

بررسی سازوکارهای انتقال حرارت در موتورهای سنکرون مغناطیسی دائم (PMSM)

سعید زینالی هریس*^۱، پدram وثوقی^۲

^۱ استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

چکیده

استفاده وسیع از موتورهای الکتریکی، مهندسين را بر آن می‌دارد که در طراحی، بهره‌برداری و کنترل موتورهای الکتریکی دقت لازم را مبذول دارند. در این پژوهش به بررسی سازوکارهای انتقال حرارت در موتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته می‌شود. ابتدا تک‌تک بخش‌های موتور سنکرون مغناطیس دائم معرفی شده و سپس انتقال حرارت در این بخش‌ها بررسی می‌شود. مهم‌ترین قسمت موتور از نظر حساسیت و اهمیت انتقال حرارت بهتر برای دقت بیشتر روی آن، مارپیچ‌ها هستند که قبل از قسمت‌های دیگر موتور آسیب می‌بینند. همچنین دومین قسمت موتور از نظر اهمیت انتقال حرارت بیشتر و بهتر، فاصله هوایی است. مورد بعدی که باید مد نظر گرفته شود، فاصله فصل مشترک بین بدنه (فریم) و استاتور است که در زمان طراحی می‌توان از فاصله‌های بسیار بزرگ خودداری کرد. همچنین در مطالعه دقیق‌تر انتقال حرارت قابل ذکر است که بیش‌ترین انتقال حرارت جابجایی در فاصله هوایی، انتهای مارپیچ و داخل و خارجی موتور است و همچنین بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت هدایتی در استاتور، روتور و آهنرباهای مغناطیسی دائم است.

کلمات کلیدی: PMSM، انتقال حرارت جابجایی، موتور سنکرون مغناطیس دائم، فاصله هوایی، روتور

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، موتورهای القایی در بسیاری از کاربردهای صنعتی در گستره توان کم و متوسط با رفتار قابل قبول نسبت به موتورهای DC ترجیح داده شده‌اند. این ترجیح به دلیل خصوصیات ذاتی نظیر: چگالی شار بالا در فاصله هوایی، نسبت توان به وزن بالا، لختی کم، نسبت بالای گشتاور تولیدی به ممان اینرسی محور روتور، شتاب‌گیری سریع، گستره وسیع سرعت، ظرفیت گشتاور بالا، سادگی، عملیات نگهداری، ضریب توان و بازده مناسب‌تر نسبت به موتورهای DC است. در شرایط کار با نهایت کارایی موتور مانند تجهیزات آزمایشگاهی، سانتیریفیوژها، صنایع پتروشیمی و کنترل موقعیت و کاربردهای رباتیک از موتورهای PMSM^۱ استفاده می‌شود [۱-۲].

مطالعات مختلفی در راستای بررسی انتقال حرارت در موتورهای سنکرون مغناطیسی دائم انجام گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به بررسی انتقال حرارت توسط آسف و همکاران [۳] اشاره کرد که یک تجزیه و تحلیل حرارتی سه بعدی بر اساس یک سیستم خنک کننده جاسازی شده با تعداد زیادی از مجراها برای دستگاه‌های سنکرون مغناطیسی دائمی انجام شده است. در این مطالعه، هسته استاتور به علت افزایش دما در آن، جداگانه بررسی شده است. در این مقاله، مطالعه کاربردی با هدف کاهش درجه حرارت مدل متعارف در هسته استاتور از طریق کانال‌های جریان شعاعی و محوری انجام شده است.

همچنین در مطالعه‌ای که توسط پیرون و همکاران [۴] صورت گرفته است، روش جدیدی برای استفاده از میله‌های مس به عنوان مسیر انتقال اضافی انتقال حرارت بین دندانه‌های استاتور و استخرهای خنک کننده مایع در سپرهای انتهایی مطالعه شده است. پس از این، انتهای سیم پیچ‌ها همچنان از هدایت حرارتی کم‌تری رنج می‌برند که در این مقاله برای بهبود انتقال حرارت، از موادی با هدایت گرمایی بالا مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های حرارتی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی^۲ برای تجزیه و تحلیل توزیع دما در دستگاه استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این مراحل می‌توانند بهبود قابل توجهی در خنک‌سازی داشته باشند.

در مطالعه‌ای که توسط فانگ و همکاران [۵] نیز ارائه شد، اشاره شده است که استراتژی خنک کردن برای PMSM‌ها همچنان یک مشکل درزمینه مهندسی حرارتی است. این مطالعه جدیدترین روش مدیریت حرارتی را بر مبنای لوله‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده برای PMSM ارائه می‌دهد.

در مطالعه دیگری که توسط وانگ و همکاران [۶] انجام گرفته است، یک رویکرد مدیریت حرارتی جدید با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده^۳ برای یک موتور سنکرون مغناطیسی دائم اعمال شده که در سامانه‌های هواپیما مورد استفاده واقع شده است. در این پژوهش یک مدل سه بعدی ساده از PMSM با یک پوشش ویژه بسته بندی شده با - paraffin PCM ساخته شده است. با استفاده از روش المان محدود، تأثیر تنظیمات حفره پارافین و انواع مختلف پارافین بر اثر خنک کننده گذرا روکش‌ها، تحت شرایط مختلف دوره‌های مختلف بار حرارت و دمای محیط مختلف، شبیه سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی پوشش محکم موتور با استفاده از این محفظه مبتنی بر پارافین، زمان مؤثر برای کنترل دمای PMSM می‌تواند حدود ۳۲/۷ درصد افزایش یابد بخصوص

1- Permanent magnet synchronous motor (موتور سنکرون مغناطیسی دائم)

2- CFD

3- PCM

زمانی که موتور در حالت مداوم کار می‌کند. همچنین حداکثر دمای PMSM زمانی که PMSM تحت یک حالت دوره‌ای عمل می‌کند، می‌تواند آشکارا کاهش می‌یابد.

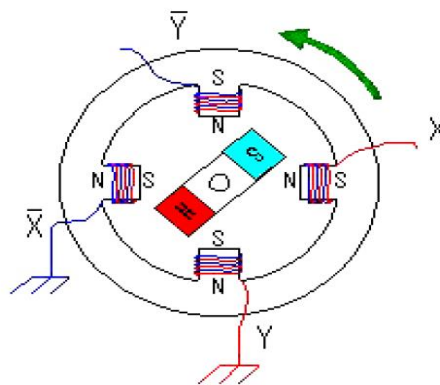
باتوجه به اهمیت انتقال حرارت در کارکرد صحیح موتورهای القایی، در این مقاله سازوکارهای انتقال حرارت در موتور سنکرون مغناطیس دائم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور ابتدا بخش‌های مختلف موتور سنکرون مغناطیس دائم معرفی شده و پس از آن مکانیسم انتقال حرارت در هر کدام از بخش‌ها بر اساس مطالعات قبلی و منابع مختلف بررسی می‌شود.

