهی
- ✓ نیکروم: آلیاژ نیکل، کرم و آهن

به دلیل وجود کرم تحمل درجه حرارت بالا را خواهد داشت.

۴-۱- مواد کربنی (زغالی)

کربن نسبت به فلزات هدایت مخصوص کمتری دارد.

در ساخت جاروبکهای ماشینهای الکتریکی (اغلب گرافیتی) استفاده می‌شود.

با اعمال حرارت ابعاد بلور در گرافیت بزرگتر می‌شود ← هدایت الکتریکی جاروها بالا می‌رود و سختی کاهش می‌یابد.

داشتن سطحی صاف در جاروها به خاطر جلوگیری از سائیده شدن لازم است.

نوع جارو	سختی Kg/mm ²	مقاومت مخصوص $\Omega/m/mm^2$	سرعت محیطی = 25 m/s چگالی جریان = 20 A/cm ² فشار = 800 Kg/m ²		
			افست ولتاژ تماسی	فرسایش در ۲۰ ساعت به mm	حداکثر اصطکاک
گرافیت	8 - 22	8 - 28	0.6 - 1.8	0.4 - 0.5	0.23 - 0.3
الکتروگرافیت	3 - 50	6 - 50	1.1 - 2.5	0.4 - 0.6	0.23 - 0.3
کربن گرافیت	18 - 42	40 - 57	1.5 - 2.5	0.1	0.3
مس گرافیت	4 - 25	0.03 - 15	0.1 - 2.2	0.15 - 0.8	0.2 - 0.26

۵-۱- فوق هادی ها

عدم استفاده از آهن به عنوان مدار مغناطیسی ← موجب پایین بودن چگالی شار می‌شود (0/1T) ← نیرو یا گشتاور تولیدی در واحد حجم ماشین کم می‌شود

بنابراین به برقراری جریان بزرگ در هادی برای تولید میدان مغناطیسی قوی نیاز است.

روش های مختلف تولید جریان بزرگ:

- ✓ هادی با سطح مقطع بزرگ با استفاده از چگالی جریان کوچک انتخاب شود ← ابعاد ماشین بزرگ می‌شود
- ✓ هادی با سطح مقطع کوچک با استفاده از چگالی جریان بزرگ انتخاب شود ← مقاومت سیم و تلفات مسی افزایش می‌یابد و در نتیجه بالارفتن درجه حرارت

مواد فوق هادی: مواد با مقاومت مخصوص قابل اغماض هستند.

درجه حرارت انتقالی: درجه حرارت تبدیل فلز به فوق هادی است.

فلزات هادی خوب (مس، طلا و نقره) در درجه حرارت انتقالی دارای خواص بد فوق هادی هستند.

فلزات هادی بد در درجه حرارت دارای خواص خوب فوق هادی هستند.

فلزات	درجه حرارت انتقالی (°K)	ترکیبات	درجه حرارت انتقالی (°K)
آلومینیوم	1.18	Pb ₂ Au	7
کادمیم	0.52	SnSb	3.9
ایندیوم	3.41	Cu ₂ S	1.6
سرب	7.19	MoN	12
جیوه	4.15	ZrC	2.4
قلع	3.72		
اورانیوم	0.8		
روی	0.86		

- ✓ خاصیت فوق هادی در حضور میدان مغناطیسی قوی (میدان مغناطیسی بحرانی) یا چگالی جریان بالا (چگالی جریان بحرانی) از بین می‌رود.
- ✓ میدان مغناطیسی بحرانی و چگالی جریان بحرانی با افزایش دما پایین می‌آید.
- ✓ انتقال از حالت فوق هادی به هادی برگشتنی است.
- ✓ امکان انتخاب چگالی جریان زیادتر با معرفی مواد فوق هادی ← ساخت ماشین با ابعاد کوچکتر در زیر درجه حرارت انتقالی
- ✓ با استفاده از سیم پیچی های فوق هادی خنک شونده به طور فوق العاده ای می‌توان چگالی شار T ۱۰ یا بیشتر تولید کرد.
- ✓ ابعاد ماشین ها با پیشرفت فوق هادی ها کوچکتر شده است.

۱-۶- مواد مغناطیس

۱- مواد فرومغناطیس: دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی خیلی بزرگتر از واحد هستند

۲- مواد غیرمغناطیسی: دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی کمی بزرگتر از واحد هستند.

۳- مواد ضد مغناطیسی: دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی کمی کمتر از واحد هستند

✓ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در مواد فرومغناطیس به نیروی مغناطیس کننده وابسته است ولی در مواد غیرمغناطیسی و ضد مغناطیسی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مستقل است از نیروی مغناطیس کننده است.

قرار گرفتن ماده فرومغناطیس درون میدان مغناطیسی ← اعوجاج قابل ملاحظه میدان و تولید نیروی زیاد را به دنبال خواهد داشت.

✓ مواد فرومغناطیس: آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آنها

۷-۱- انواع مواد مغناطیسی

۱- مواد مغناطیسی نرم

۲- مواد مغناطیسی سخت

✓ مواد مغناطیسی نرم: دارای حلقه هیستریزیس باریک هستند ← تلفات هیستریزیس پایین خواهند داشت.

✓ مواد مغناطیسی سخت: دارای حلقه پسماند پهن هستند.

در ماشینهای الکتریکی با قدرت کم و وسائلی که به آهنربا نیاز دارند، استفاده می‌شوند.

۸-۱- مواد مغناطیسی نرم

✓ مواد هسته یکپارچه

✓ ورقها و نوارهای آهن

✓ آلیاژهای مخصوص

۱-۸-۱- مواد هسته یکپارچه

کاربرد در اجزاء مدارهای مغناطیسی حاوی شار دائمی: رله ها و بدنه قطبهای ماشین DC

مواد اصلی: آهن نرم، ورق فولاد، فولاد ریخته ای، آهن ریخته ای و فروکبالت

۱- آهن، فولاد کم کربن و فولاد سیلیسیم دار

- ✓ بالارفتن شدید نیروی محرکه مغناطیسی مخالف به خاطر وجود کربن ← افزایش تلفات هیستریزیس را به دنبال خواهد داشت.
- ✓ افزایش اندازه دانه ها در بلور به خاطر وجود اکسیژن در آهن سیلیسیم ← خاصیت نرمی مغناطیسی اصلاح خواهد کرد.
- ✓ مقاومت مخصوص پایین در فولاد کم کربن ← تلفات فوکو در تحریک جریان متناوب افزایش می یابد.

۲- آهن ریخته ای

- ✓ دارای ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی پایین است.
- ✓ کاربرد در بدنه ماشین جاییکه هزینه از اهمیت بالایی برخوردار است و وزن اضافه ناخوشایند نیست.

۳- فولاد ریخته ای

کاربرد در بخش هایی از مدار مغناطیسی حاوی شار دائم است که نیازمند استقامت مکانیکی بالا باشد.

کربن ۴% سیلیسیم ۰/۲% منگنز ۲/۵% فسفر ۰/۰۸% گوگرد ۰/۰۵%

۴- فروکبالت

- ✓ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بالا در مقادیر بالای چگالی شار دارد.
- ✓ چگالی شار اشباع آن ۱۰% بالاتر از آهن خالص است.
- ✓ در کفشک قطبها حاوی چگالی شار زیاد استفاده می شود.

۱-۸-۲- ورق فولاد

۱- فولاد جهت دار نشده (Non-oriented steel)

- ✓ اضافه کردن سیلیسیم ← کاهش تلفات پسماند و افزایش مقاومت مخصوص و در نتیجه کاهش تلفات جریان گردابی را به دنبال خواهد داشت.
 - ✓ مقدار مرسوم سیلیسیم در فولاد $0.2-0.5\%$ است.
 - ✓ فولاد دارای سیلیسیم بیشتر از 5% ترد و شکننده می‌شود.
- استفاده از قسمتهای آهنی در چگالی شار بالا ← موجب بیشتر شدن نسبت توان خروجی به وزن می‌گردد ← بنابراین مواد مغناطیسی بکاررفته بایستی دارای چگالی شار اشباع بالاتری باشند ← پس وجود سیلیسیم عیب است.
- ✓ در ماشینهای گردان از فولاد کم کربن سیلیسیم‌دار استفاده می‌شود.
 - ✓ در ماشینهای کوچک تلفات آهن کم اهمیت است ← از مواد با 0.5% سیلیسیم استفاده می‌شود.
 - ✓ در مولدهای توربینی به حداکثر بازده نیاز است ← به منظور کاهش تلفات آهن، از ورق آهن پرس‌سیلیسیم استفاده می‌شود.
- ۲- ورق فولاد نوردشده سرد با دانه‌های جهت‌یابی شده
- ✓ سهم بزرگی از نیروی محرکه مغناطیسی در یک ماشین گردان به فاصله هوایی اختصاص دارد.
 - ✓ در صورت به اشباع رفتن آهن، نیروی محرکه مغناطیسی برای قسمت های آهنی بزرگ می‌شود ← نیاز به چگالی شار بالا برای کوچک کردن ابعاد ماشین
 - ✓ انتخاب ماده ای خاص برای قسمت های آهنی برای داشتن چگالی شار بالا بدون نیاز به نیروی محرکه مغناطیسی بزرگ.
 - ✓ شکل‌گرفتن بلورها به صورت نامنظم در ورقهای نوردشده گرم ← کم بودن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی
 - ✓ مقدم بودن جهت نورد شدن ماده به طور مغناطیسی بر دیگر جهات ← شکل‌گرفتن ورق فولاد نورد شده سرد با دانه های جهت داده شده
 - ✓ برای استفاده در ترانسفورماتورها و مولدهای توربینی بزرگ مناسب است.
 - ✓ هزینه فولاد نورد شده سرد، بیشتر است.

۱-۸-۳- آلیاژهای مخصوص

✓ برای داشتن چگالی شار بالا در میدانهای ضعیف از آلیاژهای مخصوص استفاده می‌شود.

۱- مومتال

۷۶٪ نیکل ، ۴٪ مولیبدن ، مس ، آهن و منگنز

✓ دارای مقاومت مخصوص الکتریکی بالاست ← تلفات جریان گردابی کم است.

۲- پرمالوی (Permalloy)

الف - پرمالوی پر نیکل (بالای ۸۰٪ نیکل)

✓ دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی حداکثر بالا و مقاومت مخصوص بالا است.

✓ در تقویت کننده های مغناطیسی و ترانسفورماتورهای جریان ضعیف استفاده می‌شود.

ب- پرمالوی کم نیکل (۳۸-۵۰٪ نیکل) به اضافه منگنز ، سیلیکن و کرم

✓ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آن نسبت به پرمالوی پرنیکل کمتر است.

✓ مقاومت مخصوص بیشتری دارد.

✓ در هسته های ترانسفورماتورها و پیچکهای القایی استفاده می‌شود.

۳- سوپرمالوی

✓ آلیاژ آهن، نیکل ، مس و مولیبدن

✓ دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ابتدایی بالا است.

۴- پرمینوار (Perminvar)

✓ آلیاژ آهن، نیکل و کبالت

✓ دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مستقل از شدت میدان مغناطیسی است.

✓ هزینه بالا داشته و فرآیند ساخت آن پیچیدگی دارد.

۵- پرمندور (Permendur)

۴۹% کبالت ۲% واندیم ۴۹% آهن

- ✓ درهسته های نیازمند تولید چگالی شار قوی در فاصله هوایی همچون اسیلوگراف (نوسان نگار) و میکروفن استفاده می شود.
- ✓ قابلیت ایجاد چگالی شار بزرگتری نسبت به فولاد

۹-۱- مواد عایق

- ✓ مواد طبیعی: کاغذ پارچه پارافین جامد و صمغ های طبیعی
- ✓ مواد عایق غیر آلی: شیشه ، سرامیک ، میکا

ترکیبات آلی سیلیسیم مصنوعی: ترکیباتی جدید با خواصی بین مواد آلی و غیرآلی

۱۰-۱- خواص الکتریکی مواد عایق

پارامترهای مختلفی وجود دارند که مشخص می کنند یک ماده می تواند عایق مناسب باشد، برای مثال مقاومت مخصوص، استقامت الکتریکی (ولتاژ شکست)، نفوذپذیری الکتریکی و پسماند دی الکتریک.

یک ماده عایق ایده آل بایستی شامل ویژگی های زیر باشد:

- ✓ استقامت الکتریکی یا ولتاژ شکست بالا
- ✓ مقاومت مخصوص زیاد
- ✓ پسماند دی الکتریک پائین
- ✓ هدایت حرارتی خوب
- ✓ استقامت در برابر رطوبت، اثرات شیمیایی و حرارت
- ✓ خواص مکانیکی خوب همچون تحمل ارتعاش، خم شدن و خراشیدگی

تغییر خواص الکتریکی مزبور با عوامل مختلف:

- ۱- ابعاد نمونه مورد آزمایش
- ۲- مقدار موثر، شکل موج و فرکانس ولتاژ اعمالی

۳- درجه حرارت و مقدار رطوبت

۴- فشار مکانیکی روی نمونه

انتخاب اطلاعات به دست آمده برای خواص الکتریکی از روی تجربه های آزمایشگاهی روی نمونه به عنوان مقادیر اولیه و در نظر گرفتن ضریب اطمینان بزرگ برای اثرات رطوبت، حرارت، تنش های مکانیکی و شدت میدان الکتریکی غیرعادی ناشی از امواج، ناصافی ها و لبه های تیز با شدت میدان عملی شدید.

۱۱-۱- درجه حرارت و مواد عایق

- ✓ اتلاف انرژی در هنگام تبدیل انرژی در ماشین الکتریکی ← گرم شدن بخشهای فعال ماشین (قسمتهای آهنی حاوی شار و هادی حامل جریان) و پایین آمدن راندمان
- ✓ تلفات انرژی به خاطر اثر آن روی افزایش درجه حرارت و تخریب عایق بکاررفته در ماشین اهمیت دارد.
- ✓ تلفات به خروجی ماشین وابسته است ← تعیین بار حداکثر ماشین با توجه به درجه حرارت حداکثر مجاز مواد عایقی بایستی صورت پذیرد.

✓ طول عمر عایق گروه A در درجه حرارت های مختلف همچون یک مثال:

- در درجه حرارت ۹۰ درجه سلسیوس حدود ۲۳ سال
- در درجه حرارت ۹۷ درجه سلسیوس حدود ۱۲ سال
- در درجه حرارت ۱۵۰ درجه سلسیوس حدود ۴۷ روز
- در درجه حرارت ۲۰۰ درجه سلسیوس حدود ۱۰ ساعت

- ✓ مسائل کم اهمیت تر دیگر ناشی از افزایش درجه حرارت: اثر مخرب آن روی شرایط کار اجزاء دیگر ماشین مثل ابعاد کموتاتور، لحیم بین کموتاتور و سرهای سیم پیچی و یاطاقانها
- ✓ سادگی انجام طراحی یک ماشین با انتخاب بارگیری های الکتریکی و مغناطیسی کم به دلیل پایین آوردن دما ← بالارفتن وزن و هزینه ساخت ماشین طراحی شده
- ✓ حل صحیح مسئله: استفاده بهینه از مواد بکاررفته برای رسیدن به حداکثر بازده و طول عمر کافی ماشین

- ✓ طراحی مناسب سیستم تهویه به منظور انتقال حرارت تولیدی
- ✓ تعیین درجه حرارت نهایی ماشین هنگام برابری حرارت تولیدی ناشی از تلفات با مقدار حرارت انتقالی
- ✓ وابسته بودن درجه حرارت نهایی ماشین به سیستم خنک کردن و تهویه ماشین
- ✓ رسیدن به توان خروجی زیادتر با وزن معینی مواد به وسیله اصلاح سیستم تهویه ← اهمیت زیاد مدلسازی حرارتی ماشین در طراحی ماشین
- ✓ طراحی ماشین دارای بازده حداکثر و تحمل درجه حرارت بالا با حداقل کردن هزینه ساخت و وزن ماشین

۱-۱۲- تقسیم بندی مواد عایقی

- درجه حرارت تا ۹۰ درجه سلیسیوس گروه Y
- درجه حرارت تا ۱۰۵ درجه سلیسیوس گروه A
- درجه حرارت تا ۱۲۰ درجه سلیسیوس گروه E
- درجه حرارت تا ۱۳۰ درجه سلیسیوس گروه B
- درجه حرارت تا ۱۵۵ درجه سلیسیوس گروه F
- درجه حرارت تا ۱۸۰ درجه سلیسیوس گروه H
- درجه حرارت بالاتر از ۱۸۰ درجه سلیسیوس گروه C

✓ گروه Y: پنبه، ابریشم و کاغذ غیر آغشته

برای ماشین های الکتریکی به خاطر فاسد شدن سریع و جاذب رطوبت نامناسب است.

✓ گروه A: مواد گروه Y آغشته به روغن

✓ گروه E: لعابهای مصنوعی ورقهای کاغذ با چسب فرمالوئید

- ✓ گروه B: میکا، الیاف شیشه ای (فیبرگلاس)، پنبه نسوز با چسب مناسب
- ✓ گروه F: مواد گروه B با چسبی که دارای پایداری حرارتی بالاست
- ✓ گروه H: مواد گروه B با صمغ سیلیسیم
- ✓ گروه C: میکا، چینی، شیشه، کوارتز با یا بدون چسب غیرآلی

۱-۱۳-۱- موارد استعمال مواد عایق

۱-۱۳-۱- مواد عایق برای سیم ها

ویژگی های این نوع عایق عبارت اند از: قابلیت انعطاف، ظرافت، سرعت عمل و استقامت در مقابل تنش ها و خراشیدگی در حین فرآیند سیم پیچی

۱- پوشش لعاب: لایه نازک لعاب مصنوعی

فرآیند ساخت: سیم از داخل لاک و درون یک محفظه گرم عبور داده می شود ← پوشش لاک به صورت لایه سفت و ارتعاجی با استقامت عایقی بالا شکل می گیرد

✓ مورد استفاده برای موتورهای کوچک و دستگاههای صنعتی

ضخامت پوشش لعاب: $0.025 - 0.075$ mm ← ضریب فضای بزرگی برای پیچک به دست می آید.

۲- پوشش پنبه

فرآیند ساخت: چند رشته نخ به صورت مارپیچ به کمک ماشین حلاجی روی سیم به صورت یک لایه پیچیده می شود.

ضخامت لایه: $0.05 - 0.2$ mm

✓ موارد کاربرد: سیم پیچی قطبها، آرمیچر و موتورهای جریان متناوب

✓ نسبت به سیم لعابدار در برابر کار خشن و ویژگی خواباندن چند لایه رویهم مقاوم تر است.

۳- پوشش ابریشم:

✓ برای سیم پیچی های با ضریب فضای مورد نیاز بزرگ استفاده می شود.

✓ به خاطر قیمت بالای آن کمتر استفاده می شود.

۴- پوشش لعاب شیشه ای

✓ از دو لایه نخ از الیاف شیشه ای رویهم تشکیل می شود.

ضخامت معمول: ۰/۲-۰/۱۵ میلیمتر

✓ لعاب کاری روی لایه مزبور به خاطر تسهیل در امر سیم پیچی ضرورت دارد.

لعاب کاری باعث بالارفتن مقاومت سیم در برابر خراشیدگی هنگام سیم پیچی و جلوگیری از جذب رطوبت می شود.

۵- پوشش پنبه نسوز

✓ برای سیم گرد با عایق گروه B استفاده می شود.

۱-۱۳-۲- مواد عایقی برای ورقه های آهن

✓ تحت فشار بودن هسته های مورق ماشینهای الکتریکی هنگام ساخت

✓ جلوگیری از اتصال فلز به فلز با عایق کاری ورقه ها .

خصوصیات اصلی عایق خوب برای ورقه ها:

- همگن و متجانس بودن در لایه های نازک
- چسبندگی و مقاومت مخصوص زیاد

۱- اینزولین

یک پودر چینی به نام کائولین (Kaolin) قرار گرفته در یک طرف یا دو طرف ورق با ضخامت

۰/۰۱-۰/۰۲۵ میلیمتر

۲- اکسید

✓ به طور طبیعی هنگام نورد کردن گرم، روی ورقها پوشش اکسیدی ایجاد می شود.

✓ فراهم کردن پوشش اکسیدی مصنوعی با مقاومتی ۱۰ برابر پوشش طبیعی به دلیل قابل

اطمینان نبودن پوشش طبیعی

۳- لعاب (ورنی)

- ✓ موثرترین نوع عایق (در دو طرف ورق)
- ✓ فراهم شدن خاصیت ضدزنگی برای ورقه
- ✓ ضخامت لعاب ۰/۰۰۶ mm برای ورقه ۰/۳۵ mm

۱-۱۳-۳- مواد عایقی در ماشین ها

۱- مواد عایقی گروه A

شامل نوارها و ورقهای قابل انعطاف مورد استفاده برای نوارپیچی هادیهای مستطیلی پیچک های میدان و آرمیچر ماشین dc و پیچکهای استاتور و رتور ماشینهای ac می باشد.

الف- نوار پنبه ای و کتان آغشته به روغن

- ✓ به خاطر جلوگیری از نفوذ رطوبت آغشته به روغن می گردد .
- ✓ نوار کتانی آغشته به روغن دارای استقامت الکتریکی ۴۰KV/mm است.

ب- الیاف چرم مانند

- ✓ برای عایقکاری شیارهای ماشینهای فشار ضعیف استفاده می شود.
- ✓ ضخامت ۰/۲۵-۰/۵ میلیمتر

ج- نایلون

- ✓ دارای استقامت کششی بالا و خواص عایقی خوب ۸۰ KV/mm است.

۲- مواد عایقی گروه B

- ✓ به صورت نوار شامل الیاف شیشه ای، پنبه نسوز و میکا مورد استفاده قرار می گیرد.

الف- الیاف شیشه ای

- ✓ به صورت نوار با ضخامت ۰/۰۷۵-۰/۲۷۵ میلیمتر

- ✓ از رشته های نخ به هم بافته شده به لعاب آغشته شده، ساخته می شوند.
- ✓ دارای استقامت الکتریکی $40-80 \text{ KV/mm}$

ب- پنبه نسوز

- ✓ به صورت ورق درجایی که خاصیت ضربه گیر و اصطکاک لازم باشد مثل عایق گوشه های سیم پیچی استفاده می شوند.

ج- میکا

- ✓ کاربرد به صورت ورق و نوار
- ✓ به شکل ورق دارای ضخامت $0.125-0.25$ میلیمتر به نام میکانیت
- ✓ استقامت عایقی نوار میکا $40-48 \text{ KV/mm}$ و ورق میکا $80-160 \text{ KV/mm}$ است.

پروسه ساخت ورق میکا: آنرا روی ورق نازک نگه دارنده قرار داده با لاک یا صمغ مصنوعی می چسبانند و در حالت گرم فشرده می کنند تا حلال آن از بین رفته و به صورت جامد سختی درآید.

نوار میکا: از خرده های میکا تشکیل شده که برای بالابردن استقامت مکانیکی روی کاغذی نازک یا پارچه ای پنبه ای بسته می شوند. نوار میکا به صورت گسترده در نواربندی آرمیچر و پیچکهای تحریک موتورهای حمل و نقل و نوارپیچی پیچکهای جریان متناوب فشارقوی کاربرد دارد.

۳- نکات اضافی:

- ✓ از ورنی و ترکیبات آغشته دیگر به عنوان مواد عایقی خوب برای ماشینهای الکتریکی به علت افزایش استقامت عایقی و ضد رطوبت نمودن عایقهای الیافی استفاده می کنند.
- ✓ به خاطر جلوگیری از تشکیل حفره پیچکهای فشارقوی در خلا آغشته نمایند.
- ✓ وجود حفره باعث افزایش شدت میدان در عایق و کاهش هدایت حرارتی پیچکها می شود.
- ✓ در قدیم از چسبهای طبیعی یا صمغ و روغن های اکسیدکننده به عنوان لعاب استفاده می شد ولی بعدها به دلایل اقتصادی لعابهای مصنوعی همچون فنل فرماید استفاده گردید.
- ✓ لعابهای جدید سیلیکونی نسبت به سایر لعابها دارای استقامت حرارتی بالاتر هستند.
- ✓ ماشین با عایق الیاف شیشه ای مناسب برای کار در دمای $200-250^\circ\text{C}$ است.
- ✓ از مقره های چینی برای عایقکاری ترمینالهای ماشینهای فشارقوی استفاده می گردد.

۱-۱۳-۴- مواد عایقی برای ترانسفورماتورها

- ✓ از عایقهای گروه A برای ترانسفورماتورهای خنک شونده با هوا یا روغن استفاده می‌شود.
- ✓ پارچه پنبه ای یا کتانی آغشته به روغن برای نواربندی سیم پیچی ترانسفورماتورهای خنک‌شونده با هوا کاربرد دارد.
- ✓ کاغذ با صمغ مصنوعی به صورت فیبر برای عایق کاری پیچکها نسبت به هم و بین سیم‌پیچی و هسته استفاده می‌شود.
- ✓ کاغذ فشرده برای ایجاد فاصله جهت هدایت روغن و حصار بین پیچکها و ظرف روغن استفاده می‌شود.

فصل دوم:

گرم شدن و خنک شدن ماشین‌های الکتریکی

۲-۱- انتقال حرارت:

انتقال حرارت به سه طریق امکان پذیر است: هدایت، جابجایی و تشعشع

۲-۱-۱- هدایت (Conduction)

اهمیت این نوع انتقال حرارت برای اجزاء جامد ماشین (مس، آهن و عایق) است.

برقراری جریان بین دو نقطه از مدار الکتریکی با پتانسیل‌های V_1 و V_2 .

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (1-2)$$

که در آن R مقاومت الکتریکی محیط هادی بین دو نقطه است.

معادله جریان حرارتی: (هدایت بین دو سطح)

$$Q_c = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_\theta} \quad (2-2)$$

Q_c : حرارت انتقالی توسط هدایت به W

θ_1 و θ_2 : درجه حرارت دو سطح مزبور به $^{\circ}C$

R_θ : مقاومت حرارتی محیط بر حسب اهم حرارتی (یا $^{\circ}C$ بر وات)

مقاومت حرارتی:

اهم حرارتی مقاومت حرارتی است که باعث افت 1°C بر وات جریان حرارتی می‌گردد.

$$R_{\theta} = \frac{\rho t}{S} \quad (3-2)$$

ρ : مقاومت مخصوص حرارتی ساده برحسب اهم حرارتی متر

t : طول محیط به متر

S : سطح مقطع محیط جدا کننده به مترمربع

$$\Rightarrow Q_c = \frac{S(\theta_1 - \theta_2)}{\rho t} \quad (W) \quad (4-2)$$

حرارت انتقالی بر متر مربع:

$$q_c = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\rho t} \quad (W/m^2) \quad (5-2)$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 = Q_c R_{\theta} = Q_c \frac{\rho t}{S} \quad (6-2)$$

• انتقال حرارت کمتر برای ماده با مقاومت مخصوص حرارتی بزرگتر

هوای $\rho = 20 \ \Omega\text{m}$

کاغذ $\rho = 7.5 \ \Omega\text{m}$

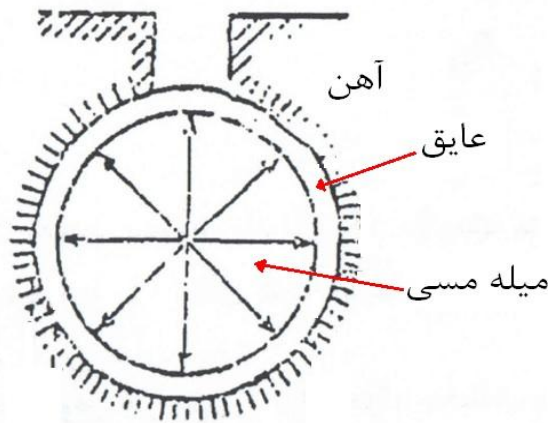
ورق فولاد $\rho = 0.02 \ \Omega\text{m}$

$$\rho = 0.003 \text{ } \Omega\text{m}$$

اثرات بد در انتقال حرارتی \Rightarrow وجود حفره درون عایق

مثال ۱-۲- در شکل زیر قطر میله 1.2 cm و طول آن 20 cm می باشد. عایق از جنس میکائیت $\rho = 8 \text{ } \Omega. \text{ m}$ با ضخامت 1.5 mm است.