۲- معرفی موتور سنکرون

موتور سنکرون مغناطیس دائم در حقیقت یک موتور سنکرون معمولی است (شکل ۱ و ۲) که در آن به جای تحریک سیم‌پیچی شده روتور، جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان، از آهنربای دائم استفاده شده است. در نتیجه از نظر تعمیر، نگهداری و میزان استهلاک، در موقعیت بهتری نسبت به ماشین‌های القائی و DC قرار می‌گیرند و همچنین تلفات مسی در هادی‌های تحریک روتور حذف شده و لذا باعث افزایش راندمان ماشین می‌گردد و نیز به دلیل محدود شدن تلفات به مس و آهن استاتور، فرایند خنک‌سازی از طریق بدنه استاتور آسان‌تر صورت می‌پذیرد بنابراین افزایش راندمان و کوچک‌تر سازی حجم ماشین را امکان‌پذیر می‌سازد [۱-۲]



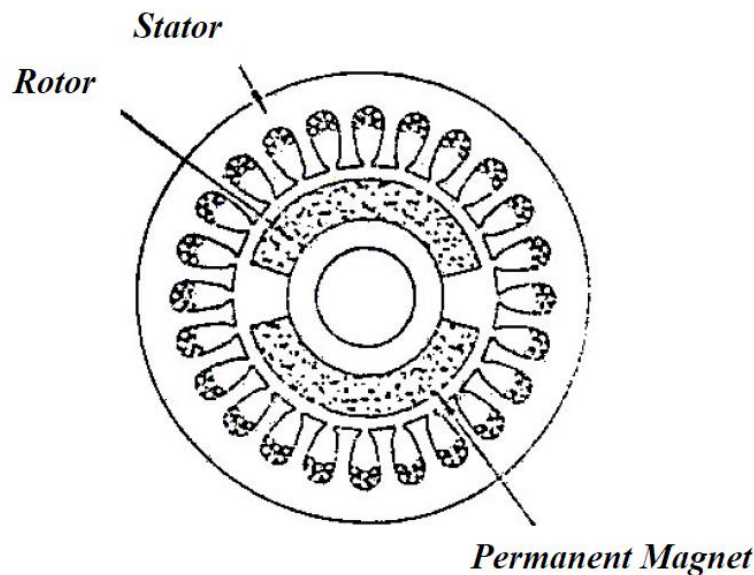
شکل ۱. موتور سنکرون مغناطیسی دائم [۲].



شکل ۲. شمای ساده موتور سنکرون مغناطیس دائم [۲].

بخش استاتور در موتور سنکرون مغناطیس دائم همانند بخش استاتور در موتورهای القائی است و نیروی محرکه مورد نیاز آن، سینوسی است. جریان استاتور در این گونه موتورها باید سینوسی باشد تا به گشتاور یکنواختی در این گونه موتورها دست یابیم. برشی از سطح مقطع یک موتور سنکرون مغناطیس دائم دوقطبه در شکل ۳ نشان داده شده

است. در این شکل قسمت‌هایی از موتور سنکرون مغناطیس دائم مانند روتور، استاتور و آهنربای مغناطیسی دائم نیز نشان داده شده‌اند [۷].



شکل ۳. برشی از یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم [۷]

۱-۲- ساختمان موتور سنکرون مغناطیس دائم

اجزای اصلی ساختمان یک ماشین سنکرون مغناطیس عبارت‌اند از [۲،۸]:

استاتور

شامل دو بخش است:

الف- ورقه‌های استاتور که همانند موتورهای القائی و سنکرون از فولاد مغناطیسی نرم تهیه می‌شود.

ب- سیم‌پیچی استاتور که به صورت سه فاز یا تک فاز و معمولاً دولایه (با توجه به مزایای دوطبقه) و به طور متناوب (یک‌درمیان) روی هم بسته می‌شوند. کلاف‌های خاص هر گروه به یکدیگر وصل می‌شوند تا گروه فاز را تشکیل دهند. به هنگام سیم‌پیچی استاتور به منظور کاهش هماهنگ ولتاژ، سیم بندی معمولاً به صورت گام کسری اجرا می‌شود. در سیم بندی موتورهای مغناطیس دائم کوچک به جای روش معمول سیم‌پیچی، از سیم‌پیچی سلونوئیدی استفاده می‌شود [۲،۸-۹].

فاصله هوایی

فاصله هوایی یک مشخصه ویژه برای موتورهای دوار است که در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، تعیین کننده نقطه کار مغناطیس دائم در حالت بی‌باری ماشین است. طول فاصله هوایی در طراحی مکانیکی و ساختمانی موتور مؤثر است. با این وجود با افزایش فاصله هوایی نیاز به آهنربای دائم با نیروی مغناطیسی قوی‌تر وجود دارد [۲،۸-۹].

روتور

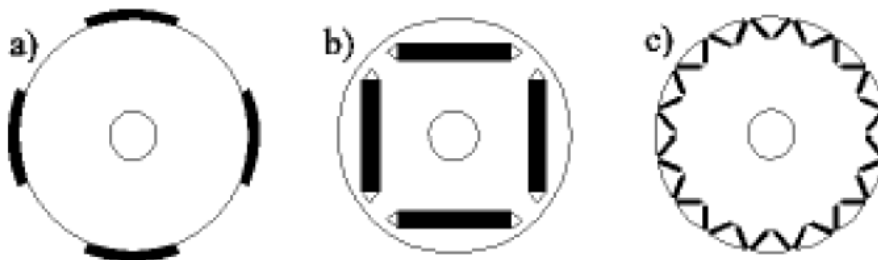
به منظور حصول به ثابت زمانی مکانیکی کوچک بایستی روتور را با نسبت بالای طول به قطر (L/D) ساخت. روتور در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به ۴ گروه تقسیم می‌شوند [۲،۸-۹]:

الف- موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای روی سطح (SPM)^۴ که آهنربای دائم روی سطح روتور قرار می‌گیرد. برای نصب آهنربا، روی سطح روتور از چسب‌های اپوکسی استفاده می‌شود.

ب- موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای داخلی (IPM)^۵ که آهنربای دائم داخل روتور قرار گرفته است. ساخت IPMها مشکل‌تر است.

ج- موتور سنکرون مغناطیس دائم قطب چنگالی که در این نوع ماشین دیسک‌هایی که در طول محورشان مغناطیس شده‌اند، کنار هم پیچیده می‌شوند تا یک حالت چنگالی شکل به وجود آید.

د- موتور سنکرون مغناطیس دائم متقاطع یا اریب (TPM)^۶ که در این نوع ماشین آهنربای دائم بین آهن نرم قرار گرفته و فوران به صورت محیطی است. در شکل ۴ سه آرایش رایج‌تر در ساخت روتور موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نشان داده شده است.



شکل ۴. آرایش‌های مختلف روتور موتور سنکرون مغناطیس دائم (a) SPM (b) IPM (c) TPM [۷]

بخش‌های مختلف PMSM، مانند ورقه‌های فلزی، استاتور، بدنه و... می‌توانند به‌عنوان منبع در نظر گرفته شوند. انتقال حرارت هدایتی به علت وجود اختلاف دما بین دو المان اتفاق می‌افتد. انرژی حرارتی از یک منطقه گرم به یک منطقه سرد انتقال پیدا می‌کند و با قانون فوریه به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$q = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

که q میزان انتقال حرارت، ∂T اختلاف دما در جهت شار حرارتی و λ یک پارامتر مثبت به نام ضریب انتقال حرارت هدایتی است. همچنین مقاومت گرمایی عبارت است از [۱۰]:

$$R_{th} = \frac{t}{A\lambda} \quad (2)$$

که t ضخامت المان است.