هدف: محاسبه تلفات انتقالی به صورت حرارت از میله مسی به آهنی در صورتی که اختلاف درجه حرارت بین آنها 25°C باشد.



شکل ۱-۲- برش عرضی یک میله درون شیار

سطح مقطع عایق در مسیر جریان حرارتی:

طول \times محیط مکانیک با شعاع متوسط $S =$

$$= \frac{\pi(1.2 + 0.15)}{100} \times 0.2 = 8.48 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ضخامت عایق : $t = 1.5 \text{ mm} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$R_{\theta} = \frac{\rho t}{S} = \frac{8 \times 1.5 \times 10^{-3}}{8.48 \times 10^{-3}} = 1.42 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 = 25^\circ\text{C}$$

$$Q_c = \frac{\theta}{R} = \frac{25}{1.42} = 17.6 \text{ W}$$

مثال ۲-۲- هدایت مخصوص حرارتی ورقه‌های آرمیچر در طول ورق‌ها 20 برابر آن در عرض ورقه‌ها می‌باشد. اختلاف 5°C باعث هدایت 25 W از طول یک سری ورق به ضخامت 2 cm و سطح مقطع 25 cm^2 می‌گردد. محاسبه کنید تلفات حرارتی انتقالی از عرض یک سری ورق به ضخامت 4 cm و سطح مقطع 60 cm^2 با اختلاف درجه حرارت 20°C .

برای هدایت در طول:

$$Q_c = \frac{S(\theta_1 - \theta_2)}{\rho t} \Rightarrow 25 = \frac{25 \times 10^{-4} \times 5}{\rho \times 2 \times 10^{-2}} \Rightarrow \rho = 0.025 \text{ } \Omega\text{m}$$

$\rho' = 20 \rho = 0.5 \text{ } \Omega\text{m}$: مقاومت مخصوص حرارتی در عرض ورقه‌ها

برای هدایت در عرض:

$$Q_c = \frac{S(\theta_1 - \theta_2)}{\rho' t} = \frac{60 \times 10^{-4} \times 20}{0.5 \times 4 \times 10^{-2}} = 6 \text{ W}$$

۲-۱-۲- تشعشع (Radiation)

عوامل مؤثر در انتقال حرارت به طریق تشعشع: درجه حرارت سطح، رنگ و جنس سطح و میزان ناهمواری.

$$q_r = 5.7 \times 10^{-8} e(T_1^4 - T_0^4) \text{ W/m}^2 \quad (7-2)$$

T_1 و T_0 : درجه حرارت مطلق سطح و محیط

e : ضریب تشعشع برای اجسام سیاه یک و دیگر اجسام کمتر از یک است.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{فلز صیقلی} & e = 0.15 \\ \text{رنگ فلزی تیره} & e = 0.9 \end{array} \right.$$

$$q_r = 5.7 \times 10^{-8} e (T_1 - T_0) (T_1^3 + T_1^2 T_0 + T_0^2 T_1 + T_0^3)$$

(تغییرات کم این بخش رابطه در محدوده درجه حرارت کاری ماشین‌های الکتریکی)

$$\Rightarrow q_r = 5.7 \times 10^{-8} e k_r (T_1 - T_0) = 5.7 \times 10^{-8} e k_r (\theta_1 - \theta_0) \text{ W/m}^2$$

$$k_r = T_1^3 + T_1^2 T_0 + T_0^2 T_1 + T_0^3$$

برای سطح آهنی و فولاد : $e = 0.9 - 0.97$

با در نظر گرفتن یک مقدار امن 0.83 برای این ضریب، داریم:

$$\Rightarrow q_r = 4.8 \times 10^{-8} k_r (\theta_1 - \theta_0) = \lambda_r \theta \quad (8-2)$$

$$1^\circ\text{C} \quad \lambda_r = k_r \times 4.8 \times 10^{-8} \quad (\text{W/m}^2\text{C})$$

مقدار کل حرارت انتقالی به وسیله تشعشع:

$$Q_r = q \times S = \lambda_r \theta S \quad (9-2)$$

مثال ۲-۳- جسم کروی با ضریب تشعشع 0.8 و درجه حرارت 60°C

درجه حرارت دیواره‌های اتاق: 20°C

هدف: محاسبه حرارت تشعشع شده از جسم؟

$$e = 0.8$$

$$T_1 = 273 + 60 = 333 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_0 = 273 + 20 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$q = 5.7 \times 10^{-8} \times 0.8 (333^4 - 293^4) = 222 \text{ W/m}^2$$

۲-۱-۳- جابجایی (همرفت) Convection

جابجایی طبیعی: (Natural Convection)

سبک شدن ذرات مایع یا گاز گرم شده \Leftarrow بالارفتن این ذرات و جایگزینی ذرات گرم با ذرات سرد

حرارت انتقالی بر واحد سطح به وسیله جابجایی طبیعی:

$$q_c = K_c (\theta_1 - \theta_0)^n \text{ W/m}^2 \quad (۱۰-۲)$$

$$1 < n < 1.25$$

n : وابسته به شکل و ابعاد جسم گرم

$$\xrightarrow{n=1} q_c = K_c (\theta_1 - \theta_0) = K_c \theta \quad \theta_0 \text{ و } \theta_1: \text{ دمای جسم و محیط}$$

$$Q_c = q_c \times S = K_c \theta S$$

جابجایی مصنوعی یا اجباری: (Forced Convection)

انتقال حرارت با شارش سیال خنک کننده روی سطح گرم انجام می گیرد.

به عنوان مثال: وزش هوا روی ظرف ترانس و گردش هیدروژن در یک مولد توربینی

✓ پیچیده بودن محاسبه حرارت انتقالی به وسیله جابجایی اجباری

$$\lambda'_c = \lambda_c (1 + K_v \sqrt{v}) \quad \text{W/m}^2\text{°C} \quad (11-2)$$

λ'_c : حرارت مخصوص انتقالی برای سطح با وزش هوا

λ_c : حرارت مخصوص انتقالی با جابجایی طبیعی

v : سرعت نسبی سطح خنک شونده و وزش هوا

K_v : ضریب ثابت وابسته به به یکنواختی یا غیریکنواختی وزش هوا

$$K_v = 0.5 : \text{وزش غیریکنواخت} \quad K_v = 1.3 : \text{وزش یکنواخت}$$

۲-۲- قانون نیوتن برای خنک کردن

درجه حرارت پایدار: درجه حرارتی که در آن حرارت تولیدی ناشی از تلفات مساوی حرارت انتقالی از سطح به طریق تشعشع و جابجایی است.

$$Q_r = \lambda_r \theta S \quad \text{و} \quad Q_c = \lambda_c \theta S$$

حرارت کل انتقالی:

$$Q = Q_r + Q_c = (\lambda_r + \lambda_c) \theta S = \lambda \theta S \quad (12-2)$$

λ : حرارت مخصوص انتقالی ناشی از تشعشع به اضافه جابجایی

$$Q = \lambda \theta S : \text{قانون خنک سازی نیوتن} \quad (13-2)$$

۲-۳- ذوب فلزات

✓ محاسبه جریان ذوب فلزات به کمک خنک سازی نیوتن

d [mm] : قطر سیم

I [A] : جریان ذوب فلز

ρ [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$] : مقاومت مخصوص سیم

l [m] : طول سیم

θ [$^{\circ}\text{C}$] : درجه حرارت ذوب

λ [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$] : حرارت مخصوص انتقالی کل

a = $\frac{\pi}{4} d^2$ (mm^2) : سطح مقطع سیم

حرارت تولیدی در نقطه ذوب : $RI^2 = \rho \frac{l}{a} I^2 = \frac{4}{\pi} \frac{\rho l}{d^2} I^2$ (W)

سطح انتقال حرارت سیم : $S = \pi d l \times 10^{-3}$

حرارت انتقالی در نقطه ذوب : $Q = \lambda \theta S = \lambda \theta \pi d l \times 10^{-3}$

در نقطه ذوب : حرارت انتقالی = حرارت تولیدی

$$\Rightarrow \frac{4}{\pi} \frac{\rho l}{d^2} I^2 = \lambda \theta \pi d l \times 10^{-3} \Rightarrow I^2 = \left(\frac{\pi^2}{4} \times \frac{\lambda \theta}{\rho} \times 10^{-3} \right) d^3$$

$$I = K d^{3/2} \quad (14-2)$$

که در آن K ضریب ثابت پرسی می باشد و عبارت است از:

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2 \lambda \theta}{4 \rho} \times 10^{-3}} \quad (15-2)$$

مثال ۲-۴- سیمی به شعاع 0.5mm از ماده‌ای با مقاومت مخصوص $0.125 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ با نقطه ذوب 250°C ساخته شده است. اگر سیم حرارتش را به میزان $2.3 \text{ cal}/\text{s m}^2\text{C}$ از دست بدهد، جریان ذوب آن را در درجه حرارت محیط 15°C به دست آورید.

$$\text{سطح مقطع سیم} : a = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 1^2 = 0.785 \text{ mm}^2$$

$$\text{مقاومت سیم بر واحد طول} : R = \rho \frac{l}{a} = \frac{0.125 \times 1}{0.785} = 0.159 \Omega$$

اگر I جریان ذوب باشد:

$$\text{حرارت تولیدی با جریان ذوب} : RI^2 = 0.159I^2 \text{ (W)}$$

$$\text{سطح انتقال حرارت سیم} : S = \pi \times 1 \times 10^{-3} \times 1 = 0.00314 \text{ m}^2$$

$$\text{افزایش درجه حرارت} : \theta = 250 - 15 = 235^\circ\text{C}$$

$$\text{انتقال حرارت مخصوص} : \lambda = 2.3 \times 4.2 = 9.65 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$$

$$(1 \text{ cal}/\text{s} = 4.2 \text{ W})$$

$$\text{حرارت انتقالی در نقطه ذوب} : \lambda \theta S = 9.65 \times 235 \times 0.00314 = 7.12 \text{ W}$$

$$\text{حرارت انتقالی} = \text{حرارت تولیدی در نقطه ذوب}$$

$$\Rightarrow 0.159 I^2 = 7.12 \Rightarrow I = 6.7 \text{ A}$$

گرادیان درجه حرارت

۲-۴- درجه حرارت داخلی (درجه حرارت نقاط گرم)

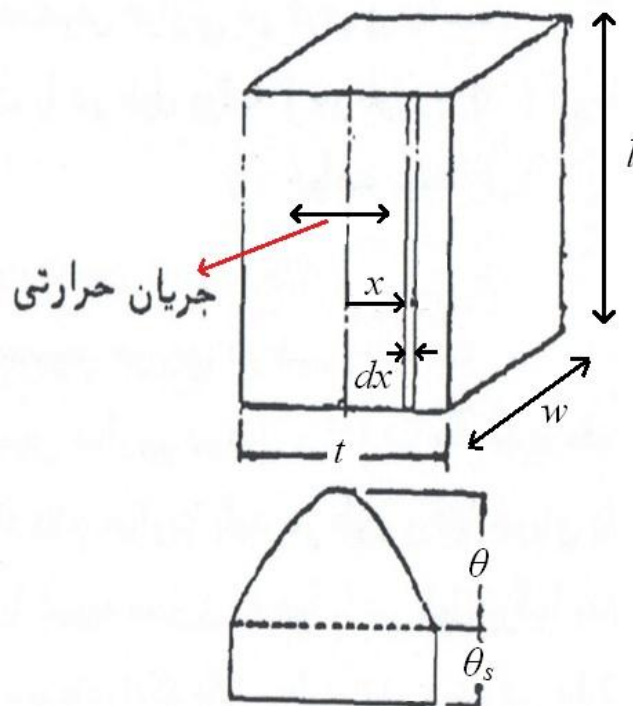
- ✓ تولید حرارت درون ماشین‌های الکتریکی ناشی از تلفات هسته و تلفات مسی
- ✓ انتقال حرارت به سطح از طریق هدایت

✓ خطر افزایش درجه حرارت داخلی برای یک عایق‌بندی ضخیم یا سطح مقطع خیلی بزرگ
سیم‌پیچی

✓ تعیین درجه حرارت گرم‌ترین نقطه به منظور جلوگیری از آسیب رساندن به عایق‌بندی

۲-۴-۱- محاسبه درجه حرارت داخلی

صفحه بزرگی به ضخامت t از یک ماده متجانس در نظر می‌گیریم. با فرض آن که طول (l) و پهنا (w) صفحه در مقایسه با ضخامتش خیلی بزرگ است، انتقال حرارت فقط در راستای ضخامت بررسی می‌شود. نوار باریکه به ضخامت dx در نظر بگیریم. اختلاف درجه حرارت دیوارهای نوار را با $d\theta$ نشان می‌دهیم.



شکل ۲-۲- گرادینان درجه حرارت

حرارت انتقالی از این نوار:

حجم \times حرارت واحد حجم = Q

$$Q = ql w x$$

مقاومت نوار حرارتی \times حرارت هدایت شده $d\theta =$

$$= qlwx \times \frac{\rho dx}{lw} = q\rho x dx$$

اختلاف درجه حرارت بین مرکز و هر نقطه به فاصله x :

$$\theta = \int_0^x q\rho x dx = \frac{q\rho x^2}{2} \quad (16-2)$$

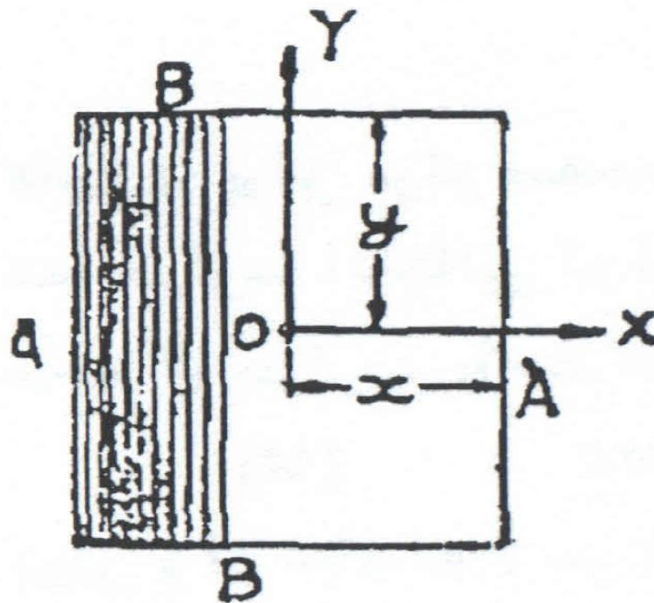
اختلاف درجه حرارت بین مرکز و سطح خارجی:

$$\chi = \frac{t}{2} \rightarrow \theta = \frac{q\rho t^2}{8} \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{درجه حرارت گرم ترین نقطه (مرکز صفحه)} = \theta + \theta_s = \frac{q\rho t^2}{8} + \theta_s \quad (17-2)$$

↓
دمای محیط

۲-۴-۲- گرادیان درجه حرارت در هسته‌ها



شکل ۲-۳- جریان حرارتی در هسته مورق

انتقال حرارت از گرم‌ترین نقطه (O) به سطوح A و B:

$$\theta_{oA} = \frac{q \rho_x x^2}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad \checkmark \text{ اگر جریان حرارت را فقط در طول } OX \text{ در نظر می‌گیریم:}$$

$$\theta_{oB} = \frac{q \rho_y y^2}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad \checkmark \text{ اگر جریان حرارت را فقط در طول } OY \text{ در نظر می‌گیریم:}$$

$$\rho_y < \rho_x \quad \rho_x: \text{ مقاومت مخصوص حرارتی در عرض ورقه‌ها}$$

$$\simeq \frac{1}{20} \rho_x \quad \rho_y: \text{ مقاومت مخصوص حرارتی در طول ورقه‌ها}$$

مثال ۲-۵- مقاومت مخصوص حرارتی یک سری ورق در طول ورقه‌ها $0.02 \Omega\text{m}$ است. تلفات آهن در هر مترمکعب 40kW می‌باشد. اختلاف درجه حرارت بین گرم‌ترین نقطه و سطح خارجی را زمانیکه پهنای هسته در طول ورقه‌ها 20cm و در عرض ورقه‌ها 10cm محاسبه کنید. مقاومت مخصوص حرارتی در عرض ورقه‌ها 40 برابر آن در طول ورقه‌هاست.

$$x = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} , \quad y = 10 \text{ cm} = 0.1\text{m}$$

$$\rho_y = 0.02 \Omega\text{m} \quad \text{مقاومت مخصوص حرارتی در طول}$$

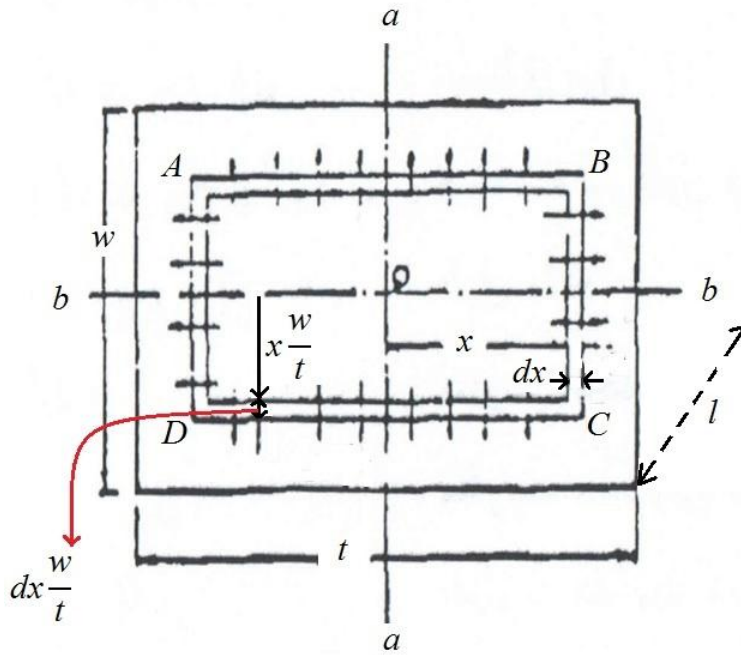
$$\rho_x = 40 \rho_y = 40 \times 0.02 = 0.8 \Omega\text{m} \quad \text{مقاومت مخصوص حرارتی در عرض}$$

$$\theta_{oB} = \frac{q \rho_y y^2}{2} = \frac{40000 \times 0.02 \times 0.1^2}{2} = 4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{(اختلاف دما در طول)}$$

$$\theta_{oA} = \frac{q \rho_x x^2}{2} = \frac{40000 \times 0.8 \times 0.05^2}{2} = 40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{(اختلاف دما در عرض)}$$

۲-۴-۳- جریان حرارت در دو بعد (جهت)

فرض می‌کنیم طول محوری هسته در مقایسه با پهنای یا ضخامت خیلی بزرگ است. به علاوه، تمام سطح خارجی دارای درجه حرارت ثابتی است.



شکل ۲-۴- جریان حرارتی در دو بعد

ρ_x : مقاومت مخصوص حرارتی در راستای x (طول bb)

ρ_y : مقاومت مخصوص حرارتی در راستای y (طول aa)

q : حرارت تولیدی بر واحد حجم

با توجه به موازی بودن مسیرهای حرارتی داریم:

$$d\theta = q_x \left(\frac{\rho_x dx}{l(AD + BC)} \parallel \frac{\rho_y \frac{w}{t} dx}{l(AB + CD)} \right) = q_x \left(\frac{\frac{\rho_x dx}{4lx \frac{w}{t}} \times \frac{\rho_y \frac{w}{t} dx}{4lx}}{\frac{\rho_x dx}{4lx \frac{w}{t}} + \frac{\rho_y \frac{w}{t} dx}{4lx}} \right)$$

$$= q_x \frac{dx}{4xl} \left(\frac{\rho_x \rho_y w t}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} \right)$$

که در آن:

$$q_x = q l \left(2x \frac{2xw}{t} \right) = q \times 4 l x^2 \frac{w}{t}$$

با جایگذاری q_x در رابطه بدست آمده داریم:

$$d\theta = q \times 4 l x^2 \frac{w}{t} \frac{dx}{4xl} \left(\frac{\rho_x \rho_y w t}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} \right) = q w^2 \frac{\rho_x \rho_y}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} x dx$$

نهایتاً اختلاف دما بین سطح خارجی و مرکز برابرست با:

$$\theta = \int_0^{t/2} qw^2 \frac{\rho_x \rho_y}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} x dx = qw^2 \frac{\rho_x \rho_y}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} \int_0^{t/2} x dx$$

و در نتیجه:

$$\theta = q \frac{w^2 t^2}{8} \frac{\rho_x \rho_y}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} \quad (18-2)$$

با جایگذاری حرارت تولیدی کل ($Q = q w l t$) در رابطه فوق، نهایتاً داریم:

$$\theta = \frac{Q}{8l} w t \frac{\rho_x \rho_y}{\rho_x t^2 + \rho_y w^2} \quad (19-2)$$

۲-۴-۴- مقاومت مخصوص حرارتی سیم پیچی

w_a : ضخامت مس در راستای aa

$R_{\theta_{ac}}$: مقاومت حرارتی مس در راستای aa

t_a : ضخامت مس در راستای bb

$R_{\theta_{ai}}$: مقاومت حرارتی عایق در راستای aa

ρ_c : مقاومت مخصوص حرارتی مس

R_{θ_a} : مقاومت حرارتی کل در راستای aa

ρ_i : مقاومت مخصوص حرارتی عایق

مس و عایق در جریان حرارتی متوالی اند.

$$R_{\theta_a} = R_{\theta_{ac}} + R_{\theta_{ai}} \quad (20-2)$$

$$R_{\theta_a} = \frac{\rho_y w}{t l} \quad , \quad R_{\theta_{ac}} = \frac{\rho_c w_a}{t l} \quad , \quad R_{\theta_{ai}} = \frac{\rho_i (w - w_a)}{t l}$$

$$\Rightarrow \rho_y w = \rho_c w_a + \rho_i (w - w_a) \rightarrow \rho_y = \rho_c a + \rho_i (1 - a) \left. \vphantom{\rho_y w} \right\}$$

$$\xrightarrow{P_c \ll \rho_i} \rho_y = \rho_i (1 - a), \quad a = \frac{w_a}{w}$$

به طریق مشابه :

$$\rho_x = \rho_i (1 - b)$$

$$b = \frac{t_a}{t} \quad \text{که در آن :}$$

اگر $a = b$ که فرض قابل قبولی است.

$$\rho_x = \rho_y = \rho_i (1 - a) \quad (21-2)$$

در نتیجه:

$$\rho_e = \rho_i (1 - a) \quad (22-2)$$

a : طول مس در هر متر ضخامت سیم پیچی

ρ_e : مقاومت مخصوص حرارتی مؤثر سیم پیچی (مس به علاوه عایق)

$$S_f = \frac{\text{سطح مس}}{\text{سطح سیم پیچی}} = \frac{a \times a}{1 \times 1} = a^2 \rightarrow a = \sqrt{S_f}$$

$$\Rightarrow \rho_e = \rho_i \left(1 - \sqrt{S_f} \right)$$

مثال ۲-۶- پیچکی به ابعاد $10 \times 5 \text{ cm}$ طول متوسط حلقه های آن 100 cm است. درجه حرارت نقطه گرم را نسبت به درجه حرارت خارج پیچک حساب کنید زمانیکه تلفات کل 120 W ، ضریب فضا 0.56 و مقاومت مخصوص حرارتی مواد عایق آن $8 \Omega \text{m}$ باشد.

$$\rho_e = \rho_i (1 - \sqrt{S_f}) = 8(1 - \sqrt{0.56}) = 2 \Omega m$$

$$\text{حجم پیچک} = 10 \times 5 \times 100 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$q = \frac{120}{5} \times 10^3 = 24 \times 10^3 \text{ W/m}^3$$

تلفات بر واحد حجم

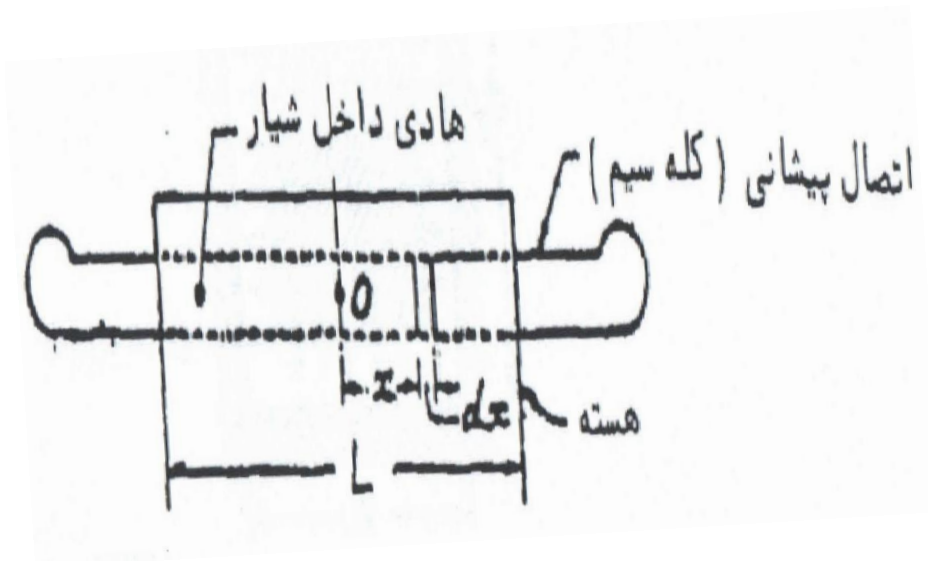
$$\theta = \frac{q \rho t^2}{8} = \frac{24 \times 10^3 \times 2 \times 0.05^2}{8} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

۲-۴-۵- گرادیان درجه حرارت در هادی‌های واقع در شیارها

بررسی مسئله برای دو حالت:

الف- ضخامت عایق شیار زیاد ← انتقال حرارت در طول هادی به طرف اتصالات پیشانی

هدف: یافتن اختلاف دما بین نقطه O و اتصال پیشانی



شکل ۲-۵- انتقال حرارت در هادی درون شیار

I_z : جریان هادی به A

a_z : سطح مقطع هادی mm^2

ρ_c : مقاومت مخصوص حرارتی هادی

δ : چگالی جریان هادی A/mm^2

ρ : مقاومت مخصوص الکتریکی هادی $\Omega mm^2/m$

حرارت تولیدی: $Q_x = I_z^2 \frac{\rho_x}{a_z}$

مقاومت حرارتی نوار: $d R_\theta = \frac{\rho_c dx}{a_z} \times 10^6$ (a_z به mm^2)

$$d\theta = I_z^2 \frac{\rho_x}{a_z} \frac{\rho_c dx}{a_z} \times 10^6 = \rho \times 10^6 \frac{I_z^2}{a_z^2} \rho_c dx$$

$$\theta = \int_0^{L/2} \rho \times 10^6 \frac{I_z^2}{a_z^2} \rho_c x dx = \rho \frac{I_z^2}{a_z^2} \rho_c \frac{L^2}{8} \times 10^6 = \rho \delta^2 \rho_c \frac{L^2}{8} \times 10^6 \text{ } ^\circ C$$

(۲۳-۲)

ب- اتصال پیشانی گرم و انتقال حرارت از طریق شیار

شکل ۲-۶ در نظر گرفته شود که در آن:

t : ضخامت عایق به m

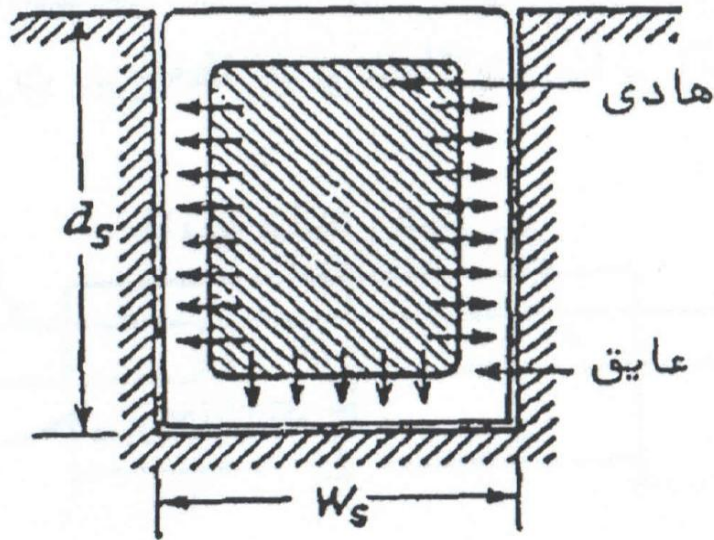
L : طول هادی داخل شیار

a_z : سطح مقطع هادی mm^2

ρ_i : مقاومت مخصوص حرارتی عایق

ρ : مقاومت مخصوص الکتریکی هادی $\Omega mm^2/m$

I_z : جریان هادی به A



شکل ۲-۶- شیار آرمیچر

حرارت تولیدی در هادی : $Q = I_z^2 \frac{\rho L}{a_z}$

سطح مربوط به جریان حرارتی : $L(2d_s + w_s)$

مقاومت حرارتی عایق : $R_\theta = \frac{\rho_i t}{L(2d_s + w_s)}$

$$\theta = I_z^2 \frac{\rho L}{a_z} \frac{\rho_i t}{L(2d_s + w_s)} = I_z^2 \frac{\rho}{a_z} \frac{\rho_i t}{2d_s + w_s} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \theta = \delta^2 a_z \rho \frac{\rho_i t}{2d_s + w_s} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (24-2)$$

مثال ۲-۷- یک مولد سنکرون 6600 V دارای شیارهای باز بود و در هر شیار 4 هادی جای دارد سطح مقطع هر هادی 0.6 × 0.8 cm و جریان 200 A است. ضخامت عایق بین هادی‌ها و دیواره‌های شیار 3 mm و مقاومت مخصوص حرارتی آن 3 Ωm است. طول شیار که هادی در آن جای دارد 30 cm است. با فرض انتقال حرارت فقط از طریق بدنه، اختلاف درجه حرارت بین هادی و دیواره‌های شیار را برای دو حالت زیر محاسبه کنید:

- ۱- پیچک‌ها محکم درون شیار قرار گرفته‌اند.
- ۲- فاصله هوایی بین پیچک و دیواره‌های شیار 0.5 mm است. (مقاومت حرارتی هوا 20 است)

مقاومت مخصوص مس $0.021 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ است.

$$\text{عمق هادی} = 6 \text{ mm}$$

$$\text{عرض هادی} = 8 \text{ mm}$$

$$\text{تلفات کل مس در هر شیار} = 4 \times 200^2 \times \frac{0.021 \times 0.3}{6 \times 8} = 21 \text{ W}$$

سطح نشان دهنده مسیر جریان حرارتی در مرکز ضخامت عایق:

$$S = 30[2((4 \times 0.6) + 0.15) + 0.8 + 0.3] = 186 \text{ cm}^2 = 186 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{ضخامت عایق: } t = 3 \text{ mm} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\theta = Q \frac{\rho t}{S} = 21 \frac{3 \times 3 \times 10^{-3}}{186 \times 10^{-4}} = 10.15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

محاسبه سطح مقطع مسیر جریان حرارتی براساس ابعاد خارجی پیچک و عایق:

$$S = 30[2((4 \times 0.6) + 0.3) + 0.8 + 0.3 + 0.3] = 204 \text{ cm}^2 = 204 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{ضخامت فاصله هوایی} = 0.5 \text{ mm} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{اختلاف درجه حرارت در عرض فاصله هوایی} = 21 \times \frac{20 \times 0.5 \times 10^{-3}}{204 \times 10^{-4}} = 10.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

عایق و فاصله هوایی در مسیر جریان به صورت سری قرار دارند، پس:

$$\text{اختلاف درجه حرارت بین هادی و شیار} = 10.15 + 10.3 = 20.45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

حتی یک فاصله هوایی کوچک افزایش جدی در درجه حرارت هادی را باعث می شود.