همچنین در انتقال حرارت جابجایی نیز، انتقال حرارت توسط یک سیال یا گاز انجام می‌پذیرد که میزان انتقال حرارت جابجایی به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (3)$$

که در آن T_w دمای المان، T_∞ دمای سیال، A سطح انتقال حرارت و h ضریب انتقال حرارت جابجایی است. همچنین مقاومت انتقال حرارت جابجایی عبارت است از [۱۰]:

$$R_{th} = \frac{1}{Ah} \quad (4)$$

۴- موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای روی سطح

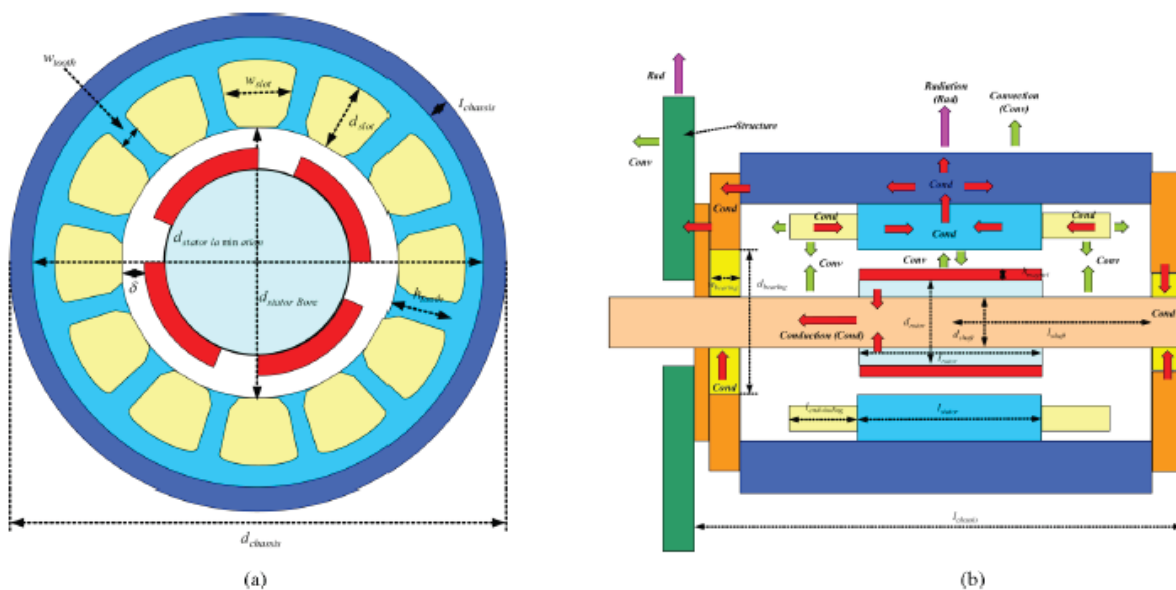
۵- موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنربای داخلی

۶- موتور سنکرون مغناطیس دائم متقاطع یا اریب

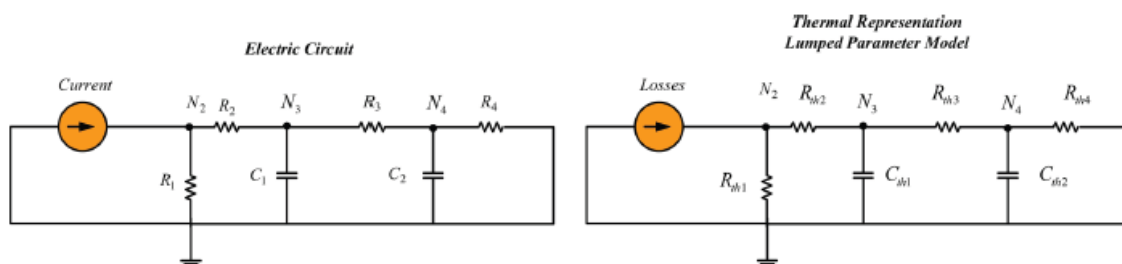
همچنین انرژی ذخیره شده گرمایی در گره‌های مختلف به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$C_{th} = mC_p \quad (۵)$$

که در آن m جرم ماده، C_p ظرفیت ویژه گرمایی و C_{th} انرژی ذخیره شده گرمایی است. در شکل ۵، (a)، اجزای مختلف موتور و همچنین مقاومت‌های گرمایی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵، (b)، انتقال حرارت بین قسمت‌های مختلف نشان داده شده است. فلش‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده انتقال حرارت هدایتی (Cond)، فلش‌های سبز رنگ نشان‌دهنده انتقال حرارت جابجایی (Conv) و فلش‌های بنفش نشان‌دهنده انتقال حرارت تشعشعی (Rad) است. همچنین باید اشاره کرد که انتقال حرارت تشعشعی درون موتور هم وجود دارد که به علت سهم بسیار کم آن از آن صرف نظر شده است. تمام انواع انتقال حرارت در شکل ۵، (b) توسط فلش‌ها نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۵. اجزای مختلف موتور و انتقال حرارت بین قسمت‌های مختلف [۱۰]



شکل ۶. میزان اتلاف حرارتی در قسمت‌های مختلف موتور [۱۰]

در شکل ۶، میزان اتلاف حرارتی در قسمت‌های مختلف موتور نشان داده شده است. پس از بررسی معادلات انتقال حرارت در ابتدای بحث، باید اشاره کرد که بعضی از ضرایب انتقال حرارت باید به صورت تجربی محاسبه شوند که در منابع [۱۱-۱۴] به آن پرداخته شده است. کایلاندر^۷ ضرایب انتقال حرارت جابجایی برای بخش‌های مختلف موتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه داده است که به علت اینکه این روابط به صورت وسیعی در سرعت‌های مختلف موتور

مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این مقاله به معرفی آن‌ها پرداخته شده است و در بخش‌های بعدی و در جدول ۳ به معرفی این ضرایب پرداخته می‌شود. ضرایب انتقال حرارت استفاده شده برای محاسبه مقاومت انتقال حرارت جابجایی در جدول ۱ آورده شده است. قابل ذکر است که R مقاومت انتقال حرارت جابجایی، U_r سرعت جانبی موتور، S سطح انتقال حرارت جابجایی و e ضخامت شکاف هوایی است [۱۰].

جدول ۱. مقاومت‌های گرمایی به تفکیک بخش‌های مختلف [۱۰]

بخش مورد نظر	مقاومت گرمایی
فاصله (شکاف) هوایی	$R_g = 1 / (h_{airgap} S_{airgap})$ $h_{airgap} = \lambda_{air} Nu(2e)$
انتهای مارپیچ - هوای داخل انتهای مارپیچ - بدنه	$R_{b1} = 1 / (S_{endwinding1} h_{housing})$ $R_{b2} = 1 / (S_{endwinding2} h_{housing})$
روتور - هوای داخل	$R_{rot-inair} = 1 / (S_{innerair} h_{rot})$
هوای داخل - صفحه انتهایی	$R_{end-inair} = 1 / (S_{endplate} h_{plate})$
بدنه - هوای خارج صفحه انتهایی - هوای خارج	$R_{air-housing} = 1 / (S_{housing} h_{air})$ $R_{air-end plate} = 1 / (S_{endplate} h_{air})$

۳- مقاومت‌های گرمایی

همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شده است، مقاومت گرمایی از رابطه ۲ و ۴ به دست می‌آید [۳] مقاومت‌های گرمایی به تفکیک در جدول ۲ آورده شده است [۱۰].

جدول ۲. پارامترها و مقاومت‌های انتقال حرارت هدایتی [۱۱]

بخش‌های موتور	مقاومت و ظرفیت گرمایی
شکاف	$R_{e1} = R_{e2} = h_s / (2\lambda_r W_s L_m)$ $R_{e3} = R_{e4} = W_s / (2\lambda_r h_s L_m)$ $R_{eax} = L_m / (\lambda_a h_s W_s)$ $C_{enc} = c_{pe} \rho_e V$
شکاف خطی	$R_{ins} = t_{ins} / (S_{ins} \lambda_{ins})$
دندان	$R_{da} = R_{db} = h_t / (\lambda_r W_t L_m)$ $R_{dc} = W_t / (2\lambda_r h_t L_m)$ $R_{dax} = 2L_m / (\lambda_a h_t W_t)$ $C_d = c_{pe} \rho_e V_t$
یوغ استاتور	$R_{culsb} = (1 - (2r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2)) / (2\alpha\lambda_r)$ $R_{culsa} = ((2r_1^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2) - 1) / (2\alpha\lambda_r)$ $R_{culksax} = L_m / (\alpha\lambda_r (r_1^2 - r_2^2))$ $C_d = c_{pe} \rho_e V_{housing}$
بدنه	Radial: $R_{hra} = \ln(r_1/r_2) / (\alpha L \lambda_{ai})$ Axial: $R_{flax} = L / (\alpha \lambda_{ai} (r_1^2 - r_2^2))$ $C_h = c_{pal} \rho_{pal} V_{housing}$
صفحه انتهایی	Radial: $R_{flra} = \ln(r_1/r_2) / (\alpha L \lambda_{endplate})$ Axial: $R_{flax} = t_{end-plate} / (\alpha \lambda_r (r_1^2 - r_2^2))$ $C_{end-plate} = c_{pal} \rho_{pal} V_{housing}$
آهنربای دائم	$R_{apb} = (1 - (2r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2)) / (2\alpha\lambda_{ap})$ $R_{apa} = ((2r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2) - 1) / (2\alpha\lambda_{apr})$ $R_{apax} = L / (\alpha \lambda_{ai} (r_1^2 - r_2^2))$ $C_{ap} = c_{pal} \rho_{ap} V_{ap}$
یوغ روتور	$R_{culrb} = (1 - (2r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2)) / (2\alpha\lambda_{ap})$ $R_{culra} = ((2r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2)) \ln(r_1/r_2) - 1) / (2\alpha\lambda_{apr})$ $R_{culrax} = L / (\alpha \lambda_{ai} (r_1^2 - r_2^2))$

شفت
انتهای مارپیچ‌ها

$$C_{culr} = c_{pe} \rho_e V_{curl}$$

$$C_a = c_p s h p_{sh} V_{sh}$$

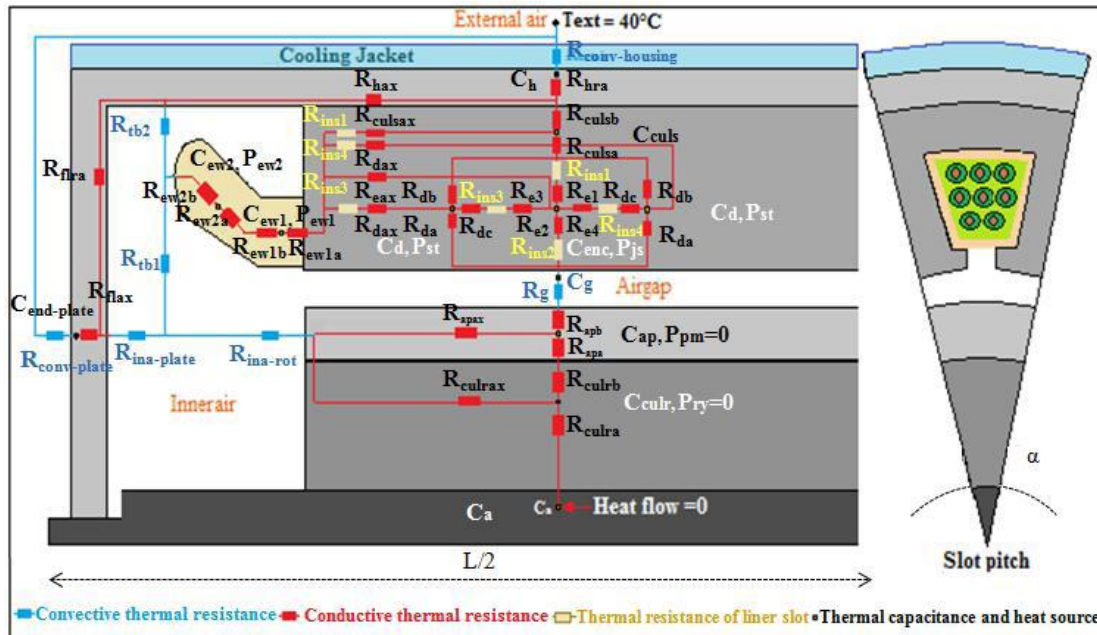
$$R_{ew1a} = R_{ew1b} = L_{ew-front} / (2 \lambda_{cop} k_{fill} h_s W_s)$$

$$C_{ew1} = c_{pe} \rho_e V_{ew}$$

$$R_{ew2a} = R_{ew2b} = t_{ew-ring} / (2 \lambda_{cop} S_{ew-ring})$$

$$C_{ew2} = c_{pe} \rho_e V_{ew}$$

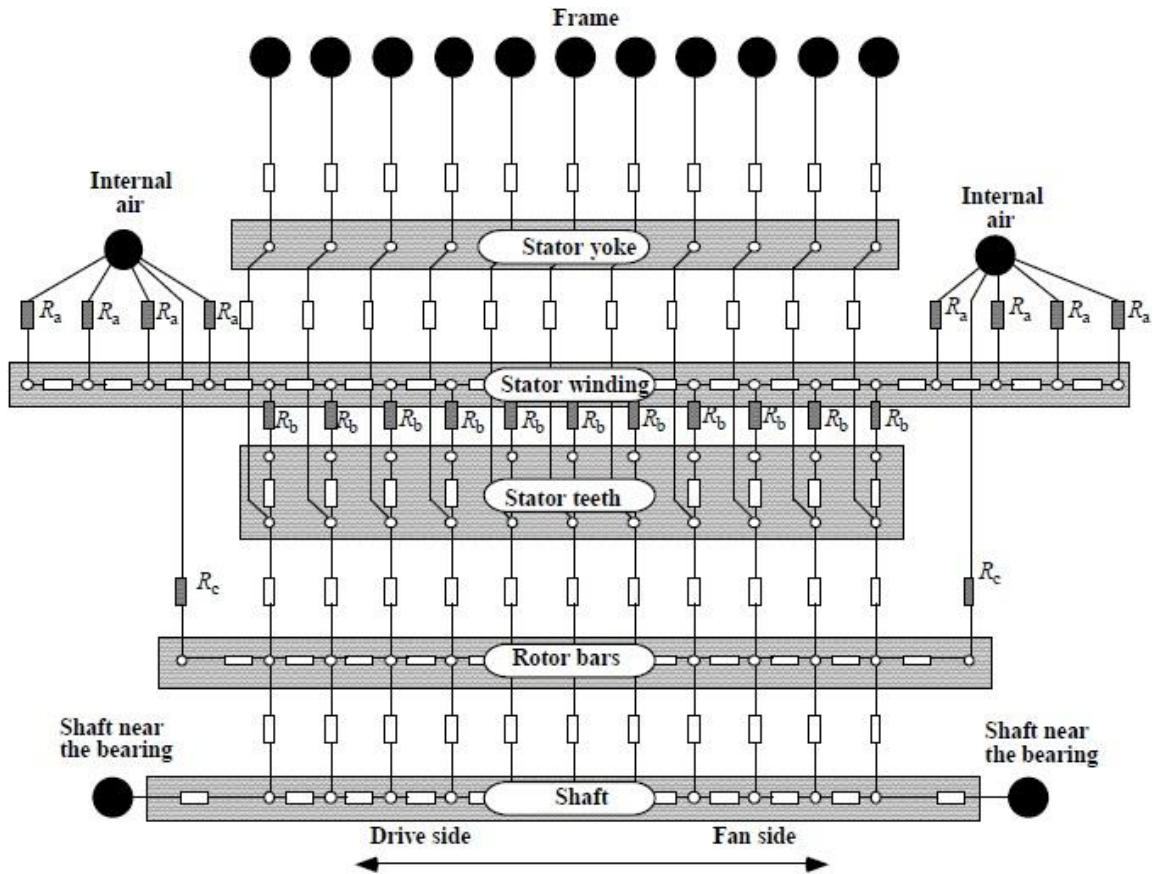
همچنین شکل ۷ نشان‌دهنده نمایی از مدل حرارتی در یک موتور سنکرون مغناطیسی دائم است که با آب خنک می‌شود. منابع گرمایی از اتلاف ژول و اتلاف ورقه‌ها هستند.