۲-۵-تهویه ماشین های الکتریکی

- ✓ افزایش درجه حرارت به عنوان عامل تعیین کننده ابعاد ماشین
- ✓ خنک شدن به روش طبیعی در ماشین های با توان کوچک
- ✓ خنک سازی ماشینها با جریان هوا در اغلب موارد (تهویه)
- ✓ خنک سازی با استفاده از هیدروژن یا آب در ماشینهای پرسرعت

۲-۶- روشهای مختلف تهویه

- ۱- ماشین با تهویه طبیعی : خنک سازی با جریان طبیعی هوا
- ۲- ماشین با تهویه داخلی (خودی) : وزش هوا به سطوح داخلی توسط بادبزن که از اجزاء ماشین است .
- ۳- ماشین با تهویه خارجی (خودی) : وزش هوا به سطوح خارجی توسط بادبزن که از اجزاء ماشین است .
- ۴- ماشین با تهویه جداگانه : خنک سازی به وسیله مایع یا گاز خنک کننده که توسط وسیله خارجی مانند بادبزن یا پمپ به گردش در می آید .

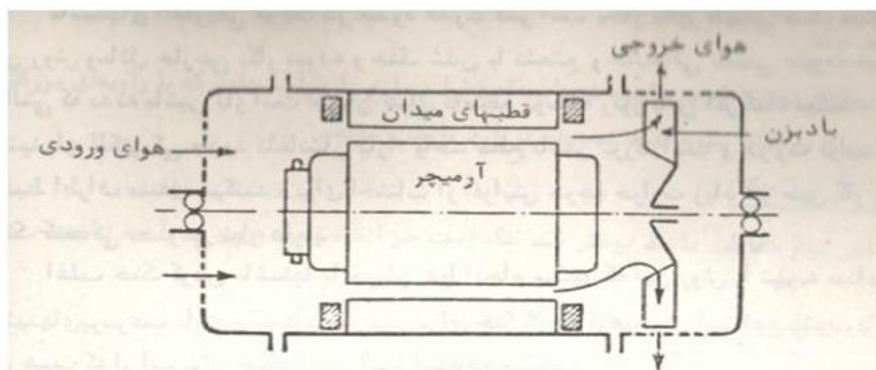
۲-۷- تهویه واکنشی و کنشی

دسته بندی دیگری برای تهویه، تهویه واکنشی و تهویه کنشی است که در ادامه معرفی می شوند.

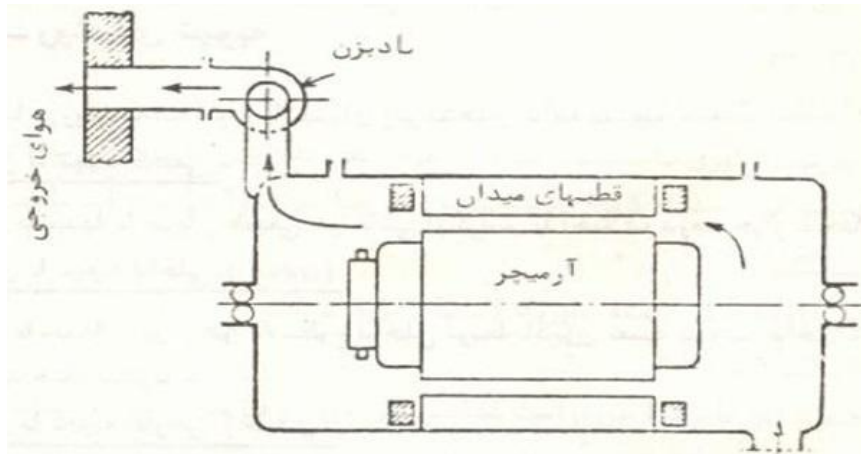
تهویه واکنشی :

- ✓ هوای خنک به داخل ماشین بدلیل افت فشار داخلی بخاطر وجود بادبزن مکش می شود.
- ✓ هوای گرم شده به محیط توسط بادبزن رانده می شود.

این نوع تهویه در شکل های ۲-۷ و ۲-۸ نمایش داده شده است.

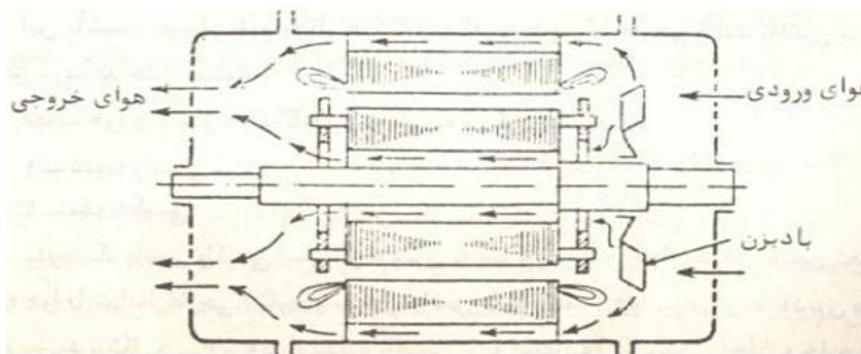


شکل ۲-۷- تهویه واکنشی با بادبزن داخلی

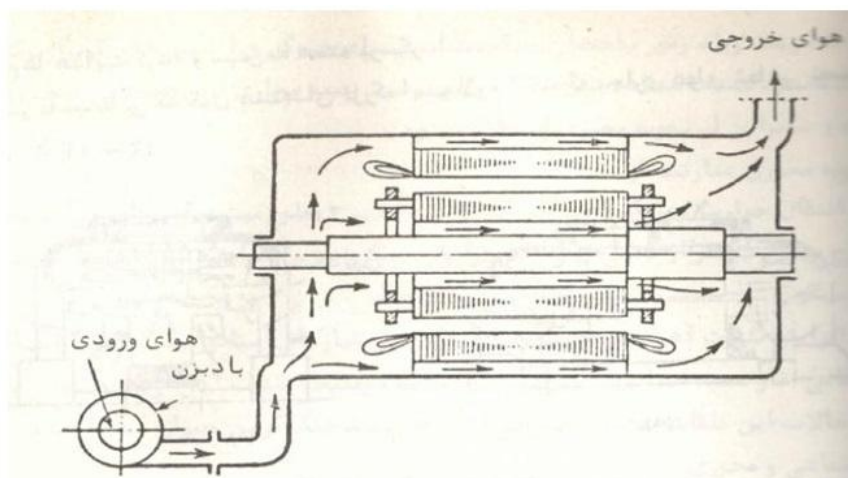


شکل ۸-۲- تهویه واکنشی با بادبزن خارجی

تهویه کنشی : هوا از محیط توسط بادبزن مکش می شود و سپس به داخل ماشین و از آنجا به خارج فرستاده می شود . انواع مختلف این نوع تهویه در شکل های ۲-۹ و ۲-۱۰ نمایش داده شده است .



شکل ۲-۹- تهویه کنشی با بادبزن داخلی



شکل ۲-۱۰- تهویه کنشی با بادبزن خارجی

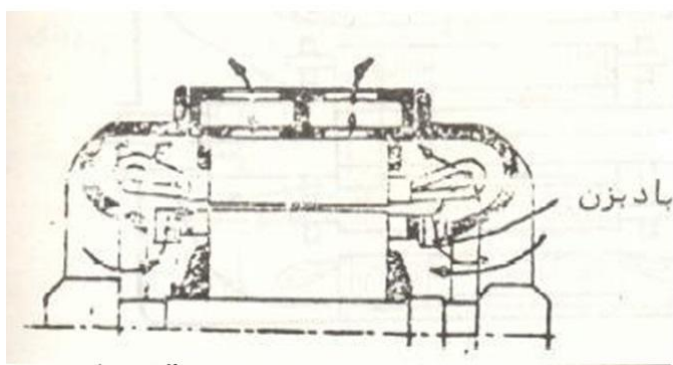
به خاطر تلفات بادبزن در تهویه کنشی درجه حرارت هوای سرد بالامی‌رود. در نتیجه، حجم هوای بیشتری برای خنک سازی در این روش مورد نیاز است.

۲-۸- جهت جریان هوا

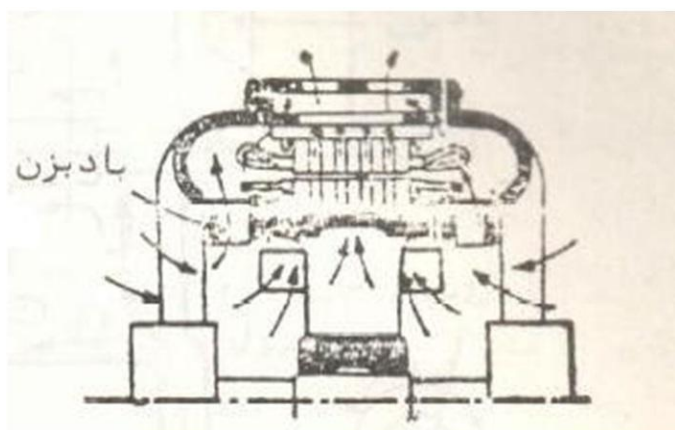
روشهای تهویه: شعاعی، محوری، ترکیب شعاعی و محوری

الف- تهویه شعاعی:

به خاطر سهولت چرخش هوا به علت نیروی گریز از مرکز ناشی از حرکت رتور، معمولی ترین روش تهویه است که در شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲-۱۱- تهویه شعاعی



شکل ۲-۱۲- تهویه شعاعی با تعبیه مجاری شعاعی

✓ در مورد شکل ۲-۱۲، هسته به تکه‌هایی با ضخامت $4-8$ cm با مجاری هوا بین آنها به عرض $1-0.8$ cm تقسیم می‌شود.

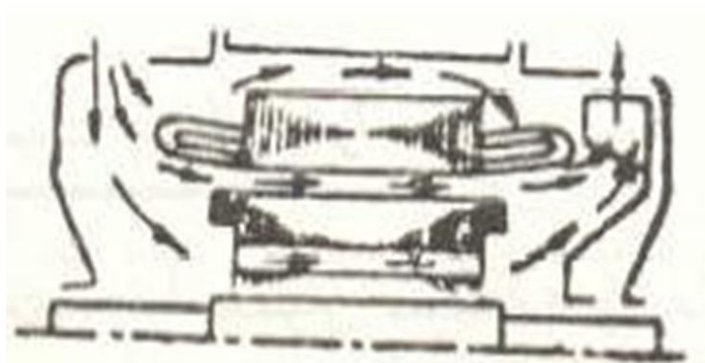
مزایای تهویه شعاعی :

- ✓ حداقل انرژی برای تهویه تلف می‌گردد.
- ✓ افزایش درجه حرارت در جهت محوری یکنواخت است.
- ✓ برای جلوگیری از تنشهای گریز از مرکز در سرعت های زیاد از قاب محدودکننده استفاده می‌شود و این مسئله در ساخت مجاری تهویه شعاعی محدودیت ایجاد می‌کند.

ب- تهویه محوری :

در ماشینهای با قدرت خروجی متوسط و سرعت زیاد کاربرد دارد و در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است.

- ✓ تهویه محوری ساده : تعبیه مجاری تهویه فقط در رتور
- ✓ تهویه محوری دوگانه : تعبیه مجاری تهویه فقط در استاتور و رتور



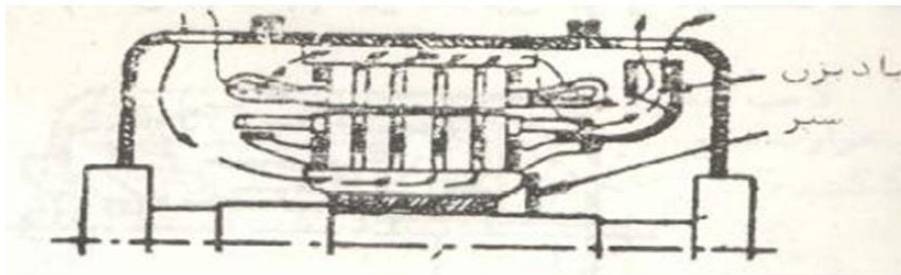
شکل ۱۳-۲- تهویه محوری

معایب تهویه محوری :

- ۱- توزیع غیریکنواخت انتقال حرارت (کمتر بودن درجه حرارت در محل ورود هوا)
- ۲- کاهش مقدار آهن زیر شیار استاتور به خاطر تعبیه مجاری تهویه ← افزایش چگالی شار و بیشتر شدن تلفات آهن در این ناحیه ← افزایش درجه حرارت ماشین

ج- تهویه شعاعی - محوری :

برای بهره‌مند شدن از مزایای هردو روش فوق، تهویه شعاعی-محوری مطابق شکل ۱۴-۲ مطرح می‌شود.



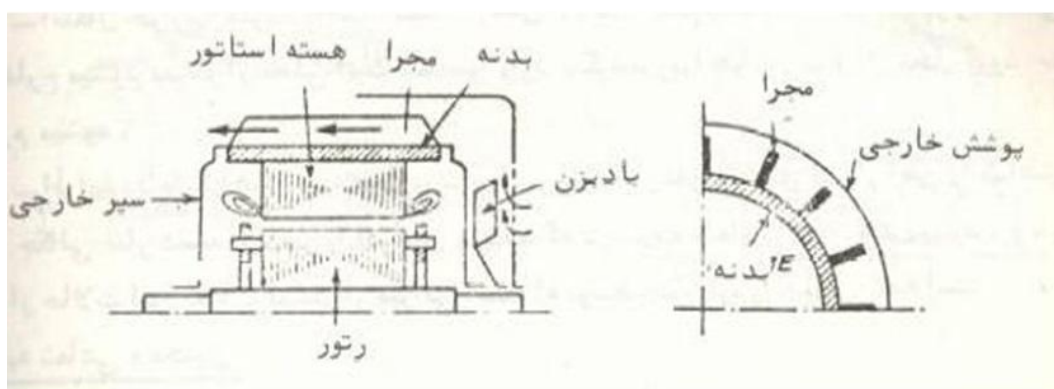
شکل ۱۴-۲- تهویه شعاعی-محوری

۹-۲- خنک کردن ماشینهای کاملاً بسته

- ✓ به دلیل وجود ناخالصی های مضر مانند گازهای انفجاری و بخارات اسیدی از ماشینهای کاملاً بسته استفاده می‌شود.
- ✓ به دلیل قطع جریان هوا بین داخل و خارج ماشین انتقال حرارت تماماً از سطح خارجی بدنه صورت می‌گیرد.

۱- ماشین با تهویه از بدنه

- ✓ وزش باد روی سطح بدنه ماشین حاوی مجاری هوا مطابق شکل ۱۵-۲



شکل ۱۵-۲- تهویه ماشین کاملاً بسته از طریق بدنه

✓ در ماشین های بزرگ برای گردش داخلی هوا علاوه بر وزش باد روی بدنه بادبزن هم تعبیه می شود .

۲- ماشین با رادیاتور

✓ هوای گرم شده با نصب یک رادیاتور روی بدنه سرد می شود.

۲-۱۰- مدار خنک کردن :

▪ مدار تهویه باز

▪ مدار تهویه بسته

✓ برای ماشین در نوع تهویه باز، هوای گرم شده نهایتاً خارج می شود.

✓ به خاطر گرفتن گرد و غبار و رطوبت هوا از صافی های مناسب عبور داده می شود

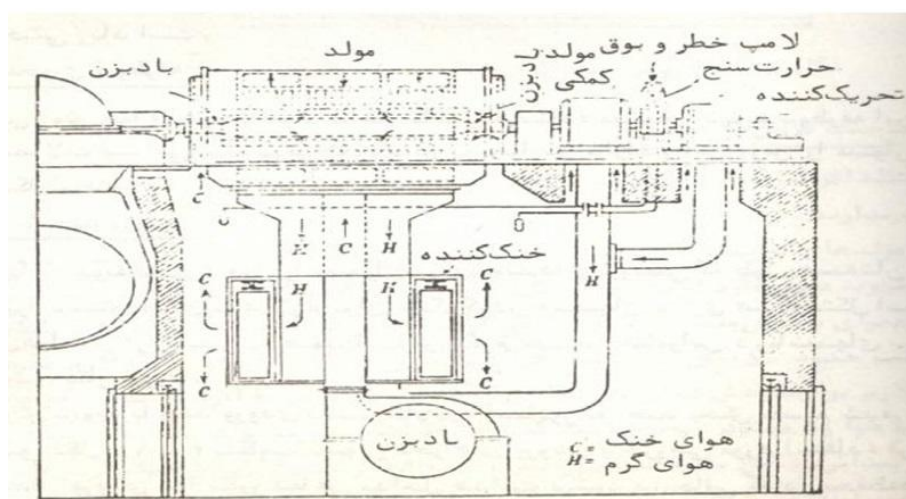
← تمیز کردن مرتب صافی ها

افزایش قدرت بادبزن در حضور صافی ها

← استفاده از تهویه باز در ماشین های بزرگ پر هزینه است (نیاز به چند تن هوای خنک در

ساعت) ← مناسب بودن استفاده از تهویه مدار بسته

✓ هوای گرم خروجی توسط خنک کننده های آبی خنک می شود و دوباره آن به داخل ماشین ارسال می شود.



شکل ۲-۱۶- مدار خنک کننده برای ماشین با رادیاتور

۱۱-۲- خنک کردن مولدهای توربینی

✓ این ماشین ها در مقایسه با مولدهای توربین آبی، به خاطر سرعت زیادشان دارای طول هسته زیاد و قطر کم هستند ← مسئله خنک کردن آنها پیچیده است.

۱-۱۱-۲- خنک کردن با هوا

✓ در ماشینهای کوچک کاربرد دارد.

✓ در توربین های گازی بعنوان واحد اضطراری نیروگاه با قدرتهای $17/5 \text{ MW}$ ، 25 MW و 35 MW استفاده می شود.

روش های مختلف :

۱- تهویه محوری یک طرفه : در ماشین های با قدرت خروجی کم تا 3 MW کاربرد دارد.

۲- تهویه محوری دوطرفه

✓ هوا از هر دو طرف دمیده می شود.

✓ اتصالات پیشانی هم دما هستند.

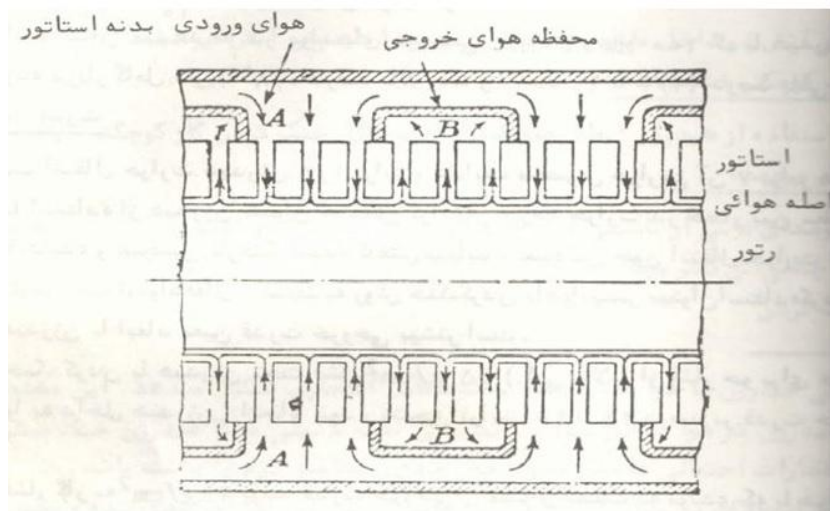
✓ تا قدرت 12 MW قابل استفاده است.

۳- تهویه با چند ورودی

✓ روش های تهویه محوری در مولدهای توربینی با طول هسته زیاد (برای قسمت های مرکزی) کارایی ندارد.

✓ هوا بطور شعاعی به سمت داخل از طریق محفظه های ورودی هدایت می شود و خروج آن از طریق محفظه های خروجی صورت می گیرد.

✓ هوای گرم به خنک کن ارسال می شود و دوباره تحت فشار به داخل استاتور فرستاده می شود.



شکل ۲-۱۷- خنک کردن با هوا

۲-۱۱-۲- خنک کردن با هیدروژن

- ✓ روش خنک سازی با هوا هنگام افزایش قدرت مولدها کارایی ندارد (بالاتر از ۵۰ MW)
- ✓ برای تامین ۱۵۰ تن هوا در ساعت برای خنک سازی یک ماشین ۶۰ MW با تلفات ۱۰۰۰ KW به بادبزی با قدرت ۱۰۰ KW نیاز است.