شکل ۷. نمایی از مدل حرارتی در یک موتور سنکرون مغناطیسی دائم [۱۵]

مدل شناسایی در شکل ۸ نمایش داده می‌شود. سه مقدار مقاومت گرمایی وجود داشته که به‌سادگی قابل محاسبه نیستند. این مقادیر شامل R_b و R_c بوده، که به‌صورت مستطیل‌های با سایه خاکستری ارائه می‌شوند. R_a مقاومت گرمایی میان یک نقطه سیم‌پیچ نهایی استاتور و هوای داخلی است. R_b مقاومت گرمایی بین یک گره بخش سیم‌پیچ استاتور و گره دندان استاتور است. R_c مقاومت گرمایی بین یک حلقه انتهای روتور و هوای داخلی است. سایر مقاومت‌های گرمایی توسط مستطیل‌های توخالی ارائه‌شده و به‌طور منفرد قابل محاسبه هستند. نقاط سیاه‌رنگ نشان‌دهنده شرایط مرزی هستند. به‌منظور شناسایی R_c ، دمای سطح روتور و نیز دماهای مرز باید اندازه‌گیری شوند. دمای روتور محاسبه‌شده نسبت به تغییرات R_a و R_b حساس نبوده، زیرا این مقادیر قابل تقریب هستند. بایستی اختلاف دمای قابل توجهی میان روتور و استاتور وجود داشته باشد، بنابراین انجام آزمایش در بار مجاز بهترین روش است [۱۱].

فرض بر این است که اتلاف‌های روتور کل، شامل اتلاف‌های اضافی، قابل‌اندازه‌گیری بوده یا از اندازه‌گیری‌ها قابل ارزیابی است. R_c به‌صورت مقداری شناسایی شده که برای ارائه آن، دماهای روتور اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده معادل یکدیگر در نظر گرفته‌شده‌اند. شناسایی در درجه اول وابسته به‌دقت محاسبه اتلاف روتور و دقت مقدار مقاومت گرمایی شکاف هوا است [۱۱].



شکل ۸. مدلی برای شناسایی مقاومت گرمایی R_c و R_b ، R_a [۱۱]

با توجه به روابط ارائه شده برای انتقال حرارت هدایتی و مقاومت انتقال حرارت هدایتی، پارامترهای انتقال حرارت هدایتی در جدول ۳ آمده است که در آن U_r سرعت دورانی روتور.

جدول ۳. ضرایب انتقال حرارت به صورت تجربی [۱۰]

منبع	رابطه	ضریب انتقال حرارت جابجایی
[۱۱-۱۴]	$h_{ew} = 6.5 + 5.25^{0.6} \cdot u_r^{0.6}$	انتهای مارپیچ
[۱۱-۱۴]	$h_{rotor} = 16.5^{0.65} u_r^{0.65}$	روتور
[۱۱-۱۴]	$h_{internal} = 15 + 6.75^{0.65} \cdot u_r^{0.65}$	هوای داخل
	$h_{airgap} = \frac{Nu \lambda_{air}}{2\delta}$	فاصله هوایی
[۱۷]	$h_{natural} = \frac{Nu_L \lambda_{air}}{L}$	شاسی

۴- انتقال حرارت جابجایی در انتهای مارپیچ

رابطه کلی انتقال حرارت جابجایی که به صورت تجربی به دست آمده است به شکل زیر است.

$$h = k_1(1 + k_2 v^{k_3}) \quad (۶)$$

که در آن v سرعت هوا دور مارپیچ، k_1 نشان دهنده انتقال حرارت جابجایی آزاد، k_2 نشان دهنده انتقال حرارت جابجایی اجباری و h متوسط ضریب انتقال حرارت جابجایی است [۱۱]. k_1 ، k_2 و k_3 ثوابتی هستند که با توجه منابع مختلف دارای مقادیر مختلفی هستند که نمونه‌هایی از آن‌ها در جدول ۴ قابل مشاهده است [۱۵].

جدول ۴. ثوابت رابطه انتقال حرارت جابجایی به صورت تجربی [۱۱]

منبع	k_1	k_2	k_3
[۱۱-۱۴]	۴۱/۴	۰/۱۵	۱
[۱۱-۱۴]	۱۵/۵	۰/۲۹	۱
[۱۱-۱۴]	۱۵/۵	۰/۳۹	۱

۵- انتقال حرارت جابجایی در پوشش انتهایی روتور

بنا به مرجع [۱۷]، شدت و قدرت انتقال حرارت جابجایی بین فاصله روتور و بدنه (چارچوب) تحت تأثیر سرعت چرخش روتور است. بسته به سرعت‌های بالا، جریان هوای نزدیک روتور می‌تواند آشفته باشد. جریان در سطح بدنه (چارچوب) آرام است. بنا به مرجع [۱۸]، ضریب انتقال حرارت جابجایی در روی سطح روتور از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\begin{cases} Nu = 0.326Re^{0.5} & Re < 1.8 \times 10^5 - 3.5 \times 10^5 \\ Nu = 0.0196Re^{0.8} & Re > 2.5 \times 10^5 - 3.6 \times 10^5 \\ h = \frac{\lambda Nu}{D_h} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن Re عدد رینولدز، r شعاع روتور و D_h قطر هیدرولیکی است.

۶- روتور

هنگام مدل‌سازی روتورهای قفس آلومینیومی، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند: شار گرمایی محوری در هسته روتور قابل صرف نظر است. از مقاومت تماس گرمایی بین میله‌های روتور و هسته نیز چشم‌پوشی می‌گردد. این فرضیه توسط اندازه‌گیری‌های [۱۹] تأیید شده، که در آن می‌توان دید که افت دما بین میله‌ها و هسته بسیار کوچک است. اتلاف میله روتور نیز با توزیع یکنواخت در طول روتور در نظر گرفته می‌شود. هرچند، اتلاف حلقه نهایی باید به‌طور جداگانه محاسبه گردد، یوغ روتور بدون اتلاف فرض می‌شود [۱۱].

۶-۱- مدل‌سازی داخلی

مقاومت گرمایی کم بین میله‌های و هسته، ارائه آن‌ها با یک المان را امکان‌پذیر می‌سازد. بدین طریق اتلاف سطح روتور به اتلاف میله و ظرفیت گرمایی هسته به میله‌ها اضافه می‌گردند. چنین المانی در تماس گرمایی با دندان استاتور (از طریق شکاف هوا)، شفت و با سایر المان‌های روتور در جهت محوری است [۱۱]. مقاومت گرمایی میان دو المان روتور عبارت است از:

$$R_{th} = \frac{l}{Q_r A \lambda} \quad (8)$$

که در آن l فاصله میان المان‌های روتور مجاور، Q_r تعداد میله‌ها، λ هدایت‌پذیری گرمایی ماده میله و A مساحت سطح مقطع میله هستند. مقاومت گرمایی بین المان روتور و المان شفت تا حدی ناشی از مقاومت گرمایی از طریق

هسته روتور و نیز مقاومت تماس گرمایی در اتصالات است. مقاومت گرمایی در میان هسته روتور به صورت زیر است [۱۱].

$$R_{th} = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{2\pi\lambda l} \quad (9)$$

که در آن r_2 شعاع قسمت پایین شکاف روتور، r_1 شعاع شفت و λ هدایت پذیری گرمایی ماده هسته هستند.

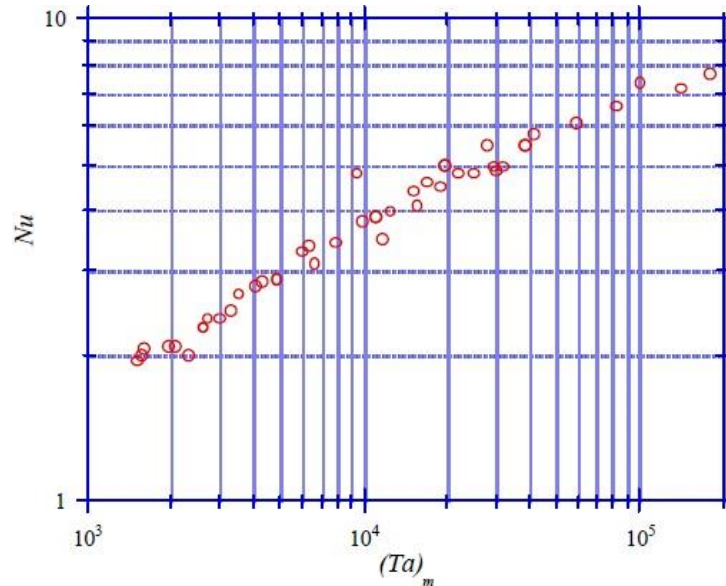
۷- شکاف هوا

جریان گرمایی در شکاف هوا شامل هدایت، جابجایی و تابش است (تابش بخش کوچکی از آن است). جریان گرمایی در شکاف هوا بین استوانه‌های هم‌مرکز توسط بکر و کایه [۲۰]، گزلی [۲۱]، و سایر پژوهشگران مانند آوکی و همکاران [۲۲] و همچنین بیورکلو و همکاران [۲۳] مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنها گزلی از بخش‌های دستگاه الکتریکی واقعی با شکاف هوای نرمال استفاده کرده، و سایر محققین شکاف‌های هوای بزرگ و سطوح صاف روتور و استاتور را به کار گرفته‌اند. اغلب موتورهای TEFC^۸ کوچک‌تر دارای جریان هوای محوری در شکاف هوا نیستند. بدون جریان هوای محوری، جریان در سرعت‌های کم آرام بوده، اما در سرعت‌های نسبتاً بالا، انتقال به جریان متلاطم آغاز می‌گردد. در حالت آرام ایده‌آل، جزء سرعت شعاعی هوا وجود نداشته، بنابراین گرما تنها می‌تواند توسط هدایت و تابش از روتور به استاتور منتقل گردد. در حالت متلاطم، گرداب‌هایی پدیدار شده که جابجایی به عامل حائز اهمیتی تبدیل می‌شود. این حالت توسط عدد تیلور یا عدد تیلور اصلاح‌شده مشخص می‌گردد. عدد تیلور اصلاح‌شده به کار رفته توسط بکر و کایه عبارت است از:

$$(Ta)_m = \frac{\omega^2 r_\delta \delta^3}{v^2 F_g} \quad (10)$$

که در آن ω سرعت زاویه‌ای، v ویسکوزیته سینماتیک، δ فاصله شکاف هوایی و r_δ شعاع متوسط شکاف هوایی بوده و F_g برای تمامی حالات عملی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. بکر و کایه [۲۰] عدد تیلور اصلاح‌شده بحرانی را برابر ۱۷۴۰ تعیین نمودند. داده‌های آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در اعداد تیلور بالاتر از ۱۷۴۰، رابطه تجربی زیر ارائه می‌گردد:

$$Nu = 0.409(Ta)_m^{0.241} - 137(Ta)_m^{-0.75} \quad (11)$$

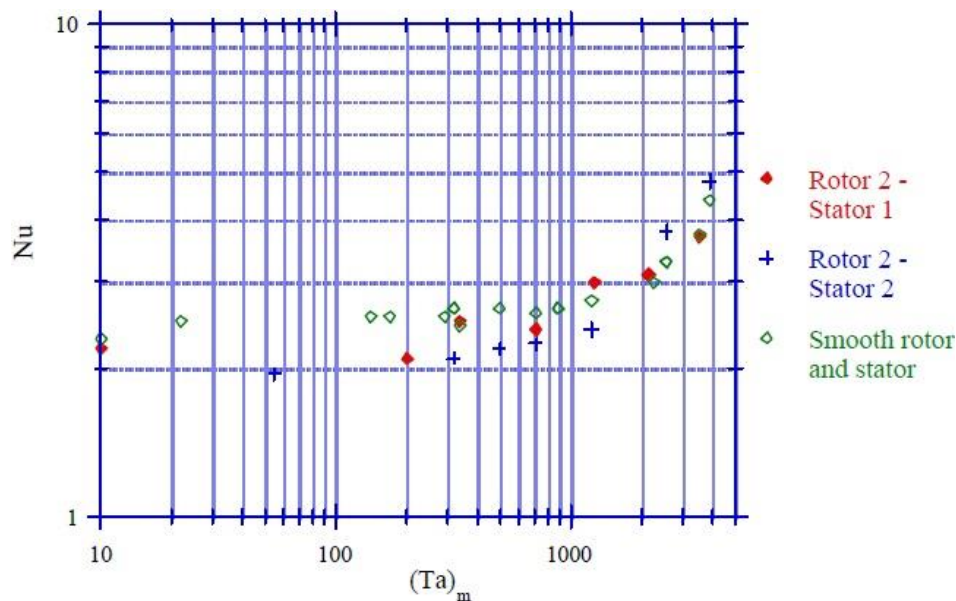


شکل ۹. داده‌های بکر و کایه برای سطوح روتور و استاتور صاف [۲۰]

بدون جریان هوای محوری، α معمولاً به عنوان ضریب انتقال حرارت بین روتور و استاتور به جای ضریب میان روتور و سیال تعریف می‌شود. با توجه به اینکه شکاف هوا طول مشخصه بوده، این بدین معناست که رابطه میان α و Nu عبارت است از:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_f}{2\delta} \quad (12)$$

که در این حالت α هدایت و جابجایی در شکاف هوا است. در جریان هوای آرام، $(Ta)_m < 1740$ ، Nu دارای مقدار ۲ است. همچنین مقدار Nu در [۲۰-۲۲] اندازه‌گیری می‌شود. هرچند، نتایج گازی [۲۱] بیش‌تر است. داده‌های وی جالب توجه بوده زیرا تنها با شکاف هوای واقعی و با شکاف در استاتور اندازه‌گیری شده، که در دستگاه واقعی انتظار می‌رود. داده‌های وی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰. داده‌های گازی برای سطوح روتور و استاتور شکاف دار. داده‌ها به جای عدد رینولدز مرتبط با عدد تیلور هستند [۲۱]

همچنین در پژوهشی دیگر [۲۴] آورده شده است که در فاصله هوایی، بدون در نظر گرفتن جریان محوری، مقاومت حرارتی از روتور به استاتور است. طبیعت فاصله هوایی به عدد تیلور اصلاح شده T_{am} بستگی دارد که نشان دهنده تأثیر چرخش است و با روابط زیر نشان داده می‌شود.

$$T_{am} = \frac{T_a}{F_g} \quad (۱۳)$$

$$T_a = \frac{\Omega^2 R_m e^3}{\nu^2} \quad (۱۴)$$

$$F_g = \frac{\pi^4}{P} \frac{1}{(1 - \frac{e}{2R_m})^2} \quad (۱۵)$$

$$P = 0.0571(1 - 0.625x) + \frac{0.00056}{1 - 0.625x} \quad (۱۶)$$

$$x = \frac{\frac{e}{R_m}}{1 - \frac{e}{2R_m}} \quad (۱۷)$$

که در آن Q سرعت زاویه‌ای یا چرخشی، R_m شعاع متوسط، e قطر فاصله هوایی، ν ویسکوزیته سینماتیک است. با در نظر گرفتن اینکه فاصله هوایی صاف و بدون جریان محوری است، جریان در این ناحیه:

- پایا و آرام است هنگامی که $T_{am} < 1700$

- آرام با ظهور گرداب‌های تیلور است هنگامی که $1700 < T_{am} < 10^4$

- آرام با ظهور گرداب‌های تیلور است اما تغییر در آن اتفاق می‌افتد هنگامی که $T_{am} > 10^4$

جریان در فاصله هوایی توسط انتقال حرارت جابجایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز مدل می‌شود که ضریب انتقال حرارت جابجایی در آن مطابق رابطه (۱۸) است.