نکات مهم :

- مقدار زیاد هوای خنک کننده
- توان بالای بادبزن
- ✓ هیدروژن به عنوان جایگزین مناسب در مولدهای با قدرت بالا برای خنک سازی :
 - افزایش بازده
 - افزایش قدرت
 - افزایش عمر
 - رفع خطر آتش سوزی
 - ابعاد کوچک خنک کننده
 - کاهش سروصدا

۱- افزایش بازده

- ✓ چگالی هیدروژن ۰/۰۷ برابر چگالی هوا است.
- ✓ کاهش تلفات مربوط به تهویه (قسمت اعظم تلفات کل در ماشین پرسرعت) ← افزایش بازده
- ✓ افزایش ۰/۸% بازده برای مولد MW ۱۰۰ در بار کامل

۲- افزایش قدرت

- ✓ ضریب انتقال حرارت هیدروژن ۱/۵ برابر هوا
- ✓ هدایت مخصوص حرارتی هیدروژن ۷ برابر هوا
- ← انتقال حرارت بهتر
- ← استفاده موثرتر از مواد بکاررفته و افزایش قدرت خروجی

۱- افزایش عمر

- ✓ نفوذ هیدروژن درون حفره های عایق و ازدیاد استقامت الکتریکی عایق (هدایت مخصوص حرارتی هیدروژن ۷ برابر هوا و نزدیک عایق) ← افزایش عمر ماشین
- ✓ وجود اکسیژن و ازت درون هوا به عنوان سیال خنک کننده ← آسیب رساندن به عایق سیم پیچی فشار قوی به علت تخلیه کرونا (شکل گرفتن اوزن و اسید نیتریک)

۲- رفع خطر آتش سوزی

- ✓ غیر قابل اشتعال بودن هیدروژن

۵- ابعاد کوچک خنک کننده

۶- کاهش سروصدا

- ✓ چرخش رتور در محیط با چگالی کمتر

روش خنک کردن :

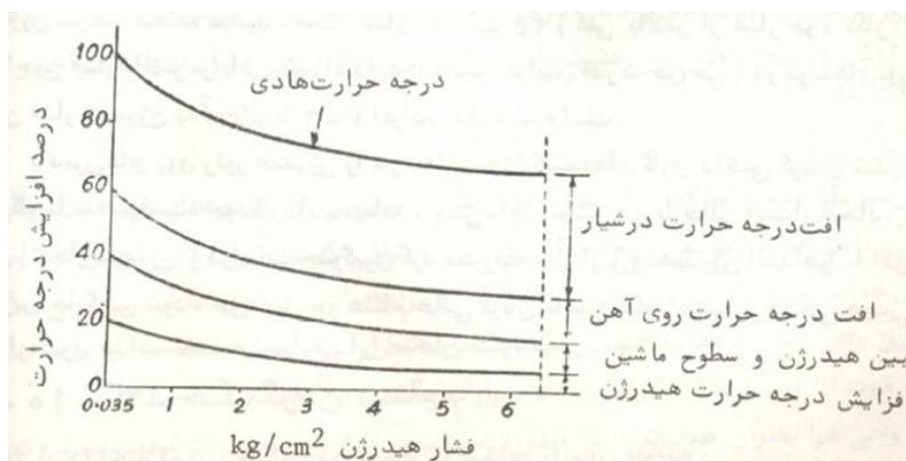
- ✓ قابل اشتعال بودن مخلوط هیدروژن و هوا ← لزوم جلوگیری از نشت گاز در تمام اتصالات مدار خنک کننده
- ✓ کاهش احتمال وقوع انفجار با قراردادن فشار هیدروژن بالاتر از فشار جو ← تخلیه سریع هیدروژن با وقوع نشتی
- ✓ بگردش درآوردن هیدروژن در مجاری خنک کننده های داخلی با استفاده از بادبزنهای نصب شده روی رتور

۳-۱۱-۲- خنک کردن مستقیم

انتقال حرارت ناشی از تلفات آرمیچر و سیم پیچی میدان به ماده خنک کننده در اطراف عایق سیم پیچی (خنک کردن مستقیم)

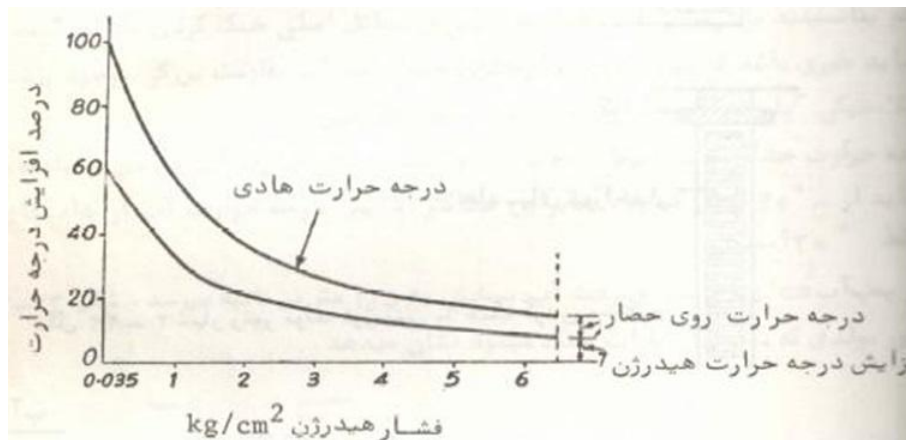
دلایل پذیرفتن خنک کردن مستقیم :

- ✓ حرارت رتور بعنوان یک محدودیت جدی در مورد خروجی مولد خنک شونده بطور طبیعی
- ✓ افت قابل ملاحظه درجه حرارت بین هادی های سیم پیچی و ماده خنک شونده در روش معمولی
- ✓ بیشتر نشدن قدرت نامی از یک حدی با افزایش فشار هیدروژن در روش خنک کردن معمولی



شکل ۲-۱۸- نمایش افت درجه حرارت روی بخش های مختلف در روش معمولی

✓ حذف گرادیان درجه حرارت روی عایق شیار، دندانها و حصار در خنک کردن مستقیم بدلیل ارتباط مستقیم ماده خنک کننده با هادی

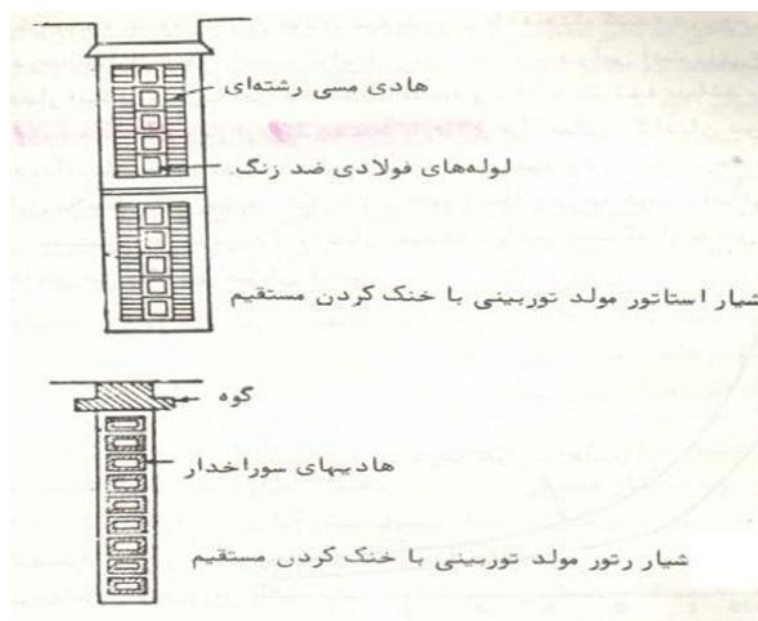


شکل ۲-۱۹- افت درجه حرارت روی بخش های مختلف در روش مستقیم

مواد خنک کننده : هیدروژن ، آب و روغن

۱- هیدروژن :

- ✓ پمپ شدن هیدروژن از طرفی به طرف دیگر هادی با سوراخ کردن آن
- ✓ امکان ساخت ماشین تا 300 MW با خنک کردن مستقیم با هیدروژن



شکل ۲-۲۰- ساختار هندسی شیار مولد توربینی در روش خنک کردن مستقیم

۲- آب

✓ دلایل جایگزینی آب بجای هیدروژن :

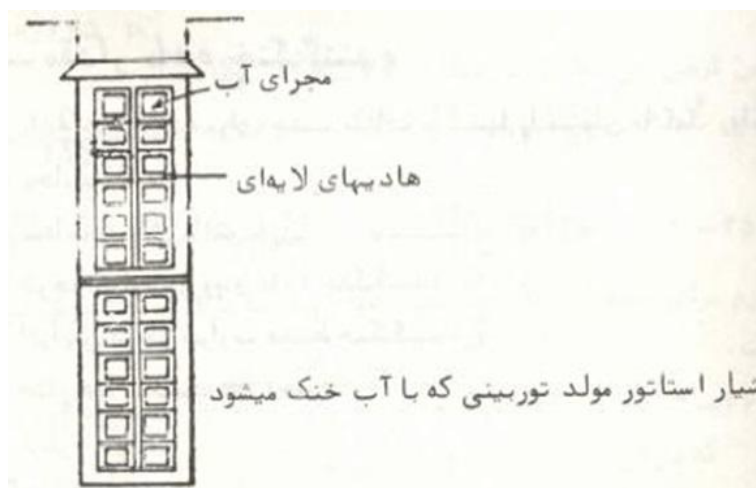
- برای هادی ها جهت عبور گاز با افزایش قدرت نامی مولد، به فضای بیشتری نیاز است.
- برای بگردش درآوردن هیدروژن از هادی های خیلی بلند به فشار ابتدایی بالا نیاز است.
- آب بدلیل ظرفیت انتقال حرارت بهتر و ویسکوزیته خیلی کوچک مناسب است.

✓ امکان ساخت مولدی با قدرت ۶۰۰ MW با روش خنک کردن آبی

روش خنک کردن :

- ✓ خنک سازی سیم پیچی رتور با هیدروژن در مولدهایی که استاتورشان با آب خنک می شود.
- ✓ بستگی مقاومت مخصوص حرارتی آب به درجه خلوص ← فراهم کردن تاسیساتی برای تهیه آب مقطر

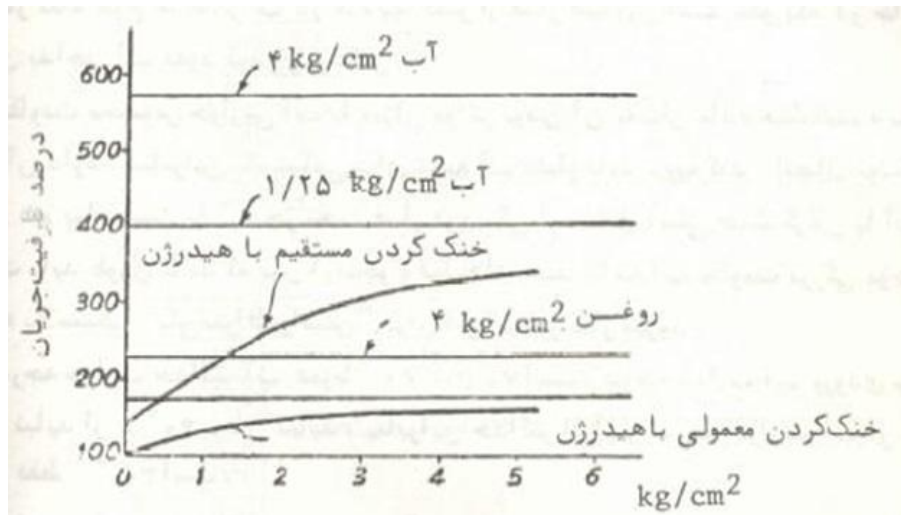
- درجه حرارت آب $60-70^{\circ}\text{C}$ در خروجی
- درجه حرارت آب ورودی کمتر از 40°C
- سرعت آب کمتر از $1/5\text{ m/s}$



شکل ۲-۲۱- هندسه شیارها در خنک سازی مستقیم با آب

۳- روغن

- ✓ استفاده از روغن مرغوب ترانسفورماتور بعنوان ماده خنک کننده موثر در آمریکا برای خنک کردن هادی های استاتور
- ✓ ترجیح دادن آب بجای روغن در انگلستان برای خنک سازی بدلیل قابل اشتعال بودن روغن



شکل ۲-۲۲- مقایسه روش ها و سیالات خنک کننده مختلف

۲-۱۲- مقدار ماده خنک کننده

Q : تلفات انتقال یافته به kW

θ_i : درجه حرارت ورودی سیال خنک کننده °C

θ : افزایش درجه حرارت سیال خنک کننده °C

H : فشار هوا به mm جیوه

۲-۱۲-۱- هوا

افزایش درجه حرارت سیال × حرارت مخصوص سیال × وزن سیال = حرارت انتقالی

حرارت مخصوص هوا : c_p (J/kg °C)

$$Q \text{ (kW)} = Q \times 10^3 \text{ (J/Sec)}$$

$$\text{حرارت مخصوص } (J/kg \text{ } ^\circ C) \times (\text{وزن هوا به } kg/Sec) = \text{حرارت بر ثانیه}$$

$$\times (\text{افزایش درجه حرارت به } ^\circ C)$$

$$\Rightarrow \text{وزن هوا} = \frac{Q \times 10^3}{c_p \theta} \text{ kg/Sec}$$

فرض کنید حجم یک کیلوگرم هوا در شرایط متعارفی (760 mmHg , $0^\circ C$) برابر V باشد، پس:

$$\text{حجم هوای لازم در شرایط متعارفی} = \frac{Q \times 10^3}{c_p \theta} V$$

حجم هوای لازم در شرایط واقعی با استفاده از قانون کلوین $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$ قابل محاسبه است.

$$V_a = \frac{Q}{c_p \theta} V \frac{\theta_i + 273}{273} \times \frac{760}{H} \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{Sec)} \quad (26-2)$$

$$c_p = 0.2375 \text{ cal/gr}^\circ C = 0.2375 \times 4.18 \text{ J/gr}^\circ C$$

$$= 0.2375 \times 4.18 \times 10^3 \text{ J/kg}^\circ C = 995 \text{ J/kg}^\circ C$$

$$V = 0.775 \text{ m}^3 \text{ : حجم یک کیلوگرم هوا}$$

$$\Rightarrow V_a = \frac{Q}{995 \theta} \times 0.775 \times \frac{\theta_i + 273}{273} \times \frac{760}{H} \text{ m}^3/\text{Sec}$$

$$\Rightarrow V_a = 0.78 \times \frac{Q}{\theta} \times \frac{\theta_i + 273}{273} \times \frac{760}{H} \text{ m}^3/\text{Sec} \quad (27-2)$$

قدرت دمیدن V_a متر مکعب هوا در ثانیه با فشار P نیوتن بر متر مربع برابر $P V_a$ می باشد.

$$P_f = \frac{P V_a}{\eta_f} \times 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (28-2)$$

η_f : بازده بادبزن

۲-۱۲-۲- هیدروژن

$$c_p = 3.4 \text{ cal/gr. } ^\circ\text{C} \text{ برای هیدروژن}$$

$$\rho = 11.3 \text{ kg/m}^3 \text{ (در شرایط متعارفی)}$$

به طریق مشابه:

$$V_H = 0.8 \frac{Q \theta_i + 273}{\theta} \times \frac{760}{H} \text{ m}^3/\text{Sec} \quad (29-2)$$

۲-۱۲-۳- آب

$$c_p = 4.18 \times 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

حجم آب لازم در ثانیه برای Q (kW) تلفات با درجه حرارت θ °C:

$$V_w = \frac{1000 Q}{4.18 \times 1000 \theta} \text{ kg/s} = \frac{0.24 Q}{\theta} \text{ lit/Sec} \quad (30-2)$$

۲-۱۲-۴- روغن

$$V_o = \frac{0.24 Q}{(0.35 - 0.5) \theta} \text{ lit/Sec} \quad (31-2)$$

۲-۱۳- منحنی افزایش درجه حرارت بر حسب زمان

۲-۱۳-۱- گرم شدن

$$Q dt = \text{انرژی حرارتی تولیدی جسم در زمان } dt$$

Q : تلفات توان یا حرارت تولیدی به وات

$$G h d\theta = \text{انرژی حرارتی ذخیره شده در جسم وقتی درجه حرارت آن } d\theta \text{ افزایش می یابد.}$$

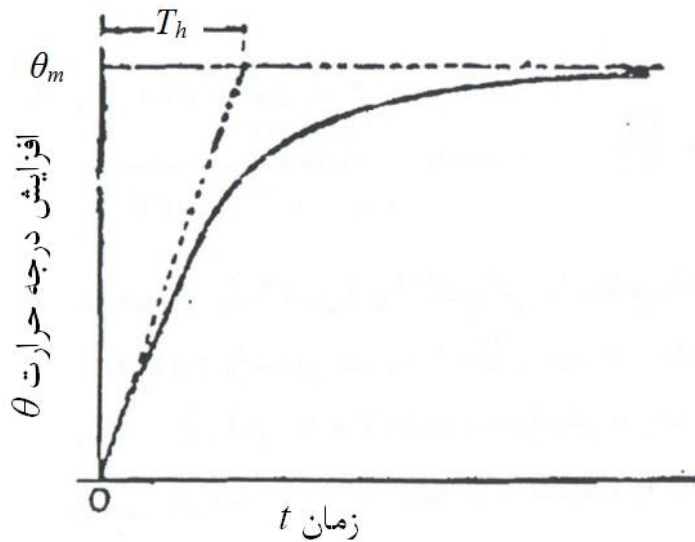
G : وزن جسم به kg

h : حرارت مخصوص $J/kg^{\circ}C$

$$\lambda S \theta dt = \text{انرژی حرارتی انتقالی به محیط}$$

θ : افزایش درجه حرارت در زمان t

λ : حرارت مخصوص انتقالی $W/m^2^{\circ}C$



شکل ۲-۷- منحنی گرم شدن

حرارت انتقال یافته + حرارت ذخیره شده = حرارت تولیدی

$$Q dt = G h d\theta + S \lambda \theta dt \quad (*)$$

$$\Rightarrow dt = \frac{d\theta}{\frac{Q}{Gh} - \frac{S\lambda\theta}{Gh}} \quad (32-2)$$

با حل معادله دیفرانسیل:

$$t = -\frac{Gh}{S\lambda} \ln\left(\frac{Q}{Gh} - \frac{S\lambda}{Gh} \theta\right) + K \quad (33-2)$$

$$t = 0 \quad \rightarrow \quad \theta = \theta_i \quad \text{K : ثابت}$$

θ_i : افزایش درجه حرارت ابتدایی نسبت به محیط

$$\Rightarrow 0 = -\frac{Gh}{S\lambda} \ln\left(\frac{Q}{Gh} - \frac{S\lambda}{Gh} \theta_i\right) + K$$

با جایگذاری K در (33-2) داریم:

$$t = -\frac{Gh}{S\lambda} \ln \frac{\frac{Q}{S\lambda} - \theta}{\frac{Q}{S\lambda} - \theta_i} \quad (34-2)$$

$$t = \infty \Rightarrow \theta = \theta_m, \quad d\theta = 0$$

$$\stackrel{(*)}{\rightarrow} Q dt = S \lambda \theta_m dt \quad \rightarrow \quad \theta_m = \frac{Q}{S \lambda}$$

با جایگذاری $\theta_m = \frac{Q}{S \lambda}$ در (34-2) داریم:

$$t = -\frac{Gh}{S\lambda} \ln \frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_i} \quad (35-2)$$

$T_h = \frac{G h}{S \lambda}$: ثابت گرم شدن

$$t = -T_h \ln \frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_i} \quad (36-2)$$

$$\Rightarrow \frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_i} = e^{-\frac{t}{T_h}} \Rightarrow \theta = \theta_m \left(1 - e^{-t/T_h}\right) + \theta_i e^{-t/T_h} \quad (37-2)$$

اگر $\theta_i = 0$ (ماشین از حالت سرد راه بیافتد) :

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-t/T_h}\right) \quad (38-2)$$

$$T_h = \frac{G h}{S \lambda}$$

$$T_h \propto \frac{1}{\lambda}$$

تهویه خوب (λ بزرگتر) \leftarrow کوچکتر بودن T_h

حجم ماشین و در نتیجه وزن با توان ۳ و سطح با توان ۲ ابعاد \Leftarrow افزایش T_h با توان یک بعد

\Leftarrow برای ماشین بزرگتر T_h بزرگتر

T_h برای ماشین‌های معمولی 0.5-4 ساعت است.

۲-۱۳-۲- خنک شدن

$$Q dt = G h d\theta + S \lambda \theta dt \Rightarrow t = -\frac{G h}{S \lambda} \ln \left[\frac{Q}{G h} - \frac{S \lambda}{G h} \theta \right] + K$$

$$\xrightarrow{t=0 \rightarrow \theta=\theta_i} 0 = -\frac{G h}{S \lambda} \ln \left[\frac{Q}{G h} - \frac{S \lambda}{G h} \theta_i \right] + K$$

$$\Rightarrow K = \frac{G h}{S \lambda} \ln\left(\frac{Q}{G h} - \frac{S \lambda}{G h} \theta_i\right)$$

روند اثبات مشابه آن برای (۳۷-۲) است و در نهایت داریم:

$$\Rightarrow \theta = \theta_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}}\right) + \theta_i e^{-t/T_c} \quad (۳۹-۲)$$

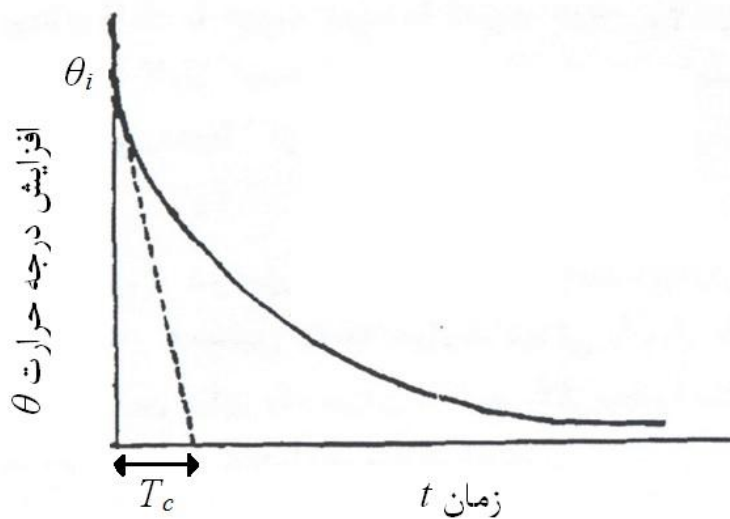
که در آن θ_n (دمای نهایی) و T_c (ثابت زمانی خنک شدن) برابرند با:

$$\theta_n = \frac{Q}{S \lambda} \quad (۴۰-۲)$$

$$T_c = \frac{G h}{S \lambda}$$

در صورت ساکن بودن ماشین $\theta_n = 0 \Leftarrow Q = 0$

$$\theta = \theta_i e^{-t/T_c} \quad (۴۱-۲)$$



شکل ۲-۸- منحنی خنک شدن

مثال ۲-۸- افزایش درجه حرارت نهایی یک ترانسفورماتور در بار کامل 75°C و ثابت زمانی گرم و سرد شدن سه ساعت است. تلفات مس در بار کامل دو برابر تلفات آهن است. افزایش درجه حرارت ترانسفورماتور را در انتهای دوره‌های کار زیر حساب کنید. ترانس از حالت سرد راه می‌افتد.

بار کامل دو ساعت

بی بار یک ساعت

20% اضافه بار یک ساعت

افزایش درجه حرارت نهایی متناسب با تلفات کل است $\Rightarrow \theta_m = \frac{Q}{S\lambda}$

افزایش درجه حرارت در بار کامل \times $\frac{\text{تلفات در حالت بی باری}}{\text{تلفات در حالت بار کامل}}$: $\theta_n =$ افزایش درجه حرارت نهایی در بی باری

$$= \frac{1}{2+1} \times 75^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$$

ضریب یک در صورت کسر به خاطر آن است که در حالت بی باری فقط تلفات آهن (هسته) داریم. لازم به ذکر است که در بار کامل که هر دو تلفات آهن و مسی (اهمی) را داریم و تلفات مسی دو برابر تلفات آهن است.

$$\text{افزایش درجه حرارت نهایی در } 20\% \text{ اضافه بار} = \frac{2(1.2)^2+1}{2+1} \times 75^{\circ} = 97^{\circ}\text{C}$$

بار کامل برای مدت دو ساعت:

$$\theta_m = 75^{\circ}\text{C} \quad \theta_i = 0^{\circ}\text{C} \quad t = 2 \quad T_h = 3$$

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-t/T_h}\right) = 75 \times \left(1 - e^{-2/3}\right) = 36.5^{\circ}\text{C}$$

یک ساعت بی باری:

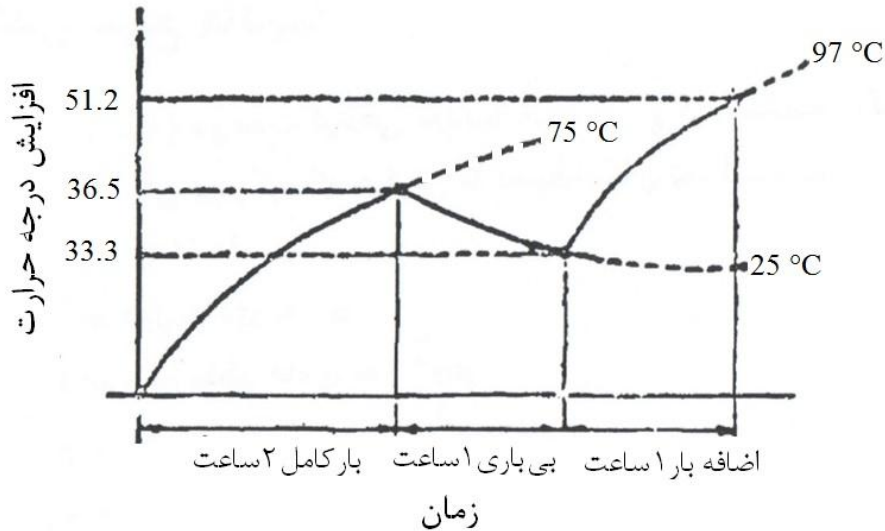
$$\theta_i = 36.5^{\circ}\text{C} \quad , \quad \theta_n = 25^{\circ}\text{C} \quad t = 1 \quad , \quad T_c = 3$$

$$\theta = \theta_n \left(1 - e^{-t/T_c}\right) + \theta_i e^{-t/T_c} = 25 \left(1 - e^{-1/3}\right) + 36.5 e^{-1/3} = 33.3^{\circ}\text{C}$$

اضافه بار یک ساعتی:

$$\theta_m = 97^\circ\text{C} \quad , \quad \theta_i = 33.3^\circ\text{C} \quad t = 1 \quad , \quad T_h = 3$$

$$\theta = \theta_m(1 - e^{-t/T_h}) + \theta_i e^{-t/T_h} = 97(1 - e^{-\frac{1}{3}}) + 33.3e^{-\frac{1}{3}} = 51.2^\circ\text{C}$$



شکل ۲-۹- منحنی تغییرات دما

۲-۱۴- افزایش درجه حرارت در شرایط کار کوتاه مدت

زمان کارکرد به قدری کوتاه است که افزایش درجه حرارت ماشین به مقدار پایدار نرسیده و زمان استراحت یا بی باری به اندازه‌ای است که ماشین به حالت سرد خود برمی‌گردد.

$$\theta_{sh} = \theta_{msh} \left(1 - e^{-\frac{t_{sh}}{T_h}} \right)$$

T_h : ثابت گرم شدن

t_{sh} : زمان کار کوتاه مدت ماشین

θ_{msh} : حداکثر افزایش درجه حرارت مجاز با کار کوتاه مدت

θ_{sh} : افزایش درجه حرارت در زمان $t = t_{sh}$

θ_{sh} نباید از θ_m (درجه حرارت نهایی برای کار مداوم) تجاوز کند.

مثال ۲-۹- در آزمایش درجه حرارت ترانسفورماتور 100 KVA در بار کامل حرارت ثبت شده پس از یک ساعت 60°C پس از دو ساعت 72°C است. زمانی که ترانسفورماتور می تواند به طور مطمئنی تا 200 KVA بار دهد حساب کند. درجه حرارت محیط 40°C و تلفات مس بار کامل دو برابر تلفات آهن است.

$$60 - 40 = 20^{\circ}\text{C} = \text{افزایش درجه حرارت پس از یک ساعت}$$

$$72 - 40 = 32^{\circ}\text{C} = \text{افزایش درجه حرارت پس از دو ساعت}$$

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-t/T_h}\right) \rightarrow 20 = \theta_m \left(1 - e^{-1/T_h}\right)$$

$$32 = \theta_m \left(1 - e^{-2/T_h}\right)$$

$$\Rightarrow \theta_m = 50^{\circ}\text{C} , \quad T_h = 1.92 \text{ ساعت}$$

کار کوتاه مدت:

قدرت نامی ترانسفورماتور در کار کوتاه مدت دو برابر کار دائم است. در نتیجه تلفات مس بار کامل کار کوتاه مدت 4 برابر کار دائم است. اگر θ_{msh} حداکثر افزایش درجه حرارت کار کوتاه مدت باشد:

$$\theta_m = \frac{Q}{S \lambda}$$

$$\frac{\theta_{msh}}{\theta_m} = \frac{\text{تلفات کار کوتاه مدت}}{\text{تلفات با کار مداوم}} = \frac{4w_c + w_i}{w_c + w_i}$$

$$\xrightarrow{w_c=2w_i \text{ (دربار کامل)}} \frac{\theta_{msh}}{\theta_m} = \frac{9 w_i}{3 w_i} = 3 \Rightarrow \theta_{msh} = 3 \theta_m = 3 \times 50 = 150^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_m = \theta_{msh} \left(1 - e^{-\frac{t_{sh}}{1.92}}\right) \xrightarrow{\theta_m=50} t_{sh} = 0.78 \text{ ساعت}$$

۲-۱۵- افزایش درجه حرارت در کار نوبه‌ای

ماشین از حالت سرد راه می افتد:

$$\theta = \theta_m (1 - e^{-\frac{t}{T_h}}) \quad T_h: \text{ ثابت زمان گرم شدن}$$

θ_m : افزایش نهایی درجه حرارت در حالت گرم شدن

در زمان توقف ماشین خنک می شود:

$$\theta = \theta_n (1 - e^{-\frac{t}{T_c}}) + \theta_i e^{-t/T_c}$$

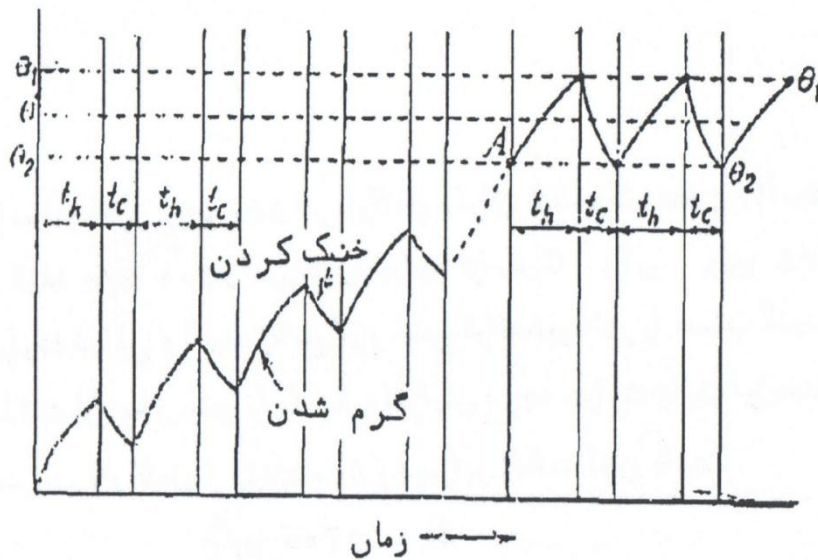
T_c : ثابت زمانی سرد شدن

θ_n : افزایش نهایی درجه حرارت وقتی ماشین به طور نامعین خنک شود.