همچنین باید اشاره کرد که برای جریان داخل استوانه مانند جریان در فاصله هوایی موتور سنکرون مغناطیس دائم، عدد ناسلت توسط برکر در سال ۱۹۶۲ بدین گونه ارائه شده است [۲۰].

$$Nu = \begin{cases} Nu = 2 & 0 < T_{am} < 1700 \\ Nu = 0.128 T_{am}^{0.367} & 1700 < T_{am} < 10^4 \\ Nu = 0.499 T_{am}^{0.241} & 10^4 < T_{am} < 10^7 \end{cases} \quad (۱۸)$$

در صورتی که داده‌ها برای سطوح شکاف دار با داده‌های سطوح صاف مورد مقایسه قرار گیرند، می‌توان مشاهده نمود هدایت گرمایی با توجه به شکاف‌ها کاهش می‌یابند. هرچند، جزء انتقال حرارت جابجایی نیز افزوده شده که با عدد تیلور افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه داده‌های گازی تاکنون توسط بررسی‌های مشابه تأیید نشده، این دو اثر شکاف قابل صرف نظر هستند، زیرا در مقابل یکدیگر عمل می‌کنند. برای سطوح صاف، گزلی $Nu = 2.5$ را برای جریان آرام به دست آورد. هرچند، در این پژوهش، $Nu = 2$ استفاده شده که توسط [۲۰-۲۲] بیان می‌گردد.

با توجه به اینکه λ و ν وابسته به دما هستند، پیشنهاد می‌شود که برای دمای متوسط شکاف هوا مورد ارزیابی قرار گیرند. علاوه بر این، انبساط گرمایی روتور و استاتور δ را وابسته به دما می‌نماید. وابستگی دما را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\delta = \delta_0 - \kappa_{Fe} r_{\delta} \Delta T \quad (19)$$

که در آن δ_0 شکاف هوا بدون انبساط گرمایی، κ_{Fe} ضریب هدایت حرارتی آهن و ΔT اختلاف دمای روتور و استاتور است. هنگامی که α محاسبه شود، می‌توان مقاومت گرمایی ناشی از انتقال حرارت هدایتی و جابجایی را تعیین نمود. مقاومت گرمایی بین المان روتور و المان دندانه استاتور عبارت است از [۱۱]:

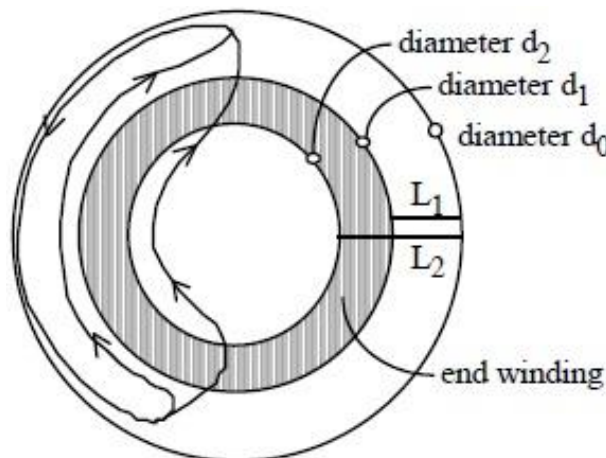
$$R_{th1} = \frac{1}{2 \pi r_{\delta} l \alpha} \quad (20)$$

که در آن l طول محوری المان‌ها است. معادله ۲۰ شامل تابش نیست. انتشار پذیری سطوح روتور و استاتور به طور تقریبی با گرمایش آن‌ها تا دمای 70°C و مقایسه دماهای آن‌ها با داده‌های دستگاه اندازه‌گیری مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. ϵ_r و ϵ_s به ترتیب انتشار پذیری^۹ تشعشعی سطوح لاک‌خورده و تراش خورده است. نتایج انتشار پذیری سطح استاتور لاک‌خورده برابر $\epsilon_s \sim 0.95$ بوده، در حالی که انتشار پذیری سطوح روتور تراش خورده برابر $\epsilon_r \sim 0.13$ است. برای این انتشار پذیری، تابش گرمایی برای موتورهای القاء نرمال بسیار کوچک است. شار گرمایی تابش به صورت زیر ارائه می‌گردد [۱۱]:

$$q = \frac{\sigma(T_r^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1} \quad (21)$$

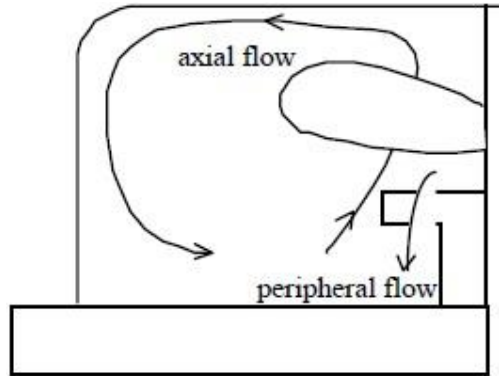
۸- سیم‌پیچی‌های انتهایی

انتقال حرارت از سیم‌پیچی‌های انتهایی عمدتاً ناشی از جابجایی بوده اگرچه مقداری تابش نیز وجود دارد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان‌دهنده چگونگی گردش هوا با توجه به جابجایی آزاد در حالت ساکن و به دلیل جابجایی اجباری در سرعت نرمال هستند [۱۱].



شکل ۱۱. جریان هوا در حالت ساکن [۱۲]

9- emissivity



شکل ۱۲. جریان هوا برای دستگاه دوار [۱۱]

هنگام حرکت دستگاه، هوا همانند آنچه در شکل ۱۲ نشان داده شده گردش می‌یابد. هوا توسط پره‌های روتور شتاب گرفته، از میان حفرات در سیم‌پیچی‌های انتهایی عبور کرده، و توسط سپر نهایی بر روی پشت آن به پره‌های روتور خنک می‌گردد. در صورتی که عبور از سیم‌پیچی‌های انتهایی بسیار کوچک باشد، مانع از جریان هوای محوری شده، که می‌تواند سبب خنک شدن ضعیف سیم‌پیچی‌های انتهایی شود. متأسفانه، منابع بسیار کمی در رابطه با انتقال حرارت از سیم‌پیچی‌های انتهایی دستگاه‌های الکتریکی محصور وجود دارد. لوک [۲۵] اندازه‌گیری‌هایی برای ضریب انتقال حرارت یک سیم‌پیچی روتور ساخته‌شده خاص را انجام داد. هرچند، دستگاه وی مشابه با موتور TEFC مدرن نیست. کوزیج [۲۶] روابطی را برای سطوح خارجی و داخلی سیم‌پیچی‌های انتهایی ارائه نمود. مطابق با روابط وی، ضریب انتقال حرارت متناسب با توان سرعت 0.6 است. به‌منظور مقایسه نتایج مختلف، تعریف یکسانی از سطح سیم‌پیچی انتهایی باید مورد استفاده قرار گیرد. لوک آن را به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$A = \pi l_{ov} \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (22)$$