θ_i : افزایش نهایی درجه حرارت ابتدایی نسبت به محیط

t_n : زمان گرم شدن

t_c : زمان سرد شدن



شکل ۲-۱۰- افزایش درجه حرارت برای کار نوبه ای

یکنواخت شدن کار ماشین پس از مدتی

⇐ تغییر دما بین دو حد θ_1 و θ_2 (افزایش درجه حرارت در حالت گرم شدن معادل افت درجه حرارت سرد شدن) از (۲-۳۶) داریم:

$$\theta_2 \text{ و } \theta_1 \text{ بین شدن گرم شدن: } t_h = -T_h \ln \frac{\theta_m - \theta_1}{\theta_m - \theta_2}$$

برای زمان خنک شدن:

$$t_c = -T_c \ln \frac{\theta_2 - \theta_n}{\theta_1 - \theta_n}$$

در حالت کوچک بودن t_h و t_c در مقایسه با ثابت زمانی‌های گرم شدن و خنک شدن.

← شیب منحنی‌های افزایش و کاهش یکنواخت.

$$\theta' = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \text{ : افزایش متوسط درجه حرارت}$$

$$\theta' \text{ در } \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_m - \theta'}{T_h} \text{ : شیب منحنی گرم شدن در } \theta'$$

اختلاف درجه حرارت در زمان t_h :

$$\theta_1 - \theta_2 = t_h \frac{d\theta}{dt} = t_h \frac{\theta_m - \theta'}{T_h} \quad (۴۲-۲)$$

به طریق مشابه در حالت خنک شدن برای زمان t_c :

$$\theta_1 - \theta_2 = t_c \frac{d\theta}{dt} = t_c \frac{\theta' - \theta_n}{T_c} \quad (۴۳-۲)$$

از دو معادله اخیر داریم:

$$t_h \frac{\theta_m - \theta'}{T_h} = t_c \frac{\theta' - \theta_n}{T_c} \Rightarrow \theta' = \frac{\theta_m \frac{t_h}{T_h} + \theta_n \frac{t_c}{T_c}}{\frac{t_h}{T_h} + \frac{t_c}{T_c}}$$

۲-۱۶- اندازه گیری افزایش درجه حرارت

روش های اندازه گیری دما:

۱- روش حرارت سنج :

اندازه گیری دما با نصب حرارت سنج (ترموکوپل) روی سطوح ماشین

۲- روش مقاومتی

اندازه گیری دما به وسیله مشاهده تغییرات مقاومت سیم پیچی

مقاومت در T_0



$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{\alpha \theta_2 + 1}{\alpha \theta_1 + 1} = \frac{1/\alpha + \theta_2}{1/\alpha + \theta_1} = \frac{256 + \theta_2}{256 + \theta_1}$$

$\alpha = 0.0039 / ^\circ\text{C}$: برای مس

۳- روش حرارت سنج توکار

اندازه گیری دما توسط ترموکوپل کار گذاشته درون ماشین در حین پروسه ساخت ماشین

فصل سوم:

مدارهای مغناطیسی

۳-۱- روابط اصلی

ϕ : شار مغناطیسی به وبر (Wb)

A : سطح مقطع مسیر شار به متر مربع (m^2)

l : طول مسیر شار به متر (m)

B : چگالی شار مغناطیسی به وبر بر مترمربع یا تسلا (T و Wb/m^2)

H : شدت میدان مغناطیسی به آمپر دور بر متر (At/m)

$\mu = \mu_r \mu_0$: ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی ماده به هانری بر متر (H/m)

μ_0 : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوا (خلاء) برابر با $4\pi \times 10^{-7} H/m$

R : مقاومت مغناطیسی یا رلوکتانس به آمپر دور بر وبر (At/Wb)

Λ : هدایت مغناطیسی به وبر به آمپر دور (Wb/At)

مشابه قانون اهم در یک مدار مغناطیسی داریم:

نیروی محرکه مغناطیسی



$$F = Ni = R\phi$$

$$\Rightarrow \varphi = \frac{AT}{R} = AT \times \Lambda \quad (1-3)$$

$$\text{رلوکتانس: } R = \frac{\ell}{\mu A} \quad (2-3)$$

$$H = at = \text{شار} \times \text{مقاومت مغناطیسی بر واحد طول} = \frac{1}{\mu A} \times \varphi = \frac{B}{\mu}$$

↑
نیروی محرکه مغناطیسی بر واحد طول

$$(3-3)$$

$$AT = H\ell = (at)\ell \quad (4-3)$$

در مدارهای سری:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (5-3)$$

$$AT = R\varphi = R_1\varphi + R_2\varphi + R_3\varphi + \dots = AT_1 + AT_2 + AT_3 + \dots$$

$$= at_1\ell_1 + at_2\ell_2 + at_3\ell_3 + \dots \quad (6-3)$$

برای مدار موازی:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

$$\rightarrow \frac{\varphi}{AT} = \frac{\varphi_1}{AT} + \frac{\varphi_2}{AT} + \frac{\varphi_3}{AT} + \dots \rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

$$\Rightarrow \Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \dots \quad (7-3)$$

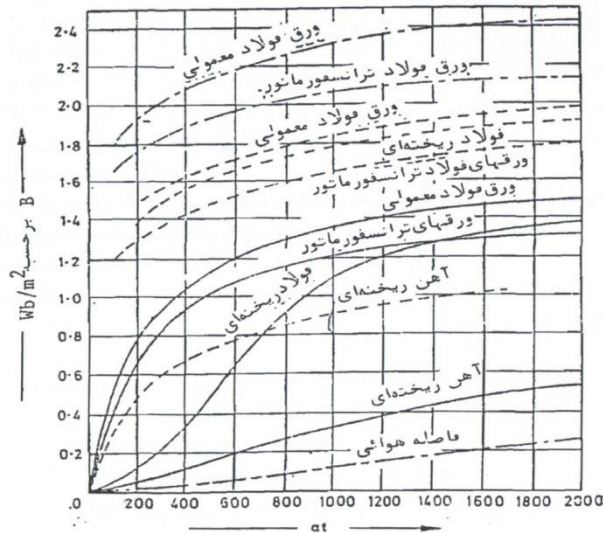
۳-۲- منحنی مغناطیس شونده

اختلاف‌های مدار الکتریکی و مغناطیسی:

۱- جریان الکتریکی عبور الکترون هاست در حالی که شار عبور چیزی نیست.

۲- مقاومت الکتریکی بستگی به جریان ندارد ولی رلوکتانس وابسته به شار است.

- ✓ امکان توصیف منحنی مغناطیس شوندگی براساس تئوری حوزه های مغناطیسی
 - ✓ متفاوت بودن منحنی‌ها برای مواد فرومغناطیسی مختلف به کار رفته در ماشین‌های الکتریکی
- (شکل ۱-۳)



شکل ۱-۳- منحنی های B-at

۳-۳- پراکندگی شار

غیرممکن بودن متمرکز کردن تمام شار به مسیرهای مفید \Leftarrow وجود شار پراکندگی

محاسبه مشکل شار پراکندگی به خاطر پیچیدگی مسیرهای پراکندگی از نظر هندسی

شار پراکندگی مدار خود را از مسیرهایی می بندد که برای استفاده در کار ماشین بی فایده است.

فاصله هوایی در ساختار ماشین وجود دارد. طول فاصله هوایی حداقل و سطح مقطع آن حداکثر انتخاب

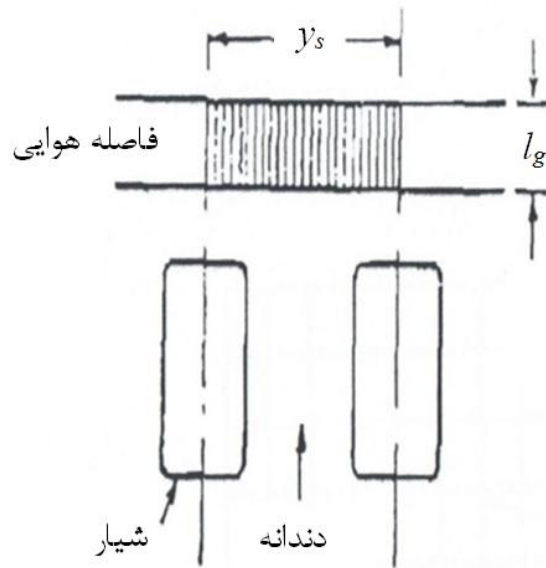
می شود تا رلوکتانس آن کم شود. \Leftarrow کاهش میزان شار پراکندگی

$$\text{ضریب پراکندگی} = \frac{\text{شار کل}}{\text{شار مفید}} = \frac{\text{شار پراکندگی} + \text{شار مفید}}{\text{شار مفید}} \quad (۸-۳)$$

۳-۴- محاسبه نیروی محرکه مغناطیس کل

با فرض توزیع شار به طور یکنواخت روی گام شیار برای ماشین با آرمیچر صاف (شیار بسته) مطابق شکل ۲-۳ داریم:

$$R_g = \frac{\ell}{\mu_0 A} = \frac{\ell_g}{\mu_0 L y_S} \quad (۹-۳)$$

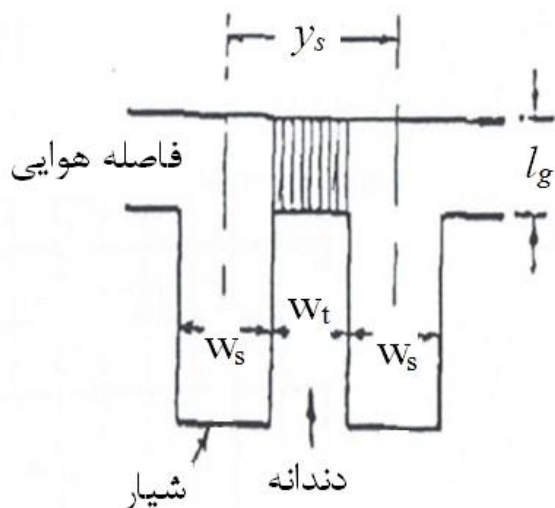


شکل ۲-۳- توزیع یکنواخت شار

برای ماشین قطب برجسته وقتی مطابق شکل ۳-۳ شار به صورت ایده‌آل فقط روی سطح دندان متمرکز شود داریم:

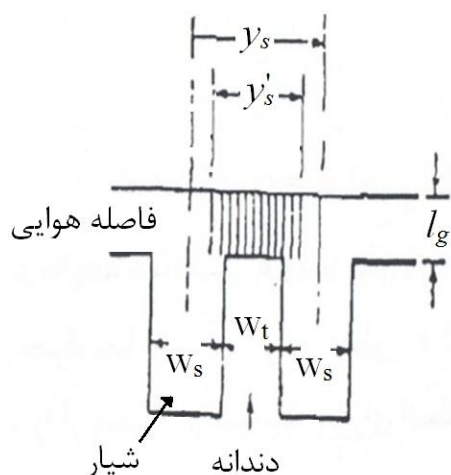
$$y'_S = y_S - w_s = w_t \quad (۱۰-۳)$$

$$R_g = \frac{\ell_g}{\mu_0 L y'_S} = \frac{\ell_g}{\mu_0 L (y_S - w_s)} \quad (۱۱-۳)$$

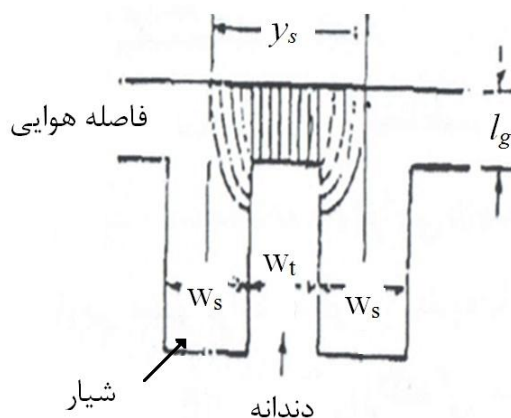


شکل ۳-۳ - توزیع شار روی دندانه

این در حالیکه که توزیع واقعی شار در ماشین قطب برجسته مطابق شکل ۳-۴ می باشد. برای مدل کردن خمیدگی شار در گوشه ها، شکل ۳-۵ پیشنهاد می شود.



شکل ۳-۵ - مدل کردن توزیع شار



شکل ۳-۴ - توزیع واقعی شار دندانه شامل پراکندگی شار در اطراف لبه دندانه ها

با توجه به شکل ۳-۵ داریم:

$$y'_S = w_t + \delta w_s = w_t + w_s + \delta w_s - w_s = y_s - (1 - \delta)w_s$$

$$\Rightarrow y'_S = y_s - K_{cs}w_s \quad (۱۲-۳)$$

که در آن K_{cs} ضریب کارتر می باشد. بنابراین، برای آرمیچر شیاردار رلوکتانس فاصله هوایی به صورت زیر مدل می شود:

$$R_g = \frac{\ell_g}{\mu_o L y'_S} = \frac{\ell_g}{\mu_o L (y_S - K_{cs} w_s)} \quad (۱۳-۳)$$

$$K_{cs} = \frac{1}{1 + 5 \frac{\ell_g}{w_s}} \quad (۱۴-۳)$$

فرمول تجربی برای محاسبه ضریب کارتر

همانطور که (۱۴-۳) نشان می دهد ضریب کارتر بستگی به $\frac{\text{عرض شیار}}{\text{طول فاصله هوایی}}$ دارد. هرچه این نسبت بیشتر باشد، ضریب مزبور بزرگتر است.

ضریب انقباض مربوط به شیار نسبت رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر شیاردار به رلوکتانس آرمیچر شیار بسته تعریف می شود و بنابراین از روابط (۹-۳) و (۱۳-۳) به صورت زیر محاسبه می شود.

$$K_{gs} = \frac{y_S}{y_S - K_{cs} w_s} \quad (۱۵-۳)$$

ضریب انقباض برای شیار

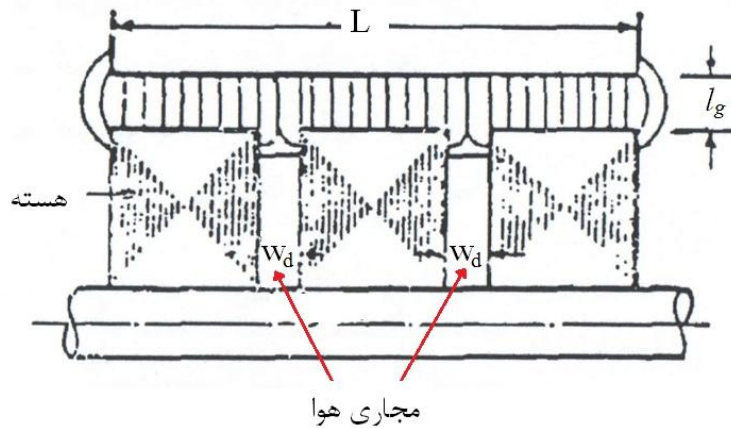
به خاطر وجود مجاری تهویه شعاعی، طول مؤثر ماشین (L) مطابق شکل ۳-۶ کاهش می یابد و این موضوع بایستی در محاسبه رلوکتانسها مدنظر قرار گیرد. مشابه آنچه در محاسبه گام مؤثر شیار در (۳-۱۲) اتفاق افتاد، طول مؤثر می تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$L' = L - K_{cd} n_d w_d \quad (۱۶-۳)$$

که در آن:

n_d : تعداد مجاری تهویه

K_{cd} : ضریب کارتر برای مجاری



شکل ۳-۶- اثر مجاری هوایی شعاعی

در اینجا نیز ضریب انقباض مربوط به مجاری تهویه مشابه آنچه در بالا برای شیار مطرح شد، نسبت رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر بدون مجاری هوا به رلوکتانس آرمیچر با مجاری تعریف می شود:

$$K_{gd} = \frac{L}{L - K_{cd} n_d w_d} \quad (۱۷-۳)$$

ضریب انقباض برای مجاری هوا

در نهایت، ضریب انقباض کل نسبت رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر صاف بدون مجاری تهویه به رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر شیاردار با مجاری تهویه تعریف می شود که در ادامه محاسبه آن ارائه شده است.

$$\text{رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر صاف بدون مجاری تهویه} = \frac{l_g}{\mu_0 L y_s}$$

$$\text{رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر شیاردار با مجاری تهویه} = \frac{l_g}{\mu_0 L' y'_s}$$

$$K_g = \frac{\text{رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر شیاردار با مجاری}}{\text{رلوکتانس فاصله هوایی آرمیچر صاف بدون مجاری}} = \frac{L y_s}{L' y'_s} \quad (۱۸-۳)$$

$$= \frac{y_s}{y_s - K_{cs} w_s} \times \frac{L}{L - K_{cd} n_d w_d}$$

$$= K_{gs} K_{gd} \quad (۱۹-۳)$$

نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای فاصله هوایی در آرمیچر شیاردار دارای مجاری تهویه K_g برابر آن در آرمیچر صاف بدون مجاری است. بنابراین، داریم:

$$AT_g = 800000 B \ell_g \quad (20-3)$$

برای آرمیچر صاف بدون مجاری هوا

$$AT_g = (800000 B \ell_g) \times K_g = 800000 B (K_g \ell_g) \quad (21-3)$$

برای آرمیچر شیاردار با مجاری

$$\Rightarrow \ell_{ge} = K_g \ell_g$$

طول مؤثر فاصله هوایی

اثر برجسته بودن قطب ها

طول فاصله هوایی غیریکنواخت \Leftarrow متفاوت بودن چگالی شار در یک گام قطب هر مقاومت نمایانگر یک لوله نیروست.

برای یافتن نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوایی کافی است رلوکتانس یک لوله و شار گذرنده از آن را محاسبه کنیم.

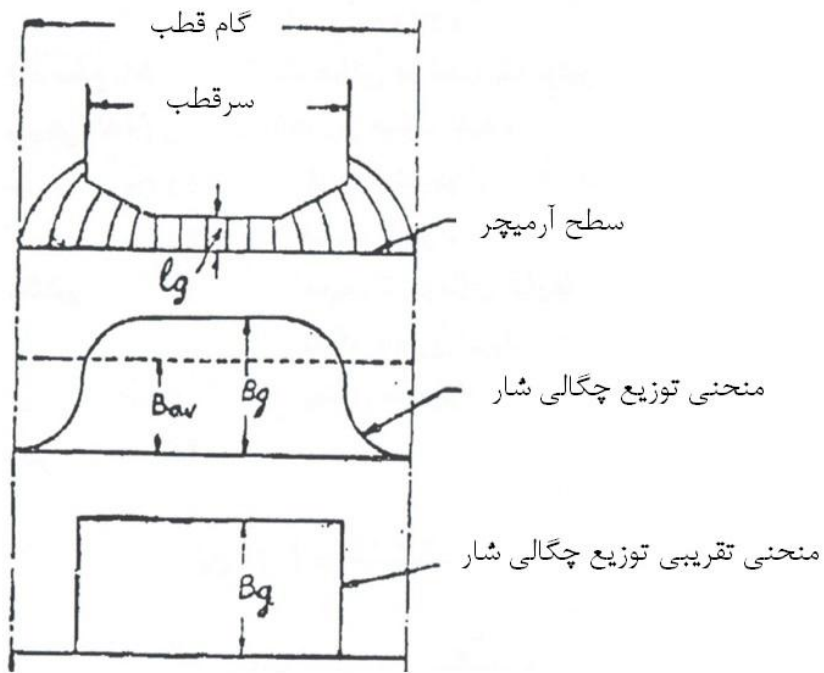
$$AT_g = \text{شار لوله} \times \text{رلوکتانس لوله}$$

$$\text{سطح مقطع لوله} \times B_g = \text{سطح مقطع لوله} \times \text{چگالی شار} = \text{شار لوله}$$

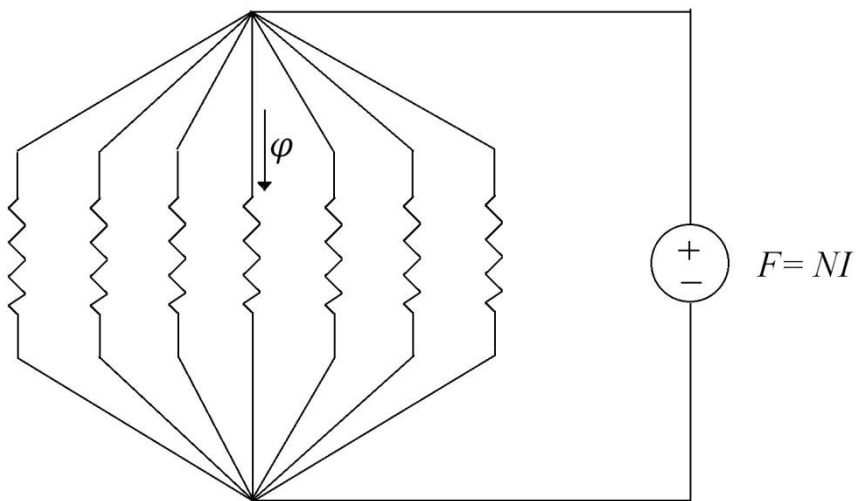
$$\text{رلوکتانس لوله در مرکز قطب} = \frac{\text{طول مؤثر فاصله هوایی در مرکز قطب}}{\mu_0 \times \text{سطح مقطع لوله در مرکز قطب}} = \frac{K_g \ell_g}{4 \pi \times 10^{-7} \times \text{سطح مقطع لوله}}$$

$$\Rightarrow AT_g = \frac{K_g \ell_g}{4 \pi \times 10^{-7} \times \text{سطح مقطع لوله}} \times B_g \times \text{سطح مقطع لوله} = 800000 B_g K_g \ell_g$$

(22-3)



شکل ۳-۷- منحنی توزیع شار برای ماشین قطب برجسته



شکل ۳-۸- مدار معادل مغناطیسی با در نظر گرفتن ۷ لوله شار در فاصله هوایی

$$K_f = \frac{\text{چگالی شار متوسط در گام قطب}}{\text{چگالی شار حداکثر در فاصله هوایی}} = \frac{B_{av}}{B_g} \quad (3-23)$$

$$L_i = K_i (L - n_d w_d) \quad \text{طول خالص آهن}$$

که در آن:

n_d : تعداد مجاری تهویه

w_d : ضخامت مجاری

$K_i \cong 0.9$: ضریب فضا برای آهن به خاطر عایق بندی ورقه‌ها از یکدیگر

۳-۵- نیروی محرکه مغناطیسی دندان

$$AT_t = at_m \times \ell_t \quad (3-24)$$

↓ ↓

ارتفاع دندان مقدار متوسط آمپردور

برای به دست آوردن متوسط at سه روش مطرح است:

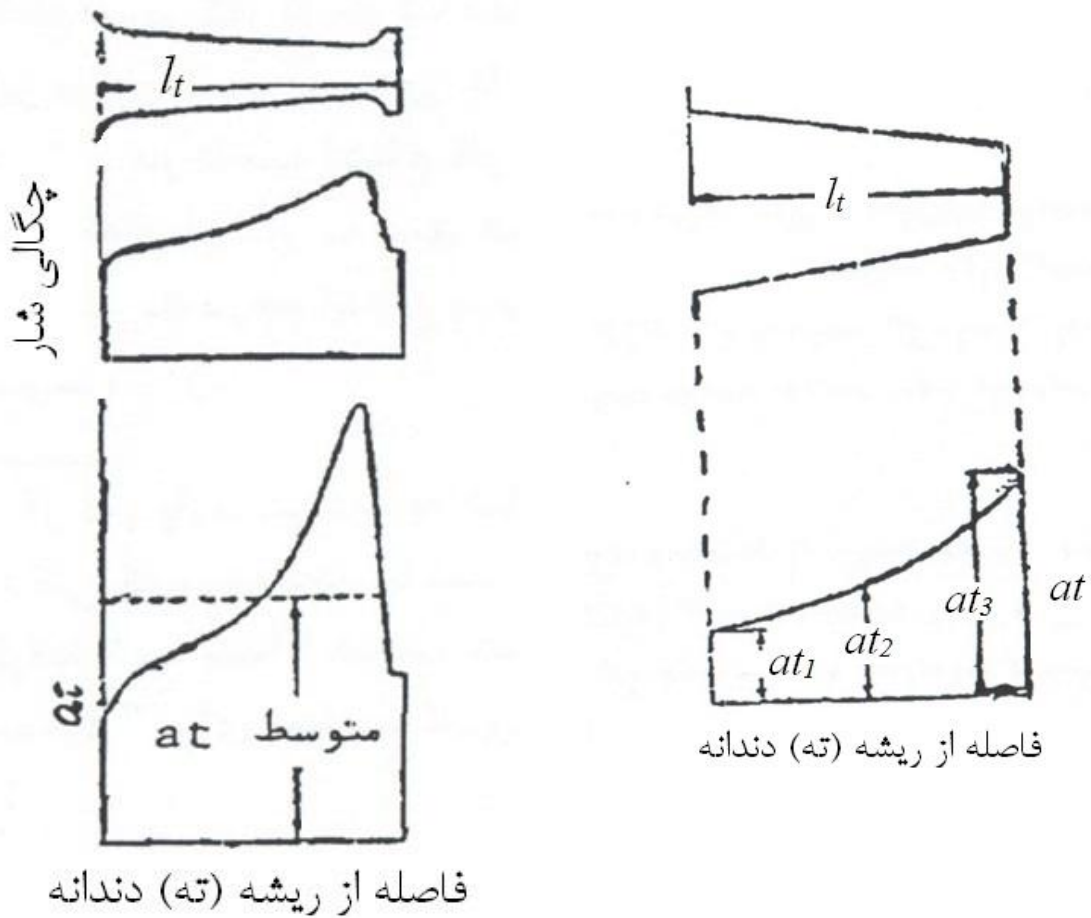
الف- روش ترسیمی

- ✓ تعیین چگالی شار برای چند بخش در طول دندان
- ✓ به دست آوردن مقادیر متناظر آمپردور at از منحنی $B - at$
- ✓ محاسبه مقدار متوسط آمپردور (at_m) از نمودار at

ب- روش سه‌عرضی

- ✓ کاربرد برای دندان‌های ساده با شیب کم
- ✓ با فرض سهمی بودن تغییرات at

$$at_m = \frac{at_1 + 4 at_2 + at_3}{6} \quad (3-25)$$



شکل ۳-۹- ساختار دندان به همراه توزیع آمپر دور و چگالی شار

ج- روش $Bt_1/3$

at_m به دست آمده برای چگالی شار در بخش $\frac{1}{3}$ ارتفاع از طرف باریک

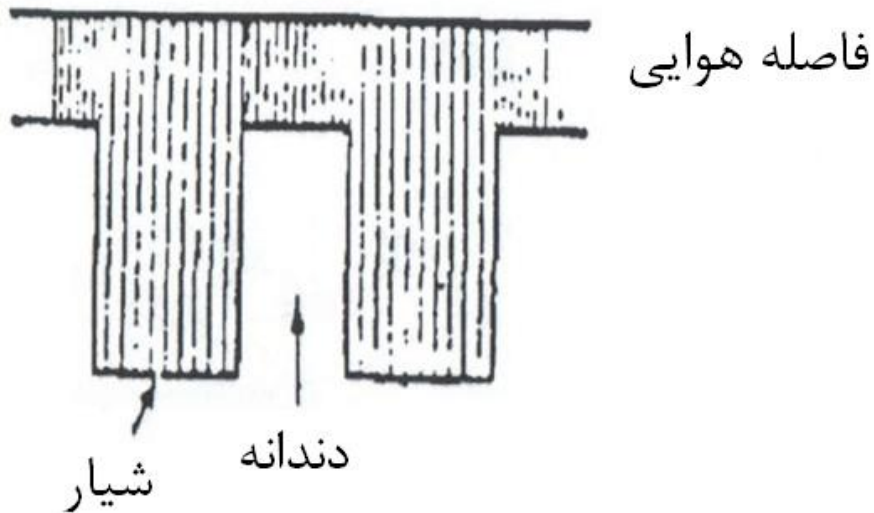
۳-۶- چگالی شار حقیقی و ظاهری

چگالی شار ظاهری:

$$B_{app} = \frac{\text{شار کل در گام شیار}}{\text{سطح دندان}}$$

چگالی شار حقیقی:

$$B_{\text{real}} = \frac{\text{شار حقیقی در دندان}}{\text{سطح دندان}}$$



شکل ۳-۱۰- شکل دندان و شیار

وجود دو مسیر موازی برای شار در یک گام شیار: ۱- مسیر آهنی ۲- مسیر هوایی

$$A_i = L_i W_t : \text{مساحت مسیر آهنی}$$

$$A_a = Ly_s - L_i W_t = \text{سطح مسیر آهنی} - \text{سطح کل} : \text{مساحت مسیر هوایی}$$

$$\varphi = \varphi_i + \varphi_a : \text{شار کل در یک گام شیار}$$

$$\varphi_i : \text{شار گذرنده از آهن در یک گام شیار}$$

$$\varphi_a : \text{شار گذرنده از هوا در یک گام شیار}$$

$$B_{\text{app}} = \frac{\text{شار کل در گام شیار}}{\text{سطح آهن}} = \frac{\varphi}{A_i} = \frac{\varphi_i}{A_i} + \frac{\varphi_a}{A_i} = B_{\text{real}} + \frac{\varphi_a}{A_a} \times \frac{A_a}{A_i}$$

$$\Rightarrow B_{\text{app}} = B_{\text{real}} + B_{\text{air}} \times K \quad (26-3)$$

از آنجائیکه $B_{air} = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \text{ at}$ داریم:

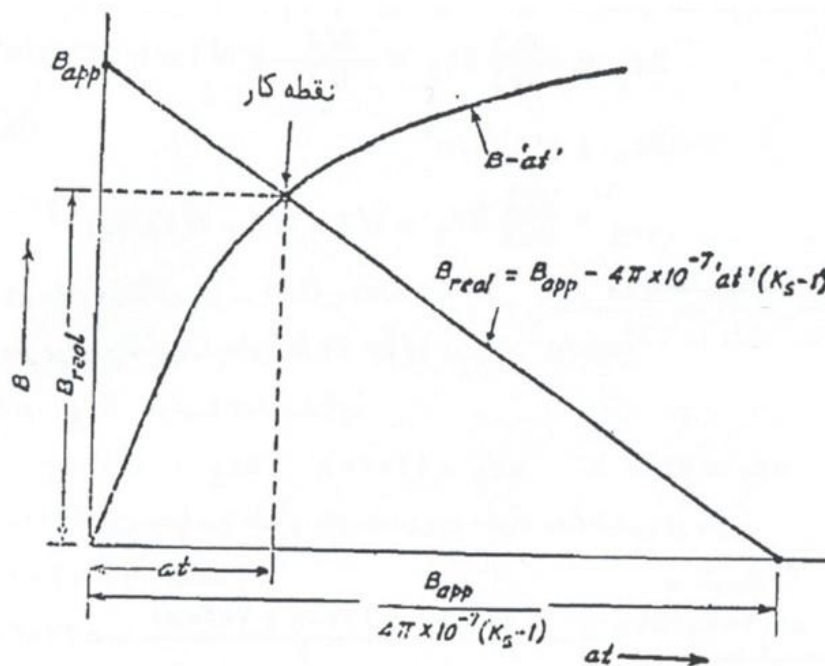
$$\Rightarrow B_{real} = B_{app} - (at)K \quad 4\pi \times 10^{-7} \quad (27-3)$$

با توجه به تعریف رابطه ضریب K در بالا، پارامتر دیگری (K_S) به صورت زیر تعریف و در (27-3) جایگزین می شود:

$$K = \frac{A_a}{A_i} = \frac{L y_s - L_i w_t}{L_i w_t} \rightarrow K_S = 1 + K = \frac{L y_s}{L_i w_t} = \frac{\text{سطح کل}}{\text{سطح دندان}} \quad (28-3)$$

$$\Rightarrow B_{real} = B_{app} - 4\pi \times 10^{-7} \text{ at} (K_S - 1) \quad (29-3)$$

برای یافتن دو مجهول B_{real} و at به منحنی $B - at$ مطابق شکل ۱۱-۳ نیاز داریم.



شکل ۱۱-۳- تعیین چگالی شار حقیقی

۳-۷- انواع تلفات آهن (هسته)

تلفات آهن (Iron loss) در مدار مغناطیسی زمانی ایجاد می‌شود که شار متغیر با زمان باشد.

تلفات آهن:

۱- تلفات پس ماند (هیستریزیس) Hysteresis

۲- تلفات جریان گردابی (فوکو) Eddy Current

۳-۷-۱- تلفات پس ماند

مغناطیس شدن دوره ای (متناوب) ماده فرومغناطیسی با تلفات انرژی همراه است.

سطح حلقه هیستریزیس = تلفات انرژی هیستریزیس به ژول بر مترمکعب

$$\sim B_m^n \quad 1.5 < n < 2.5 \quad \text{رابطه تجربی اشتینمتز (Steinmetz)}$$

که در آن B_m ماکزیمم چگالی شار است. با ملحوظ کردن زمان، تلفات توان به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$\Rightarrow \text{تلفات توان هیستریزیس: } P_h = K_h f B_m^n \quad (\text{W/m}^3) \quad (30-3)$$

که در آن K_h ثابت اشتینمتز و f فرکانس میدان مغناطیسی است.

رابطه مناسب‌تر برای محاسبه تلفات هیستریزیس به صورت زیر معرفی شده است:

$$P_h = K_h f B_m^{a+b} \quad (\text{W/m}^3) \quad (31-3)$$

که در آن K_h ، a و b ثوابت اشتینمتز هستند.

۳-۷-۲- تلفات جریان گردابی

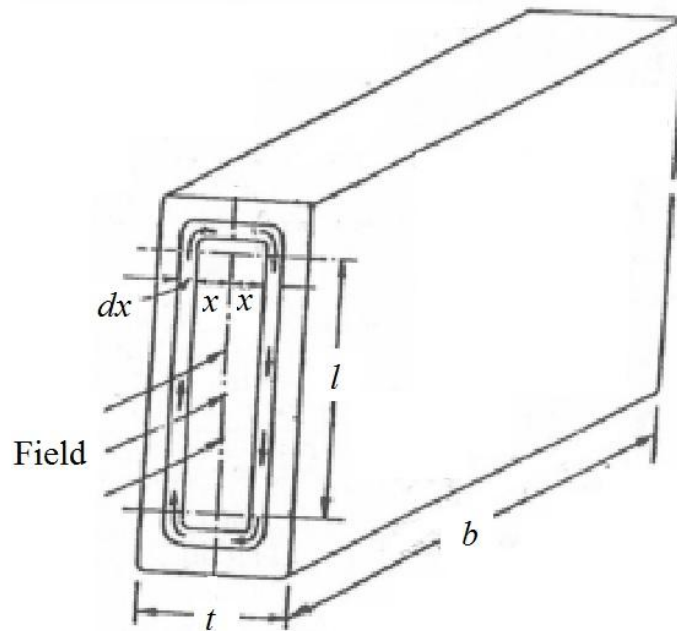
$$e = \frac{d\phi}{dt} \text{ : ولتاژ القایی در یک حلقه}$$

عبور شار متغیر با زمان از درون یک هسته آهنی، باعث القاء ولتاژ طبق قانون فارادی (رابطه فوق) در هسته می شود. ولتاژ القایی باعث جاری شدن جریان I_e در مسیرهای مختلف می گردد و آن هم تلفات $I_e^2 R$ را که در آن R مقاومت مسیر جریان است، منجر می شود.

- موق ساختن هسته به خاطر کاهش تلفات جریان گردابی (Laminated core)

۳-۷-۳- تلفات جریان گردابی در یک ورق نازک

به خاطر عبور شار متغیر با زمان از هسته آهنی، حلقه های جریان متعددی در هسته شکل می گیرند. برای یک ورق نازک ($t \ll l$)، یکی از این حلقه ها در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲- جریان فوکو در ورق آهن

برای حلقه جریان نشان داده شده در شکل فوق داریم:

$$\phi = A \times B = 2xl \times B = 2xl B_m \sin \omega t \text{ : شار عبوری از حلقه}$$

$$e_{xe} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d}{dt} (2xl B_m \sin \omega t)$$

$$= 2xl B_m \omega \cos \omega t$$

$$E_{xe} = \frac{2xl \omega B_m}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2} xl \pi f B_m$$

$$R_{xe} = \frac{2l\rho}{b \times dx} = \frac{2l\rho}{bdx}$$

$$I = \frac{E_{xe}}{R_{xe}} = \frac{2\sqrt{2} xl \pi f B_m}{2l\rho/bdx} = \frac{\sqrt{2} \pi f B_m b x dx}{\rho}$$

$$P_{xe} = R_{xe} I_{xe}^2 = \frac{2\pi^2 f^2 B_m^2}{\rho^2} b^2 x^2 (dx)^2 \frac{2l\rho}{bdx}$$

$$= \frac{4\pi^2 f^2 B_m^2 l b x^2 dx}{\rho}$$

مجموع تلفات جریان گردابی در کل هسته به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_e = \int_{x=0}^{x=\frac{t}{2}} \frac{4\pi^2 f^2 B_m^2}{\rho} l b x^2 dx = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2}{6\rho} l b t^3 \quad (W)$$

تلفات جریان گردابی بر واحد حجم برابرست با:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 l b t^3}{6\rho} / l b t = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 t^2}{6\rho} = K_e f^2 B_m^2 \quad (W/m^3)$$

که در آن $K_e = \frac{\pi^2 t^2}{6\rho}$ یک ثابت می باشد و داریم:

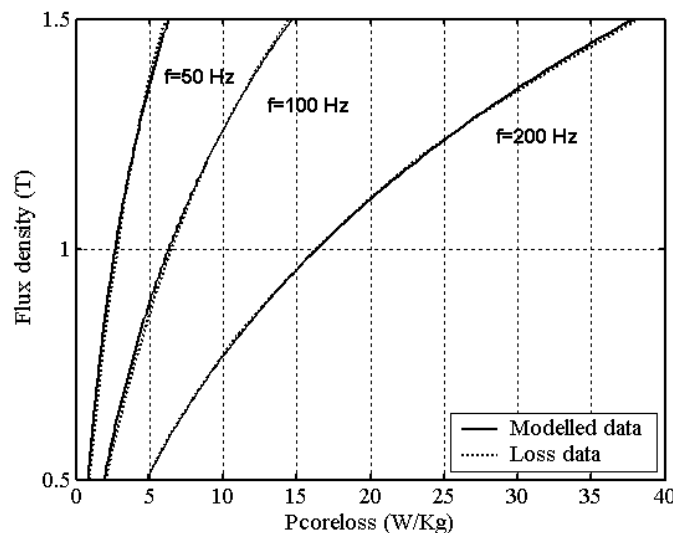
$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (32-3)$$

۳-۷-۴- تلفات آهن کل

در نهایت از جمع دو رابطه بدست آمده برای تلفات هیستریزیس (۳-۳۱) و جریان گردابی (۳-۳۲)، معادله اشتینمتز در محاسبه تلفات هسته برای شکل موج شار سینوسی به صورت زیر نتیجه می شود:

$$P_c = P_h + P_e = K_h f B_m^{a+b} + K_e f^2 B_m^2 \quad (W/m^3) \quad (3-33)$$

که در آن K_h ، a ، b و K_e ثوابت اشتینمتز در محاسبه تلفات آهن برای شکل موج های شار سینوسی اند. ثوابت اشتینمتز از مدل کردن داده های تلفات آهن اندازه گیری شده برای شکل موج های شار سینوسی با فرکانس و دامنه های ماکزیمم مختلف که توسط کارخانه سازنده تهیه می شوند با رابطه فوق، بدست می آیند. یک نمونه از این داده ها در جدول ۳-۱ آورده شد است. دقت شود در مدل کردن داده های تلفات، در نظر گرفتن حداقل دو فرکانس مختلف برای تعیین ثوابت اشتینمتز ضروری است. چگونگی مدل کردن داده های این ورقه خاص با رابطه (۳-۳۳) به منظور تعیین ثوابت اشتینمتز برای ورقه مزبور در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳- مدل کردن داده های تلفات اندازه گیری شده با رابطه اشتینمتز داده شده در (۳-۳۳)

وجود تلفات آهن اضافی در ماشین:

- ۱- افزایش تلفات جریان گردابی به علت اتصال کوتاه ورقه ها در لبه ورق ها
- ۲- تلفات آهن در بخش های دیگر مدار مغناطیسی (بخش های غیرفعال)

۳- تلفات جریان گردابی در سیم پیچی بویژه هنگامی که سطح مقطع هادی ها بزرگ است

۴- تلفات جریان گردابی در مغناطیس دایم برای ماشین های PM

جدول ۳-۱- مشخصات ورقه ورق فولاد M800-50 A در فرکانس های مختلف

f = 50 Hz										
J T	H A/m			T %	μ 0°/90°	P W/kg			T %	S VA/kg 0°/90°
	0°	90°	0°/90°			0°	90°	0°/90°		
0,5	111	181	146	24,2	2733	0,83	0,99	0,91	9,2	1,51
0,6	116	200	157	26,6	3047	1,12	1,32	1,22	8,3	1,95
0,7	120	219	168	29,1	3309	1,45	1,69	1,57	7,7	2,43
0,8	125	240	180	31,5	3536	1,80	2,08	1,94	7,2	2,94
0,9	130	264	194	33,9	3689	2,19	2,50	2,34	6,8	3,53
1,0	135	294	212	36,9	3756	2,61	2,97	2,79	6,4	4,20
1,1	142	331	234	39,8	3734	3,09	3,48	3,28	6,0	4,96
1,2	159	382	269	41,1	3551	3,62	4,04	3,83	5,5	5,91
1,3	198	462	329	40,0	3149	4,23	4,69	4,46	5,1	7,21
1,4	291	618	453	36,0	2458	4,95	5,42	5,19	4,5	9,38
1,5	559	1047	797	30,4	1499	5,77	6,29	6,02	4,3	14,65
1,6	1461	2353	1895	23,4	673	6,61	7,17	6,87	4,0	32,93
1,7	3755	5198	4476	16,1	303	7,33	7,90	7,61	3,8	84,81
1,8	7621	9571	8595	11,3	168	8,04	8,54	8,25	3,0	183,50
1,9	13168	15749	14510	8,9	105			8,78		342,72

f = 100 Hz				
J T	H A/m 0°/90°	μ 0°/90°	P W/kg 0°/90°	S VA/kg 0°/90°
0,6	162	2948	2,72	4,08
0,7	175	3187	3,50	5,12
0,8	189	3375	4,39	6,28
0,9	204	3517	5,36	7,59
1,0	220	3613	6,43	9,04
1,1	242	3625	7,65	10,77
1,2	271	3528	9,01	12,84
1,3	331	3123	10,62	15,74
1,4	454	2455	12,37	20,12
1,5	799	1495	14,38	30,51
1,6	1928	662	16,49	68,03
1,7	4560	298	18,61	175,68
1,8	7246	199		304,05
1,9				

f = 200 Hz				
J T	H A/m 0°/90°	μ 0°/90°	P W/kg 0°/90°	S VA/kg 0°/90°
0,6	175	2726	6,40	8,87
0,7	193	2892	8,36	11,28
0,8	211	3014	10,61	14,05
0,9	232	3084	13,28	17,37
1,0	254	3134	16,23	21,09
1,1	278	3152	19,54	25,37
1,2	305	3129	23,29	30,36
1,3	339	3053	27,69	36,77
1,4	457	2441	32,67	46,60
1,5	805	1484	38,11	67,93
1,6	1918	665	44,27	144,76
1,7	3409	398	51,53	269,33
1,8				
1,9				

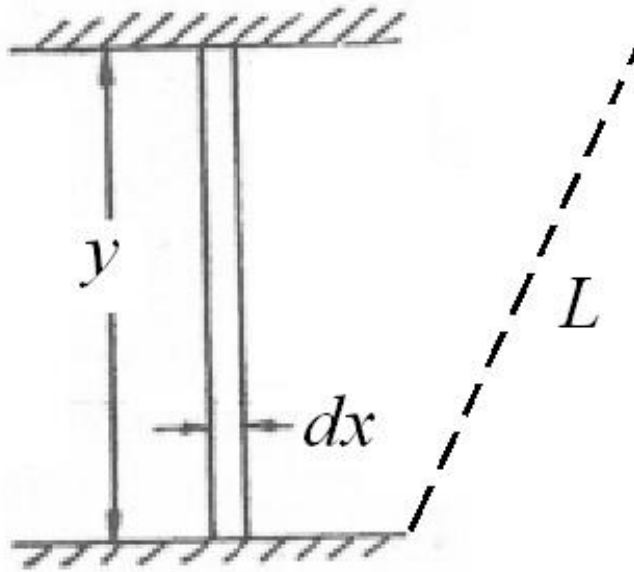
۳-۸- محاسبات پراکندگی

۳-۸-۱- هدایت مخصوص مغناطیسی

با در نظر گرفتن شار پراکندگی به صورت لوله‌هایی به طول y و پهنای dx در عمق یا ضخامت L مطابق شکل ۳-۱۴ داریم:

$$d\Lambda = \mu_0 \frac{\text{سطح لوله}}{\text{طول لوله}} = \mu_0 \frac{L dx}{y} \quad (۳-۳۴)$$

$$\Lambda = \int d\Lambda = \mu_0 \int L \frac{dx}{y} = L \mu_0 \int \frac{dx}{y} \quad (۳-۳۵)$$



شکل ۳-۱۴- لوله شار برای محاسبه هدایت مخصوص

هدایت مغناطیسی بر واحد طول به عنوان هدایت مخصوص مغناطیسی تعریف شده و با λ نمایش داده می‌شود:

$$\lambda = \frac{\Lambda}{L} = \mu_0 \int \frac{dx}{y} \quad (۳-۳۶)$$

$$h \text{ در پهنای } y \text{ با فرض ثابت بودن } \lambda = \mu_0 \int_0^h \frac{dx}{y} = \mu_0 \frac{h}{y} \quad (37-3)$$

محاسبه λ وقتی شار پراکندگی با تمام حلقه های سیم پیچی در ارتباط نباشد:

$$\Lambda = \frac{\text{شار مؤثر}}{\text{نیروی محرکه مغناطیسی کل}} = \frac{\varphi}{T I_z} \quad (*)$$

$$\Lambda = \frac{T\varphi}{T \times (T I_z)} = \frac{\text{شار ارتباطی (پیوندی) کل}}{\text{نیروی محرکه مغناطیسی کل} \times \text{تعداد دور کل}} \quad (38-3)$$

$$T_x \text{ شار ارتباطی دور سیم} = T_x d\varphi_x$$

$$\text{شار ارتباطی کل سیم پیچی} = \int T_x d\varphi_x$$

$$d\varphi_x = \text{هدایت مغناطیسی جزء مربوطه} \times \text{نیروی محرکه مغناطیسی مولد این شار} = T_x I_z \mu_0 L \frac{dx}{y}$$

$$\text{شار ارتباطی کل} = \int T_x T_x I_z \mu_0 L \frac{dx}{y} = \mu_0 L I_z \int T_x^2 \frac{dx}{y}$$

$$\Lambda = \frac{\text{شار ارتباطی کل}}{\text{نیروی محرکه مغناطیسی کل} \times \text{تعداد دور کل}} = \frac{\mu_0 L I_z \int T_x^2 \frac{dx}{y}}{T(T I_z)} = \mu_0 L \int \left(\frac{T_x}{T}\right)^2 \frac{dx}{y}$$

پیوندی

$$\lambda = \frac{\Lambda}{L} = \mu_0 \int \left(\frac{T_x}{T}\right)^2 \frac{dx}{y} \quad (39-3)$$

۳-۸-۲- مقاومت القایی پراکندگی

$$\mathbf{L} = \frac{\text{شار ارتباطی سیم پیچی}}{\text{جریان}} = \frac{T \varphi}{I_z}$$

از رابطه (*) داریم:

$$\varphi = T I_z \Lambda$$

بنابراین:

$$\mathbf{L} = \frac{T T I_z \Lambda}{I_z} = T^2 \Lambda \quad (40-3)$$

و در نهایت مقاومت القایی پراکندگی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$X = 2\pi f \times \mathbf{L} = 2\pi f T^2 \Lambda = 2\pi f T^2 L \lambda \quad (41-3)$$

که در آن:

$$\lambda = \mu_0 \int \left(\frac{T_x}{T}\right)^2 \frac{dx}{y}$$

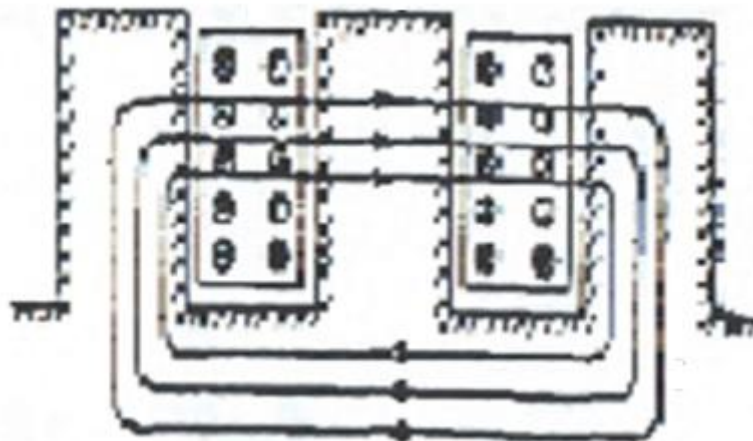
← محاسبه مقاومت القایی پراکندگی منجر به تعیین هدایت مخصوص مغناطیسی

۳-۹- انواع شار پراکندگی

۱- شار پراکندگی شیار

✓ گذر شار از بدنه یک دندانه به دندانه دیگر از طریق شیار

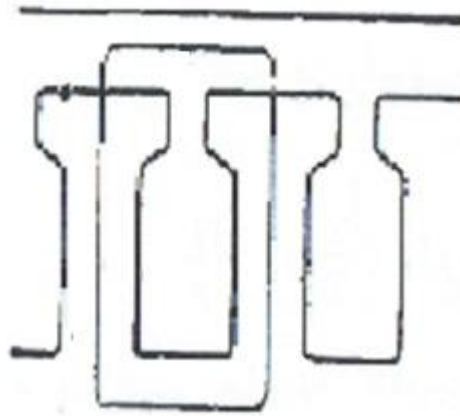
✓ پیوند با قسمتی از هادی‌ها



شکل ۳-۱۵- شار پراکندگی شیار

۲- شار پراکندگی نوک دندان

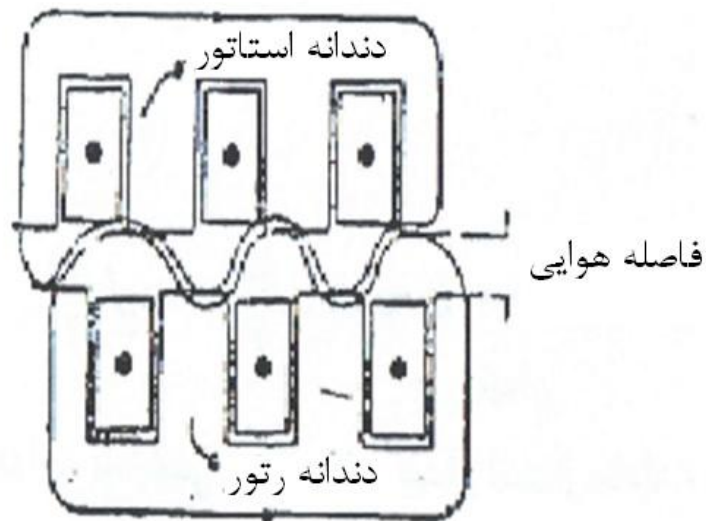
- ✓ عبور شار از نوک یک دندان به نوک دندان مجاور از طریق فاصله هوایی
- ✓ اهمیت این شار در ماشین‌های با فاصله هوایی بزرگ مثل ماشین DC و سنکرون



شکل ۳-۱۶- شار پراکندگی نوک دندان

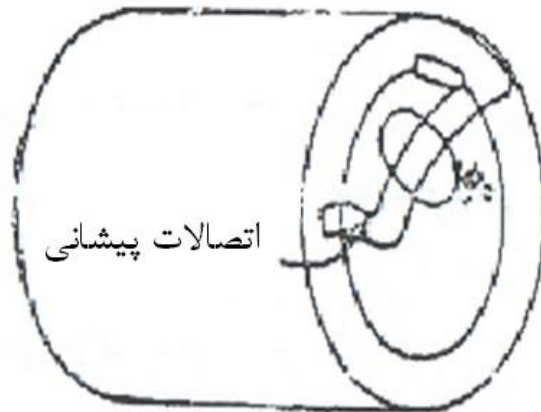
۳- شار پراکندگی زیگزاگ

- ✓ عبور شار بین دندانه‌های استاتور و رتور به صورت زیگزاگ
- ✓ بستگی شار به طول فاصله هوایی و وضعیت نسبی نوک دندانه‌ها



شکل ۳-۱۷- شار پراکندگی زیگزاگ

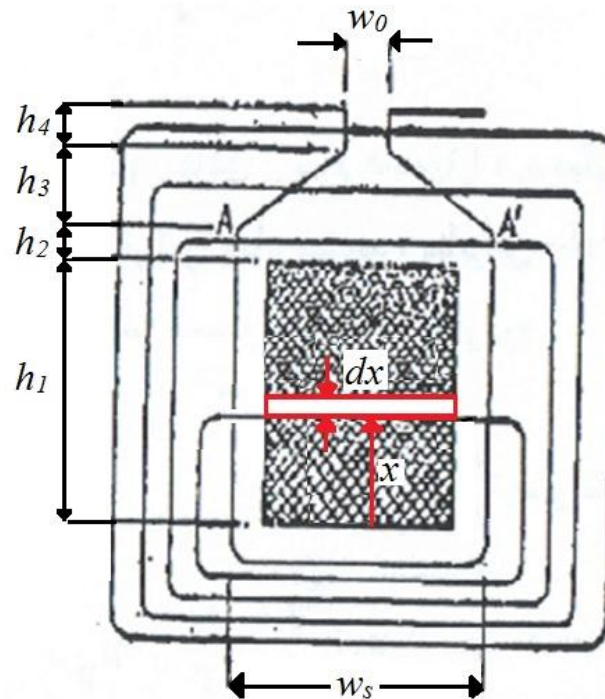
۴- شار پراکندگی اتصالات پیشانی



شکل ۳-۱۸- شار پراکندگی اتصالات پیشانی

۳-۱۰- محاسبه شار پراکندگی

۳-۱۰-۱- شار با اضلاع موازی (شیار مستطیلی)



شکل ۳-۱۹- شار با اضلاع موازی

الف- قسمت هادی دار شیار

از (۳-۳۹) داریم:

$$T_x = \frac{x}{h_1} T$$

تعداد هادی مؤثر در تولید این شار

$$\lambda_1 = \mu_0 \int_0^{h_1} \left(\frac{T_x}{T}\right)^2 \frac{dx}{y} = \mu_0 \int_0^{h_1} \frac{x^2}{h_1^2 w_s} \frac{dx}{y} = \mu_0 \frac{h_1}{3w_s}$$

ب- بخش بدون هادی (لوله های شار در این قسمت تمام هادی ها را در بر می گیرند)

برای ارتفاع h_2 :

$$y = w_s$$

طول مسیر شار

$$\lambda_2 = \mu_0 \int_0^{h_2} \frac{dx}{y} = \mu_0 \int_0^{h_2} \frac{dx}{w_s} = \mu_0 \frac{h_2}{w_s}$$

برای ارتفاع h_3 :

$$y = (w_0 - w_s) \frac{x}{h_3} + w_s$$

طول مسیر شار

$$\lambda_3 = \mu_0 \int_0^{h_3} \frac{dx}{y} = \mu_0 \int_0^{h_3} \frac{dx}{(w_0 - w_s) \frac{x}{h_3} + w_s} \approx \mu_0 \frac{2h_3}{w_s + w_0}$$

برای ارتفاع h_4 :

$$y = w_0$$

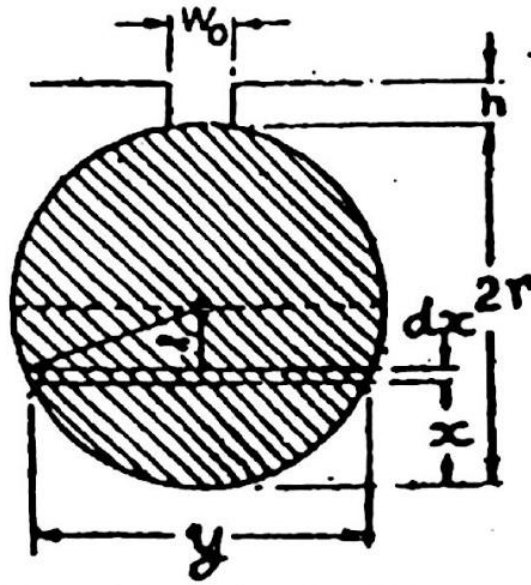
طول مسیر شار

$$\lambda_4 = \mu_0 \int_0^{h_4} \frac{dx}{y} = \mu_0 \int_0^{h_4} \frac{dx}{w_0} = \mu_0 \frac{h_4}{w_0}$$

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$$

$$= \mu_0 \left[\frac{h_1}{3w_s} + \frac{h_2}{w_s} + \frac{2h_3}{w_s + w_0} + \frac{h_4}{w_0} \right]$$

(۳-۴۲)



شکل ۳-۲۶- شیار گرد

$$y = 2 r \sin \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{r - x}{r} \rightarrow dx = r \sin \alpha d\alpha$$

$$\text{مساحت مثلث بالا} = \frac{y}{2} r \cos \alpha = r^2 \sin \alpha \times \cos \alpha = \frac{r^2}{2} \sin 2\alpha$$

$$\text{مساحت قطاع به ارتفاع X} = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha)$$

$$\text{تعداد هادی درون ناحیه پائین} = \frac{(r^2/2) \times (2\alpha - \sin 2\alpha)}{\pi r^2} T = \frac{\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha}{\pi} T$$

$$\lambda_1 = \mu_0 \int_0^{h_1} \left(\frac{T_x}{T} \right)^2 \frac{dx}{y} = \mu_0 \int_0^\pi \left(\frac{\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha}{\pi} \right)^2 \frac{d\alpha}{2} = 0.623 \mu_0$$

برای قسمت دهانه شیار:

$$\lambda_2 = \int_0^h \mu_0 \frac{dx}{y} = \mu_0 \frac{h}{w_0}$$

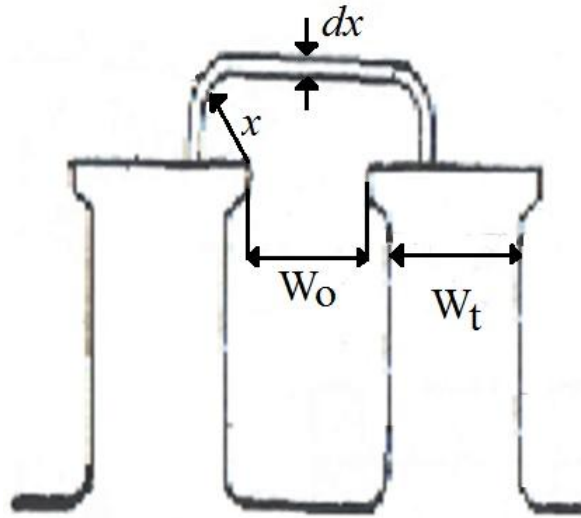
برای کل شیار:

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 = \mu_o \left[0.623 + \frac{h}{w_o} \right] \quad (43-3)$$

۳-۱۰-۳- پراکندگی نوک دندانه:

طول مسیر شار: $y = w_o + \pi x$

$$\lambda_t = \mu_o \int_0^{w_t/2} \frac{dx}{w_o + \pi dx} = \frac{\mu_o}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi w_t}{2w_o} \right) \quad (44-3)$$

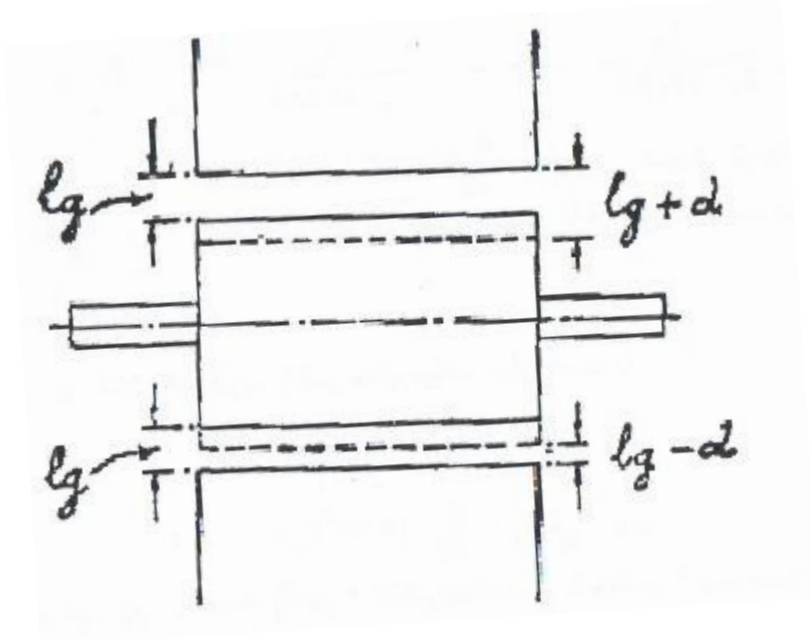


شکل ۳-۲۷- پراکندگی نوک دندانه

۳-۱۸- محاسبه کشش مغناطیسی نامتعادل

نیروی کشش مغناطیسی:

$$W_{fg} = \frac{B^2}{2 \mu_o} : \text{چگالی انرژی مغناطیسی ذخیره شده در فاصله هوایی}$$



شکل ۳-۲۸- مشاهده اثر ناهم محوری (eccentricity) در راستای محوری ماشین

$$\text{انرژی مغناطیسی ذخیره شده در فاصله هوایی} = W_{fg} \times V_g = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A dx$$

از آنجاییکه کار انجام (Fdx) برابر است با تغییرات انرژی مغناطیسی، بنابراین داریم:

$$\Rightarrow F = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_0} \quad (\text{N})$$

و در نتیجه :

$$\Rightarrow \text{نیروی کشش بر واحد سطح برحسب نیوتن بر مترمربع} : P_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (*)$$

$$\text{نیروی محرکه مغناطیسی کل سیم پیچی} : AT = AT_g + AT_1 \xrightarrow{\text{اگر هسته به اشباع نرود}} AT = AT_g$$

\downarrow آهن
 \downarrow فاصله هوایی

$$\text{برای فاصله هوایی} : B = \frac{\mu_0 AT_g}{l_g} \xrightarrow{*} P_m = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{AT}{l_g} \right)^2$$

در نتیجه کشش بر متر مربع با مجذور فاصله هوایی تناسب معکوس دارد:

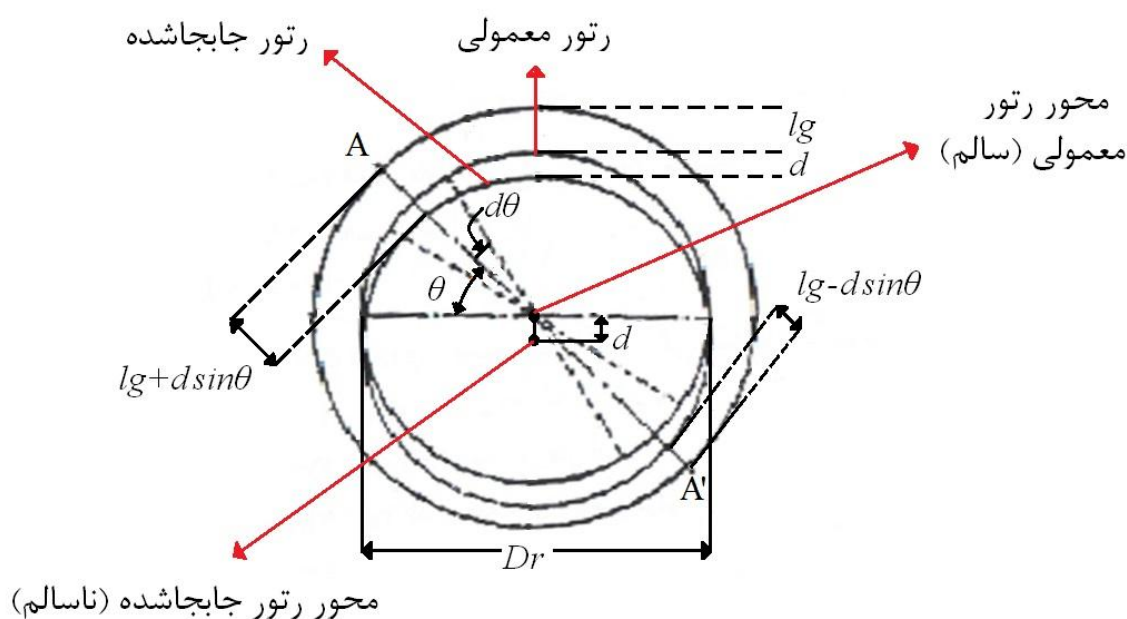
$$\text{کشش بر متر مربع با جابجایی رتور} = P_m \left(\frac{l_g}{\delta} \right)^2$$

که در آن:

δ : طول فاصله هوایی با جابجایی

P_m : کشش بر متر مربع با فاصله هوایی معمولی (ماشین سالم)

از آنجائیکه در رابطه بالا اثبات شد که کشش بر متر مربع با مجذور فاصله هوایی تناسب معکوس دارد، کشش رتور برای ساختار نشان داده شده در شکل ۳-۳۴ در ادامه محاسبه می شود.



شکل ۳-۳۴- برش عرضی ماشین هنگام وجود ناهم محوری

اگر d جابجایی رتور در جهت پائین باشد، دو نیرو عمل کننده در جهت مخالف بر محور رتور در راستای AA' وجود دارد. کشش رتور روی سطح نوار $L \frac{D_r}{2} d\theta$ برابر است با:

$$AA' \text{ کشش رتور در طول} = P_m \left[\left(\frac{lg}{lg-d \sin \theta} \right)^2 - \left(\frac{lg}{lg+d \sin \theta} \right)^2 \right] L \frac{D_r}{2} d\theta$$

که در آن L و D_r به ترتیب قطر و طول محوری آرمیچر هستند. رابطه داخل کروشه را تقریباً معادل $4 \frac{d}{lg} \sin \theta$ است. در نتیجه:

$$AA' \text{ کشش در طول} = 4 P_m \left(\frac{d}{lg} \right) \sin \theta L \frac{D_r}{2} d\theta = 2 P_m L D_r \frac{d}{lg} \sin \theta d\theta$$

مؤلفه عمودی این کشش عبارت است از:

$$\text{مؤلفه عمودی کشش} = 2 P_m L D_r \frac{d}{lg} \sin \theta \, d\theta \sin \theta = 2 P_m L D_r \left(\frac{d}{lg} \right) \sin^2 \theta \, d\theta$$

$$\text{کشش کل در جهت پائین} = 2 P_m L D_r \frac{d}{lg} \int_0^\pi \sin^2 \theta \, d\theta = \pi D_r L \frac{d}{lg} P_m \quad (\text{N})$$

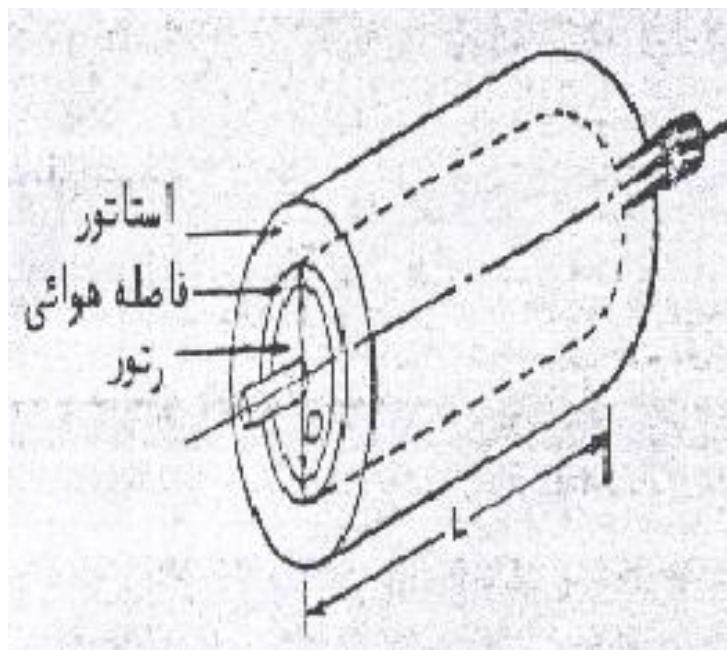
(۴۵-۳)

فصل چهارم:

اصول کلی طرح ماشین‌های گردان

ابعاد اصلی : قطر آرمیچر (یا هسته رتور) D

طول آرمیچر (یا استاتور) L



شکل ۴-۱- ابعاد اصلی ماشین گردان

۴-۱- بارگیری مغناطیسی و الکتریکی کل:

شار کل دور آرمیچر در فاصله هوایی بارگیری مغناطیسی کل تعریف می شود و برابر است با $P\phi$

که در آن P تعداد قطب ها و ϕ شار زیر یک قطب است.

تعداد کل هادی‌ها در جریان هر هادی بارگیری الکتریکی کل نامیده می‌شود و برابر است با ZI_z

که در آن Z تعداد کل هادی هاست و I_z جریان هادی است.

۴-۱-۱- بارگیری مخصوص

چگالی شار متوسط در فاصله هوایی بارگیری مخصوص مغناطیسی نامیده می‌شود.

$$B_{av} = \frac{\text{شار کل}}{\text{سطح مسیر عبور شار}} = \frac{P \varphi}{\pi D L} = \frac{\varphi}{\tau L} \quad (1-4)$$

که در آن τ گام قطب و L طول محوری ماشین است.

تعداد هادی‌ها در جریان هر هادی بر متر محیط آرمیچر در فاصله هوایی را بارگیری مخصوص الکتریکی می‌نامند.

$$ac = \frac{Z I_z}{\pi D} \quad (2-4)$$

۴-۱-۲- معادله توان خروجی

۱- ماشین‌های جریان مستقیم (DC)

$$P_a = 10^{-3} \times \text{جریان آرمیچر} \times \text{نیروی محرکه الکتریکی تولیدی}$$

$$E = \varphi Z n \frac{P}{a}$$

$$\Rightarrow P_a = \varphi Z n \frac{P}{a} I_a \times 10^{-3} = (P\varphi) \left(\frac{I_a}{a} Z \right) n \times 10^{-3}$$

$$= (P\varphi)(Z I_z) n \times 10^{-3} \quad (3-4)$$

$$\Rightarrow P_a = 10^{-3} \times \text{سرعت (دور بر ثانیه)} \times \text{بارگیری الکتریکی کل} \times \text{بارگیری مغناطیسی کل}$$

$$B_{av} = \frac{P\phi}{\pi D L} \Rightarrow P\phi = \pi D L B_{av} \quad (4-4)$$

$$ac = \frac{ZI_z}{\pi D} \Rightarrow ZI_z = \pi D ac \quad (5-4)$$

با جای گذاری $p\phi$ و ZI_z در معادله توان داریم:

$$P_a = (\pi D L B_{av})(\pi D ac)n \times 10^{-3}$$

$$= (\pi^2 B_{av} ac \times 10^{-3})D^2 L n = C_0 D^2 L n$$

$$\Rightarrow P_a = C_0 D^2 L n \quad (6-4)$$

$$C_0 = \pi^2 B_{av} ac \times 10^{-3} \quad (7-4)$$



ضریب ثابت قدرت خروجی

۲- ماشین‌های جریان متناوب (AC)

$$Q = m E_{ph} I_{ph} \times 10^{-3} \text{ KVA}$$

m: تعداد فازها

E_{ph} , I_{ph} : ولتاژ و جریان فاز

$$E_{ph} = 4.44 f \phi T_{ph} K_w \Rightarrow Q = m 4.44 f \phi T_{ph} K_w I_{ph} \times 10^{-3}$$

$$f = \frac{P n_s}{2} \Rightarrow Q = m 4.44 \frac{P n_s}{2} \phi T_{ph} K_w I_{ph} \times 10^{-3}$$

$$= 1.11 K_w (P\phi)(2 m I_{ph} T_{ph})n_s \times 10^{-3}$$

$$\left. \begin{array}{l} I_z = I_{ph} \\ Z = 2 m T_{ph} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{بار الکتریکی کل: } ZI_z = 2 m T_{ph} I_{ph}$$

$$\Rightarrow Q = 1.11 K_w (P\phi)(Zl_z)n_s \times 10^{-3} \quad (8-4)$$

$$= 1.11 K_w \times \text{کل بارگیری الکتریکی کل} \times \text{کل بارگیری مغناطیسی کل} \times n_s \times 10^{-3}$$

$$\left. \begin{array}{l} P\phi = \pi DL B_{av} \\ Zl_z = \pi D ac \end{array} \right\} \Rightarrow Q = 1.11 K_w (\pi DL B_{av})(\pi D ac) \times n_s \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow Q = 1.11 \pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} D^2 L n_s$$

$$\Rightarrow Q = C_0 D^2 L n_s \quad (9-4)$$

$$C_0 = 1.11 \pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} \quad (10-4)$$

۴-۱-۳- عوامل مؤثر بر ابعاد ماشین های گردان

حاصل ضرب $D^2 L$ با افزایش سرعت یا افزایش ضریب قدرت خروجی کاهش می یابد.

⇐ کاهش حجم و هزینه ساخت ماشین

۱- سرعت

- انتخاب حداکثر سرعت در طراحی برای کاهش ابعاد و هزینه ساخت
- محدود شدن حداکثر سرعت با تنش های مکانیکی

۲- ثابت قدرت خروجی

$$C_0 = \begin{cases} \pi^2 B_{av} ac \times 10^{-3} & \text{(DC)} \\ 1.11 \pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} & \text{(AC)} \end{cases}$$

⇐ انتخاب بارگیری های مخصوص بالا برای کاهش هزینه ساخت

۴-۱-۴- انتخاب بارگیری مخصوص مغناطیسی

عوامل تعیین کننده: ۱- چگالی شار حداکثر

۲- تلفات آهن

۳- جریان مغناطیس کننده

چگالی شار حداکثر:

چگالی شار در اجزاء آهنی متناسب با چگالی شار متوسط در فاصله هوایی (بارگیری مخصوص مغناطیسی) می باشد.

بیشترین چگالی شار در دندانه ماشین اتفاق می افتد.

این چگالی شار بایستی زیر مقدار مجاز قرار گیرد \Leftarrow محدودیت بارگیری مخصوص مغناطیسی

تلفات آهن:

چگالی شار \propto تلفات آهن

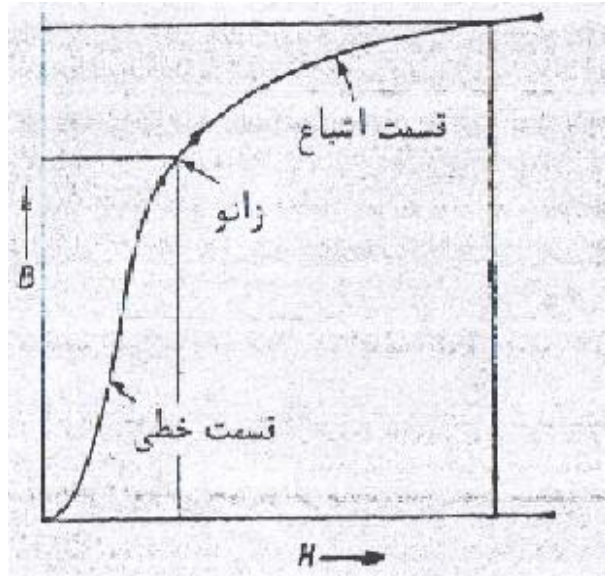
\Leftarrow کاهش تلفات آهن با کم کردن بارگیری مخصوص مغناطیسی

اهمیت بیشتر مسئله با افزایش فرکانس، چون تلفات هیستریزیس و گردابی با فرکانس رابطه مستقیم دارند. در موتورهای القایی Bav حدود ۰/۴۵ تسلا انتخاب می شود.

جریان مغناطیس کننده:

در صورت بالا رفتن بارگیری مخصوص مغناطیسی، نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای برقراری شار در اجزاء آهنی افزایش می یابد. \Leftarrow جریان مغناطیس شونده خیلی بزرگ می شود.

\Leftarrow انتخاب بارگیری مخصوص مغناطیسی پائین در موتورهای القایی برای کار در ناحیه خطی و در نتیجه کاهش جریان مغناطیس شونده و افزایش ضریب توان.

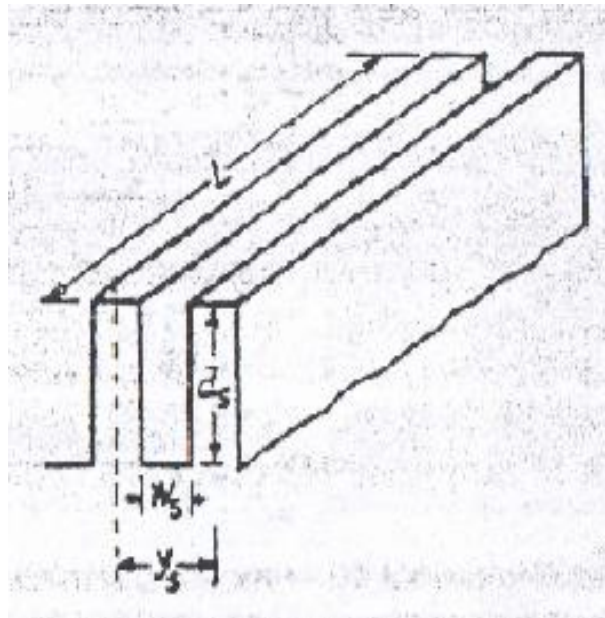


شکل ۴-۴- منحنی مغناطیس شونده

۲-۴- انتخاب بارگیری مخصوص الکتریکی

افزایش درجه حرارت مجاز:

با بیشتر شدن بارگیری مخصوص الکتریکی، تلفات مسی افزایش می یابد و درجه حرارت ممکن است از حد مجاز فراتر رود.



شکل ۴-۵- ابعاد هندسی شیار

از سطح مقطع هادی

$$= \frac{\rho L}{a_z} = \text{مقاومت هر هادی شیار}$$

$$= I_z^2 \frac{\rho L}{a_z} = \text{تلفات مس هر هادی} \Rightarrow \text{تلفات مس هر شیار} = \frac{z}{s} I_z^2 \frac{\rho L}{a_z} = z_s I_z^2 \frac{\rho L}{a_z}$$

$$= y_s L = \text{سطح انتقال حرارت}$$

از گام شیار: y_s

$$q = \frac{\text{تلفات}}{\text{سطح انتقال حرارت}} = \frac{z_s I_z^2 \rho L}{a_z y_s L} = \rho \frac{z_s I_z}{y_s} \frac{I_z}{a_z} \quad (11-4)$$

$$ac = \frac{z I_z}{\pi D} = \frac{z I_z / s}{\pi D / s} = \frac{z_s I_z}{y_s} : \text{بارگیری مخصوص الکتریکی}$$

$$\Rightarrow q = ac \delta \rho \quad (12-4)$$

که در آن:

$$\delta = \frac{I_z}{a_z}$$

ac بیشتر معادل q بالاتر \Leftarrow افزایش دما

$$\theta = \frac{Q}{S \lambda} = q c = ac \delta \rho c$$

c: ضریب خنک کردن

ولتاژ:

$$= d_s \times w_s = \text{سطح شیار}$$

$$= s d_s \times w_s = \pi D d_s \frac{w_s}{y_s} = \text{سطح تمام شیارها}$$

$$S_f = \frac{\text{مساحت مس}}{\text{مساحت شیار}} : \text{ضریب فضای شیار}$$

$$\Rightarrow \text{مساحت مس} = \pi D d_s \frac{w_s}{y_s} \times S_f \quad (13-4)$$

از طرف دیگر داریم:

$$\text{مساحت مس} = Z a_z = Z \frac{I_z}{\delta} = \frac{\pi D a c}{\delta} \quad (14-4)$$

از دو رابطه اخیر داریم:

$$\frac{\pi D a c}{\delta} = \pi D d_s \frac{w_s}{y_s} \times S_f$$

$$\Rightarrow a c = d_s \frac{w_s}{y_s} S_f \delta \quad (15-4)$$

در نتیجه $a c$ متناسب با S_f (ضریب فضا) است.

در ماشین‌های فشار قوی (افزایش ولتاژ)، ضخامت بیشتر برای عایق باعث کاهش S_f و در نتیجه کم شدن $a c$ می‌گردد.

ابعاد ماشین:

$$a c = d_s \frac{w_s}{y_s} S_f \delta$$

برای ماشین بزرگتر d_s افزایش می‌یابد و $a c$ بیشتر می‌شود. (ارتفاع شیار متناسب با قطر ماشین است).

چگالی جریان:

$$\theta = a c \rho \delta c$$

انتخاب چگالی جریان کمتر باعث افزایش $a c$ می‌گردد.

۴-۴- جدا کردن D و L

۴-۴-۱- ماشین DC

الف- ابعاد ماشین

نسبت طول هسته به گام قطب $\left(\frac{L}{\tau}\right)$ به عنوان عامل تعیین کننده ابعاد ماشین برای حداقل کردن طول حلقه متوسط $\frac{L}{\tau}$ معمولاً بین 0.7 تا 0.9 بایستی باشد.

ب- سرعت محیطی

به عنوان عامل محدودکننده مقدار قطر $(V_a = \pi D n)$

به خاطر کنترل نیروی گریز از مرکز V_a کمتر از 30 m/s انتخاب می شود.

ج- گشتاور ماند (ممان اینرسی)

نیاز به ممان اینرسی کوچک در بعضی کاربردها

$\propto D^4 L$ گشتاور ماند \Leftarrow انتخاب قطر کوچک برای کم کردن گشتاور مزبور

د- ولتاژ بین تیغه‌های کموتاتور

محدود شدن طول با ولتاژ حداکثر قابل تحمل بین تیغه‌ها

اثبات می شود:

$$E_{cm} = 2 B_{gm} L V_a T_c$$

B_{gm} : چگالی شار ماکزیمم

T_c : تعداد دور هر پیچک

V_a : سرعت محیطی 30 m/s \Leftarrow مشخص شدن طول حداکثر

E_{cm} : ولتاژ قابل تحمل

۴-۴-۲- موتور القایی

$$\frac{L}{\tau} = \begin{cases} 1.5 - 2 & \text{حداقل هزینه} \\ 1 - 1.25 & \text{ضریب توان خوب} \\ 1.5 & \text{بازده خوب} \\ 1 & \text{طرح کلی خوب} \end{cases}$$

مثال ۴-۱- با توجه به حدود مجاز زیر ابعاد موتور القایی سه فاز 25 hp ، 400 V ، 6 قطب و 50 Hz را انتخاب کنید. چگالی شار متوسط در فاصله هوایی از 0.45 T تجاوز نمی یابد و بارگیری مخصوص الکتریکی از 25000 آمپر بر متر تجاوز نمی کند. همچنین تعداد دور هر فاز سیم پیچی استاتور را محاسبه کنید. حاصل ضرب بازده و ضریب توان 0.72 است و راه اندازی به طریقه ستاره- مثلث می- باشد.

قطر داخلی استاتور: 25 30 36 cm

طول های هسته: $\begin{cases} 18 & 12 & 10 \\ 19 & 16 & 14 \end{cases}$ cm

ضریب سیم پیچی را ۰/۹۵۵ فرض نمایید.

$$Q = \frac{\text{hp} \times 0.746}{\eta \cos \varphi} = \frac{25 \times 0.746}{0.72} = 25.9$$

توان ورودی :

$$C_o = 11 K_w B_{av} a c \times 10^{-3}$$

ثابت توان خروجی :

$$= 11 \times 0.955 \times 0.45 \times 25000 \times 10^{-3} = 118.2$$

$$n_s = \frac{2f}{p} = \frac{2 \times 50}{6} = 16.66 \quad \text{rps}$$

سرعت سنکرون :

$$D^2 L = \frac{Q}{C_o n_s} = \frac{25.9}{118.2 \times 16.66} = 13121 \text{ cm}^3$$

D	25	25	30	30	36	36
L	10	14	12	16	18	19
D ² L	6250	8750	10800	14400	23338	24624

ابعاد ماشین که نزدیکترین $D^2L = 13121$ را نتیجه می‌دهند:

$$D = 30 \text{ cm} \quad L = 16 \text{ cm}$$

$$\phi = \frac{\pi D L}{p} B_{av} = \frac{\pi \times 0.3 \times 0.16}{6} \times 0.45 = 0.0113 \text{ Wb}$$

$$E_{ph} = 400 \text{ V} \quad \text{ولتاژ فاز}$$

طرح برای اتصال مثلث:

$$T_{ph} = \frac{E_{ph}}{4.44 f \phi K_w} = \frac{400}{4.44 \times 50 \times 0.0113 \times 0.955}$$

$$\Rightarrow T_{ph} = 167$$

فصل پنجم:

طراحی موتور القایی سه فاز

۱-۵- معادله توان خروجی

$$Q = C_0 D^2 L n_s \quad (۱-۵)$$

$$C_0 = 11K_w B_{av} a c \times 10^{-3} \quad (۲-۵)$$

C_0 : ضریب ثابت توان خروجی

$$\Rightarrow D^2 L = \frac{Q}{C_0 n_s}$$

$$Q = \frac{kW}{\eta \cos \varphi} = \frac{hp \times 0.746}{\eta \cos \varphi} \quad (۳-۵)$$

برای یک ماشین خاص Q , n_s , $\cos \varphi$, η معلوم اند.

⇐ ارزیابی ضریب ثابت توان خروجی برای محاسبه $D^2 L$

✓ وابستگی ضریب مزبور به B_{av} و $a c$

B_{av} - ۱-۱-۵

۱- ضریب توان

چگالی شار بزرگ ← باعث افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی و کاهش ضریب توان

۲- تلفات آهن

بالا بودن چگالی شار متوسط ⇐ افزایش تلفات آهن

۳- ظرفیت اضافه بار

B_{av} بالا ← تعداد دور کم برای یک ولتاژ معین ← مقاومت القایی پراکندگی کوچک

← بزرگ بودن ظرفیت اضافه بار

۵-۱-۲- ac :

۱- تلفات مس و افزایش درجه حرارت:

ac بالا باعث افزایش درجه حرارت می‌گردد.

۲- ولتاژ :

در ماشین با ولتاژ بالا ac کوچک است.

۳- ظرفیت اضافه بار:

ac بالا ← تعداد دور زیاد ← مقاومت القایی پراکندگی بزرگ

← کاهش ظرفیت اضافه بار

۵-۱-۳- ابعاد اصلی

جداسازی D و L :

نسبت $\frac{L}{T}$ برای طرح‌های مختلف :	حداقل هزینه	1.5 - 2
	ضریب توان خوب	1 - 1.25
	بازده خوب	1.5
	طرح کامل خوب	1

۵-۲- سیم پیچی استاتور

۵-۲-۱- تعداد دور هر فاز

$$\varphi_m = B_{av} \frac{\pi D L}{p} \quad \text{شار قطب}$$

$$E_s = 4.44 f \varphi_m T_s K_{ws} \Rightarrow T_s = \frac{E_s}{4.44 f \varphi_m K_{ws}}$$

تعداد دور

۵-۲-۲- هادی‌های استاتور

چگالی جریان معمولاً $3 - 5 \text{ A/mm}^2$ است.

$$I_s = \frac{Q}{3 E_s} \quad \text{جریان هر فاز استاتور}$$

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} \quad \text{mm}^2 \quad \text{سطح مقطع هادی}$$

δ_s : چگالی جریان در هادی های استاتور

۵-۲-۳- تعداد شیارهای استاتور

نکاتی در مورد انتخاب تعداد شیارهای استاتور:

۱- مقاوت القایی پراکندگی

تعداد شیار زیاد ← عایق بندی بیشتر ← کاهش شار پراکندگی بدلیل مسیر شار طولانی

← کم شدن مقاوت القایی پراکندگی ← افزایش ظرفیت اضافه بار

۲- مشکلات مکانیکی

تعداد شیارهای زیاد ← باریک شدن دندانه‌ها ← کاهش استقامت مکانیکی

۳- جریان مغناطیس شوندگی و تلفات آهن

تعداد زیاد شیار ← کاهش عرض دندانه ← افزایش چگالی شار ← بالا رفتن جریان مغناطیس شوندگی و تلفات آهن

۴- هزینه

تعداد زیاد شیار ← عایق بندی بیشتر ← هزینه بالاتر

● واضح است که حداقل تعداد شیار در قطب در هر فاز (q) برابر با ۲ می باشد.

$$S_s = \text{تعداد شیار استاتور}$$

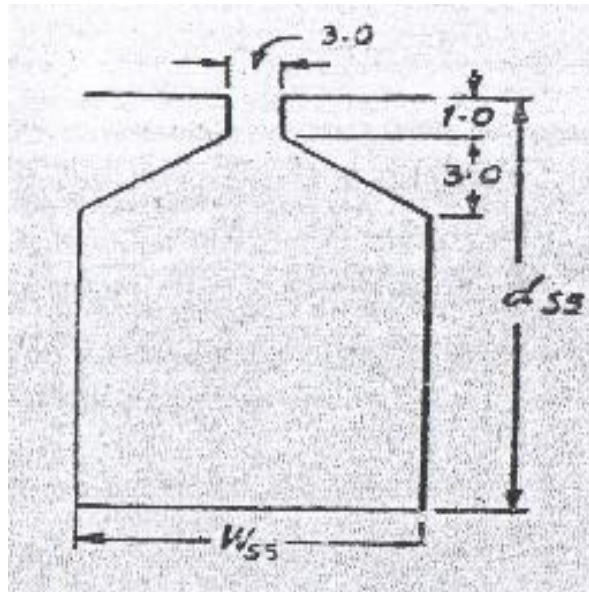
$$3 \times 2 T_s = 6 T_s = \text{تعداد کل هادی‌های استاتور}$$

$$Z_{ss} = \frac{6 T_s}{S_s} : \text{هادی‌های هر شیار استاتور}$$

$$\text{مساحت تقریبی هر شیار} = \frac{\text{مساحت مس هر شیار}}{\text{ضریب فضا}} = \frac{Z_{ss} \times a_s}{S_f} \quad (4-5)$$

$$S_f = 0.25 - 0.4$$

معلوم بودن مساحت شیار ← تعیین ابعاد شیار (شکل ۵-۱)



شکل ۵-۱- شیار استاتور

نکاتی راجع به انتخاب ابعاد شیار

- ✓ عرض دندان و شیار تقریباً مساوی اند.
- ✓ شیار نباید زیاد عریض باشد ← باریک شدن دندان در صورت عریض بودن شیار
- ⇐ انتخاب عرض شیار برای حصول چگالی شار $1.3 - 1.7 T$ در دندان
- ✓ کوچک بودن زیاد عرض شیار ← عمیق شدن شیار و افزایش مقاومت القایی پراکندگی
- ✓ معمولاً: $3 - 6 = \frac{\text{عمق (ارتفاع) شیار}}{\text{عرض شیار}}$

۵-۲-۴- عایق شیار استاتور

اهمیت بیشتر بحث عایق بندی با افزایش سطح ولتاژ

عایق بندی هادی نسبت به هادی (روکش به اضافه جداکننده میکانیت)

عایق بندی پیچک از هسته ← میکانیت

ولتاژ (V)	400	3300	6600	11000
ضخامت عایق (mm)	0.75	1.5	2.5	4

۵-۲-۵- طول حلقه متوسط

رابطه تجربی:

$$L_{mts} = 2L + 2.3 \tau + 24 \quad \text{cm} \quad (5-5)$$

τ و L بر حسب cm (برای موتورهای تا ۶۵۰ ولت)

۵-۳-۵- دندانه استاتور

$B_{ts} = 1.7 \text{ T}$: حداکثر چگالی شار مجاز در دندانه استاتور

$$\rightarrow \text{حداقل سطح دندانه بر قطب} = \frac{\Phi_m}{1.7}$$

$$\frac{S_s}{p} \times L_i \times w_{ts}$$

$$\Rightarrow w_{ts, \min} = \frac{\Phi_m}{1.7 \times \frac{S_s}{p} L_i}$$

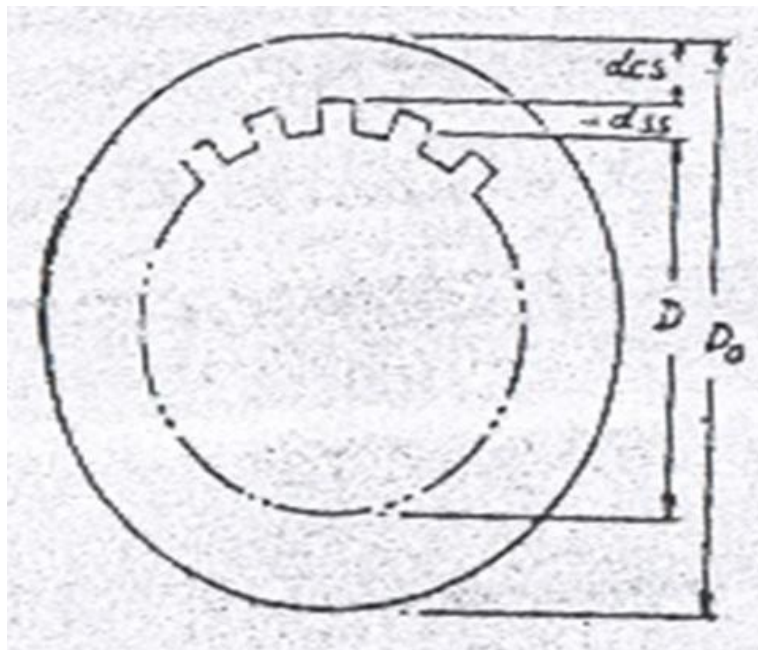
۵-۴-۵- هسته استاتور

$$\text{شار در هسته استاتور} = \frac{\Phi_m}{2}$$

$$\text{سطح هسته استاتور} = \frac{\text{شار هسته}}{\text{چگالی شار}} = \frac{\varphi_m}{2 B_{CS}}$$

$$\text{سطح هسته استاتور} = L_i \times d_{CS}$$

$$B_{CS} = 1.2 - 1.4 \text{ T}$$



شکل ۵-۲- ابعاد هسته استاتور

$$\rightarrow d_{CS} = \frac{\varphi_m}{2 B_{CS} L_i}$$

$$D_0 = D + 2 d_{CS} + 2 d_{SS} \text{ : قطر خارجی هسته استاتور}$$

۵-۵- طول فاصله هوایی

نکاتی در انتخاب طول فاصله هوایی:

۱- ضریب توان

فاصله هوایی بزرگ تر ← جریان مغناطیس کنندگی بیشتر ← ضریب توان کمتر

← انتخاب فاصله هوایی کوچک برای حصول ضریب توان خوب

۲- ظرفیت اضافه بار

طول فاصله هوایی بزرگ تر ← کمتر شدن مقاومت القایی پراکندگی به خاطر کاهش مقاومت القایی پراکندگی زیگزاگ ← افزایش ظرفیت اضافه بار

۳- کشش مغناطیسی نامتعادل

اهمیت زیاد نامحوری در ماشین با طول فاصله هوایی کوچک

۴- خنک شدن

طول فاصله هوایی بزرگ ← بهبود سیستم تهویه

۵-۵-۱- محاسبه طول فاصله هوایی

$$lg = 0.2 + 2\sqrt{DL} \quad \text{mm} \quad (D \text{ و } L \text{ بر حسب متر})$$

با داشتن طول فاصله هوایی، در نهایت قطر رتور از رابطه زیر بدست می آید:

$$D_r = D - 2lg \quad \text{قطر رتور}$$

۵-۶-۱- طرح رتور قفس سنجابی

۵-۶-۱- تعداد شیارهای رتور

سیم پیچی توزیع شده، شیاردار بودن، اشباع و عدم یکنواختی طول فاصله هوایی ← ایجاد هارمونیک های میدان (شار) و نتیجتاً القاء ولتاژ و هارمونیک های جریان ناشی از هارمونیک های میدان.

← ایجاد هارمونیک های گشتاور به خاطر تأثیر متقابل هارمونیک های میدان و هارمونیک های جریان القایی.

✓ رفتار نامناسب ماشین با انتخاب ترکیب بدی از شیارهای استاتور و رتور.

۱- هارمونیک‌های گشتاور القایی

سیم‌پیچی سه‌فاز حامل جریان سینوسی ← تولید هارمونیک شار با مرتبه $n = 6N \pm 1$

✓ سرعت هارمونیک مزبور $\frac{1}{n}$ سرعت سنکرون است.

هارمونیک‌های مزبور باعث القاء جریان و در نتیجه تولید گشتاور القایی هارمونیکی در سرعت‌های زیر سرعت سنکرون می‌شوند. اگر تعداد شیارهای رتور از 60% تعداد شیارهای استاتور بیشتر باشد، اثر گشتاور هارمونیکی قابل ملاحظه می‌گردد.

۲- هارمونیک‌های گشتاور سنکرون

شیاردار بودن استاتور و رتور باعث ایجاد هارمونیک‌های شار با مرتبه $6Aq \pm 1$ می‌گردد.

(S_s : تعداد شیارهای استاتور) $q = \frac{S_s}{P \times 3}$: تعداد شیار در قطب در فاز

برای $A = 1$ داریم:

مرتبه هارمونیک‌های استاتور: $n = 6q \pm 1 = 2\frac{S_s}{P} + 1$

هارمونیک‌های مزبور در سرعت $\frac{1}{n}$ سرعت سنکرون می‌چرخند.

مرتبه هارمونیک‌های رتور: $n' = 2\frac{S_r}{P} \pm 1$

که در $\frac{1}{n'}$ سرعت سنکرون می‌چرخند.

تساوی سرعت‌ها $\Rightarrow 2\frac{S_s}{P} \pm 1 = 2\frac{S_r}{P} \pm 1$

← ماشین در سرعت ثابت زیر سرعت سنکرون شروع به کاهش سرعت می‌کند.

✓ یک احتمال برای تحقق این موضوع وقتی است که $S_s = S_r$ (تعداد شیارهای استاتور برابر با

تعداد شیارهای رتور باشد) ← قفل شدن ماشین و جلوگیری از راه‌اندازی

← نابرابری تعداد شیارهای استاتور و رتور در طراحی برای جلوگیری از این مسئله

$$2 \frac{S_s}{P} + 1 = 2 \frac{S_r}{P} - 1 \Rightarrow S_s - S_r = P$$

یک احتمال دیگر:

۳- گشتاورهای ارتعاشی

وجود نیروهای شعاعی به خاطر شیاردار بودن استاتور و روتور \Leftarrow ارتعاشات رتور

\Leftarrow ایجاد نویز در صورت رخ دادن تشدید بین ارتعاشات رتور با فرکانس‌های طبیعی رتور

$$S_s - S_r = \pm 2 \pm 2p \quad \text{یا} \quad S_s - S_r = \pm 1 \pm p \quad : \text{ایجاد نویز زیاد در صورتی که}$$

۵-۶-۲- جریان میله رتور

اثبات می‌شود:

$$I_b = 0.85 \times \frac{6 T_s I_s}{S_r} \quad : \text{جریان میله}$$

T_s و I_s : تعداد دور و جریان استاتور

S_r : تعداد شیار رتور

$$a_b = \frac{I_b}{\delta_b} \quad : \text{سطح مقطع هر میله} \quad \delta_b = 4 - 7 \text{ A/mm}^2 \quad : \text{چگالی جریان}$$

برای یک گروه میله زیر یک گام قطب، جهت جریان در نصف میله‌ها یکسان اند. در صورتی که جریان‌ها در یک لحظه به ماکزیمم برسند، داریم:

$$\text{جریان میله} \times \frac{\text{تعداد میله‌ها}}{2} = \text{مقدار حداکثر جریان حلقه}$$

$$= \frac{S_r}{2P} I_b (\text{max})$$

در عمل جریان‌های میله‌ها همزمان به ماکزیمم خود نمی‌رسند، در نتیجه:

مقدار مؤثر جریان میله : حداکثر جریان حلقه اتصال کوتاه شده

$$I_{e(\max)} = \frac{2}{\pi} \times \frac{S_r}{2P} \times I_b(\max)$$

$$= \frac{S_r}{\pi P} \times \sqrt{2} I_b$$

مقدار مؤثر جریان میله

مقدار مؤثر جریان حلقه : $I_e = \frac{I_{e(\max)}}{\sqrt{2}} = \frac{S_r I_b}{\pi P}$

در نهایت، سطح مقطع حلقه (ae) برابر است با:

$$a_e = \frac{I_e}{\delta_e} = \frac{S_r I_b}{\pi P \delta_e}$$

δ_e : چگالی جریان در حلقه

۵-۶-۳- دندانه رتور

انتخاب حداقل عرض رتور برای چگالی شار ماکزیمم 1.7 T

$$W_{tr, \min} = \frac{\text{شار قطب}}{\text{طول خالص} \times \text{شیار بر قطب} \times \text{حداکثر چگالی شار}} = \frac{\phi_m}{1.7 \times \frac{S_r}{p} \times L_i}$$

۵-۶-۴- هسته رتور

ضخامت هسته رتور = $\frac{\phi_m}{2 B_{cr} L_i}$

چگالی شار در هسته استاتور = چگالی شار در هسته رتور

مسئله طراحی: موتور القایی سه فاز قفس سنجایی 2.2 KW, 400 V, 50 Hz با سرعت سنکرون 1500rpm طرح کنید. ماشین به روش ستاره مثلث راه اندازی میشود. بازده موتور در بار کامل 0.8 و ضریب توان 0.825 میباشد.

حل:

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

$$\text{تعداد قطب : } p = \frac{2f}{n_s} = \frac{2 \times 50}{25} = 4$$

در طراحی این ماشین هزینه مورد توجه قرار می گیرد و بازده و ضریب توان اهمیت کمتری دارد.

در طرح ماشین ارزان بارگیری مخصوص الکتریکی و مغناطیسی مقادیر بزرگ دارند:

$$\text{چگالی شار متوسط : } B_{av} = 0.44 \text{ T}$$

$$\text{آمپر هادی بر متر : } ac = 21000$$

$$\text{ضریب سیم پیچی : } K_w = 0.955$$

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

$$\text{ثابت توان خروجی : } C_0 = 11 K_w B_{av} ac \times 10^{-3}$$

$$= 11 \times 0.955 \times 0.44 \times 21000 \times 10^{-3} = 97$$

$$D^2 L = \frac{Q}{C_0 n_s} = \frac{3.33}{97 \times 25} = 0.001375 \text{ m}^3 = 1375 \text{ cm}^3$$

جداسازی D و L:

$$\text{برای طرح اقتصادی : } \frac{L}{\tau} = 1.5$$

$$\Rightarrow \frac{L}{\pi D/4} = 1.5 \rightarrow \frac{L}{D} = 1.18 \xrightarrow{D^2 L = 1375} \begin{cases} D = 10.5 \text{ cm} \\ L = 12.5 \text{ cm} \end{cases}$$

$$L_i = 0.9 \times 12.5 = 11.25 \text{ cm}$$

$$\tau = \frac{\pi D}{P} = 8.25 \text{ cm}$$

سیم‌پیچی : ماشین برای اتصال مثلث طرح می شود.

$$E_s = 400 \text{ V}$$

$$\phi_m = B_{av} \tau L = 0.44 \times 0.0825 \times 0.125 = 4.54 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$T_s = \frac{E_s}{4.44 f \phi_m K_{ws}} = \frac{400}{4.44 \times 50 \times 4.54 \times 10^{-3} \times 0.955} = 416$$

$$q_s = 2$$

$$S_s = 3 \times 4 \times 2 = 24$$

$$y_{ss} = \frac{\pi \times 105}{24} = 3.75 \text{ mm}$$

$$6 T_s = 2496$$

$$Z_{ss} = \frac{2496}{24} = 104$$

مشخصات هادی:

$$I_s = \frac{2.2 \times 10^3}{3 \times 400 \times 0.8 \times 0.825} = 2.77 \text{ A}$$

با انتخاب چگالی جریان 4 A/mm^2 ، سطح مقطع هادی استاتور به صورت زیر بدست می آید:

$$\text{سطح هر هادی} = \frac{2.77}{4} = 0.6925 \text{ mm}^2$$

با داشتن مساحت هادی، قطر آن قابل محاسبه است:

$$\text{قطر هادی} = 0.94 \text{ mm}$$

نزدیک‌ترین هادی استاندارد دارای قطر $d = 0.95 \text{ mm}$ است. بنابراین، سطح مقطع هادی به صورت زیر اصلاح می شود:

$$a_s = \frac{\pi}{4} \times 0.95^2 = 0.709 \text{ mm}^2$$

ابعاد شیار:

$$Z_{SS} a_s = 104 \times 0.709 = 73.6 \text{ mm}^2$$

با انتخاب ضریب فضا برابر 0.4 برای شیارها:

$$\text{فضای لازم برای هادیها (مساحت شیار)} = \frac{73.6}{0.4} = 184 \text{ mm}^2$$

عرض حداقل دندانه استاتور:

$$W_{ts, \min} = \frac{\varphi_m}{1.7 \times \frac{S_s}{p} \times L_i} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{1.7 \times \frac{24}{4} \times 0.1125} = 0.00395 \text{ m} = 3.95 \text{ mm}$$

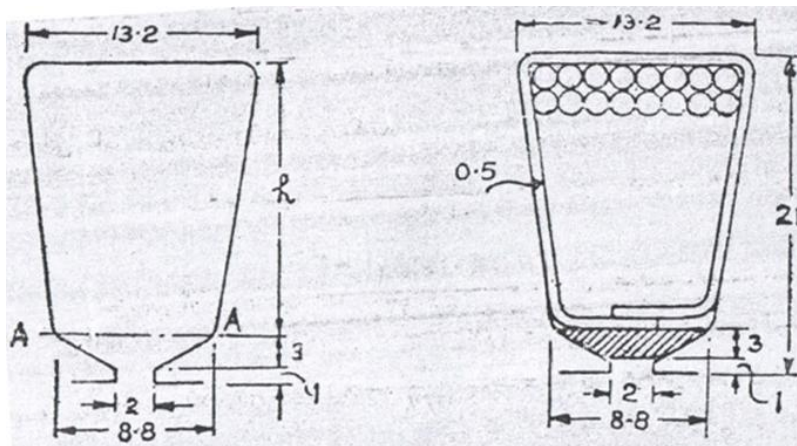
یک دندانه با عرض 6 mm در نظر می‌گیریم:

عرض دندانه

(ابعاد شیار در شکل ۳-۵)

$$\text{عرض شیار در AA} = \frac{\pi(105+2 \times 4)}{24} - 6 = 8.8 \text{ mm}$$

$$\text{عرض شیار در ته آن} = \frac{\pi(105+2(4+h))}{24} - 6 = 8.8 + \frac{\pi \times h}{12}$$



شکل ۳-۵- شیار استاتور (تمام ابعاد به میلیمتر)

$$\text{دار هادی قسمت هادی} = \frac{1}{2} h \left(8.8 + \frac{\pi h}{12} + 8.8 \right) = 184 \text{ mm}^2 \rightarrow h = 17 \text{ mm}$$

$$\text{عرض شیار در ته آن} = 8.8 + \frac{\pi \times 17}{12} = 13.2 \text{ mm}$$

$$\rightarrow d_{ss} = 17 + 4 = 21 \text{ mm}$$

$$\text{طول حلقه متوسط} : L_{mts} = 2L + 2.3 \tau + 24$$

$$= 2 \times 12.5 + 2.3 \times 8.25 - 24 = 86 \text{ cm}$$

$$\text{عرض دندان} : W_{ts} = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$$

$$\text{چگالی شار در دندان استاتور} = \frac{\varphi_m}{\frac{S_s}{p} W_{ts} L_i} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{\frac{24}{4} \times 0.006 \times 0.1125} = 1.12 \text{ T}$$

مقدار خوبی است چون اشباع اتفاق نمی افتد.

$$\text{ارتفاع دندان استاتور} = 21 \text{ mm}$$

$$\text{شار در هسته استاتور} = \frac{4.54 \times 10^{-3}}{2} = 2.27 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

چگالی شار را 1.2 T فرض می کنیم.

$$\text{سطح هسته استاتور} : A_{cs} = \frac{2.27 \times 10^{-3}}{1.2} = 1.89 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{ضخامت هسته استاتور} : d_{cs} = \frac{1.89 \times 10^{-3}}{0.1125} = 1.68 \text{ cm}$$

طول فاصله هوایی:

$$l_g = 0.2 + 2\sqrt{DL} = 0.2 + 2\sqrt{0.105 \times 0.125} = 0.43 \text{ mm}$$

انتخاب فاصله هوایی کوچکتر برای جریان مغناطیس کنندگی کمتر: $l_g = 0.3 \text{ mm}$

شیارهای رتور : $S_r = 22$

ترکیب $S_r = 22$, $S_s = 24$ ایجاد سرو صدا می کند که در ماشین کوچک چندان مهم نیست.

میله های رتور:

$$I_b = 0.85 \frac{6T_s I_s}{S_r} = 267 \text{ A}$$

انتخاب چگالی جریان بالا در میله های رتور برای حصول گشتاور راه اندازی خوب:

$$\delta = 6 \text{ A/mm}^2 \rightarrow \text{سطح هر میله} = \frac{267}{6} = 40.5 \text{ mm}^2$$

هادی مورد استفاده که در بازار موجود است، 7 mm ضخامت و 6.5 mm عرض دارد. در نتیجه:

$$a_b = 44.5 \text{ mm}^2 \text{ : سطح مقطع میله استفاده شده}$$

$$L_b = 12.5 + 2 \times 1.5 + 1 = 16.5 \text{ cm} \text{ : طول هر میله}$$

گسترش یافتن میله در طرفین

به خاطر مورب شدن

$$r_b = \frac{0.021 \times 0.165}{44.5} = 0.78 \times 10^{-4} \Omega \text{ : مقاومت هر میله}$$

$$= r_b I_b^2 = 0.78 \times 10^{-4} \times 267^2 = 5.6 \text{ W} \text{ تلفات مسی هر میله}$$

$$= S_r r_b I_b^2 = 22 \times 5.6 = 123 \text{ W} \text{ تلفات مسی میله های رتور}$$

حلقه های اتصال کوتاه شده رتور:

$$I_e = \frac{S_r I_b}{\pi p} = \frac{22 \times 267}{\pi \times 4} = 467 \text{ A} \text{ : جریان حلقه}$$

با فرض $\delta_e = 6 \text{ A/mm}^2$ برای حلقه داریم:

$$a_e = \frac{467}{6} = 78 \text{ mm}^2 \text{ : سطح مقطع حلقه}$$

حلقه استاندارد به مقطع $10 \times 8 \text{ mm}^2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$r_e = \frac{\rho \pi D_e}{a_e} = \frac{0.021 \times \pi \times 0.0758}{80} = 0.625 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\text{تلفات مسی در دو حلقه} = 2 r_e I_e^2 = 2 \times 0.625 \times 10^{-4} \times 467^2 = 27 \text{ W}$$

$$\text{تلفات مسی کل در رتور} = 123 + 27 = 150 \text{ W}$$

$$\frac{\text{تلفات مسی رتور}}{\text{توان خروجی}} = \frac{150}{2200} = \frac{S}{1 - S} \rightarrow S = 6 \%$$

لغزش بار کامل که برای ماشین 2.2 kW مناسب است.

هسته رتور: مقدار ضخامت هسته رتور مساوی ضخامت هسته استاتور در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{ضخامت هسته رتور} : d_{cr} = 1.7 \text{ cm}$$

$$\text{قطر داخلی رتور} : D_i = D_r - 2 d_{cr} - 2 d_{sr} = 10.44 - 2 \times 0.93 - 2 \times 1.7 = 5.18 \text{ cm}$$