که در آن l_{ov} طول رسانای متوسط برآمدگی‌های سیم‌پیچی بوده، و d_1 و d_2 در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. این تعریف از سطح در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در حالت ساکن، انتقال حرارت نسبتاً کم بوده و متشکل از تابش و جابجایی آزاد است. گرمای تابش خالص به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$P = 0.5 A \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (23)$$

که در آن T_w و T_∞ در این حالت به ترتیب دمای مطلق سیم‌پیچی‌های انتهایی و در سپر نهایی هستند. ضریب 0.5 به این دلیل در نظر گرفته شده که تنها بخش بیرونی سیم‌پیچی انتهایی با سپر انتهایی مواجه است. با فرض اینکه لایه‌ای از رنگ یا جلا بر روی سپر انتهایی وجود داشته باشد، مقدار $\varepsilon \sim 0.9$ قابل به‌کارگیری است.

اثر جابجایی آزاد با استفاده از رابطه برای جابجایی آزاد میان استوانه‌های هم‌مرکز قابل تعیین است [۲۷] با فرض اینکه جریان‌های هوای داخلی و خارجی از قانون یکسانی پیروی کنند، جریان گرمای جابجایی در حالت ساکن عبارت است از:

$$P = \frac{0.386 \pi l_{ov} (T_w - T_\infty) \lambda_a \sqrt{Pr}}{(0.861 + Pr)^{0.25}} \left(\frac{Gr L_1^{0.25}}{L_1^{0.75} (d_1^{-0.6} + d_0^{-0.6})^{1.25}} + \frac{Gr L_2^{0.25}}{L_2^{0.75} (d_2^{-0.6} + d_0^{-0.6})^{1.25}} \right) \quad (24)$$

که در آن T_w و T_∞ در این حالت به ترتیب دمای سیم‌پیچی‌های نهایی و سپر نهایی هستند. با استفاده از T_w ، T_∞ و با استفاده از L_1 و L_2 به‌عنوان طول مشخصه محاسبه می‌گردد. فواصل d_0 ، d_1 ، d_2 و L_1 و L_2 در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند.

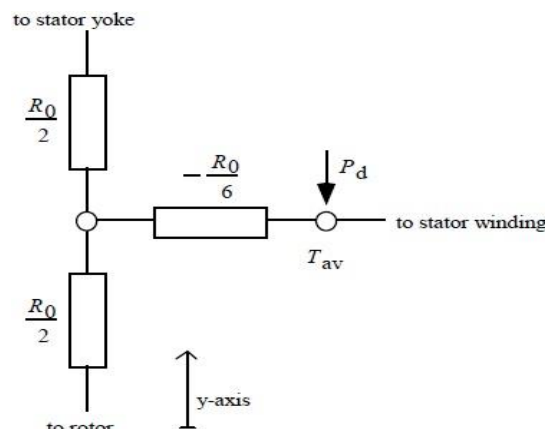
مدل شناسایی به‌منظور دستیابی به برخی داده‌های ضریب انتقال حرارت سیم‌پیچی‌های نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۹- هسته استاتور

یوغ استاتور با پیکربندی‌های تک‌گره‌ای مدل‌سازی شده، زیرا جریان گرمایی ناشی از دندانه استاتور معمولاً بسیار بزرگ‌تر از گرمای تولیدشده داخلی است. شار حرارتی محیطی و محوری قابل صرف‌نظر هستند. المان‌های یوغ استاتور استوانه‌های توخالی با مقاومت گرمایی در جهت شعاعی عبارت است از [۱۱]:

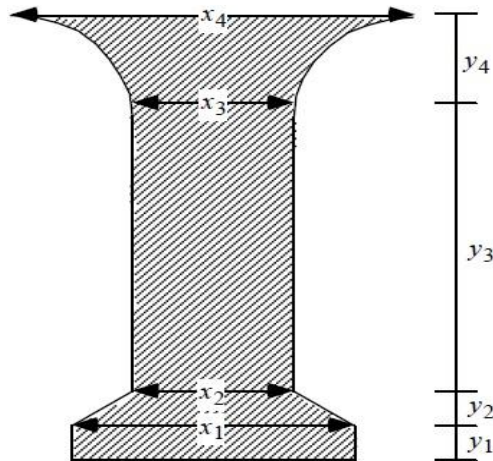
$$R_{th} = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{2\pi\lambda\ell} \quad (25)$$

که در آن r_2 شعاع بیرونی و r_1 شعاع تعریف‌شده در بالای شکاف‌ها است. دندانه‌های استاتور به نحوی عمل کرده که به‌موازات یکدیگر باشند. از تغییرات دمای محیطی صرف‌نظر می‌گردد. جریان گرمایی در جهت شفت نیز قابل صرف‌نظر بوده که به دلیل مقاومت تماس گرمایی بین ورقه‌های لایه‌ای منفرد است. گرما از روتور وارد دندانه می‌شود. در طول مسیر آن به یوغ، گرمای بیشتری از شکاف‌های استاتور و از منابع داخلی اضافه می‌گردد. با فرض اینکه شار حرارتی ورودی از شکاف‌ها در طول محور y ثابت باشد. در نتیجه، یک پیکربندی دو گره‌ای با مقاومت‌های گرمایی معادل همانند آنچه در شکل ۱۳ نشان داده شده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].



شکل ۱۳. پیکربندی گره دندانه استاتور [۱۱]

با توجه به تغییرات در پهنای دندانه، انتگرال‌گیری باید در طول محور y به‌منظور دستیابی به مقدار R_0 انجام پذیرد. یک دندانه را عموماً می‌توان به چهار بخش تقسیم‌بندی نمود، که در شکل ۱۴ نمایش داده شده است [۱۱].



شکل ۱۴. هندسه دندانه [۱۲]

رابطه برای R_0 عبارت است از [۱۱]:

$$R_0 = \int_0^{y_{\max}} \frac{1}{\lambda Q_s l x(y)} dy \quad (26)$$

که در آن $y_{\max} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4$ است. معادله (۲۷) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۱]:

$$R_0 = \frac{1}{\lambda Q_s l} \left(\frac{y_1}{x_1} + \frac{y_3}{x_3} + \frac{y_2}{x_1 - x_2} \left(\ln \left| \frac{x_1 y_2}{x_1 - x_2} \right| - \ln \left| y_2 - \frac{x_1 y_2}{x_1 - x_2} \right| \right) + \frac{\pi}{4} + \frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \arctan \frac{a+1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right) \quad (27)$$

که در آن [۱۱]:

$$a = \frac{x_3 + 2y_4}{2y_4} \quad (28)$$

۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی بر آن شده است که انتقال حرارت در بخش‌های مختلف موتور سنکرون مغناطیس دائم مورد بررسی قرار گرفته و روابط آن‌ها به تفکیک بخش‌های موتور ارائه گردد. به علت پیچیدگی ماشین الکتریکی به دلیل هندسه پیچیده، شبکه‌های انتقال حرارت بزرگی می‌تواند به دست آید که در نتیجه پروفایل توزیع دمایی واضحی می‌تواند به دست آید، پس استفاده از روابط به‌تنهایی نمی‌تواند کمکی به تحلیل انتقال حرارت در این نوع موتورها کرده و باید از شبکه‌هایی که نشان‌دهنده مقاومت‌ها در هر بخش موتور است استفاده کرد. با وجود پیچیدگی‌های هندسه موتورهای الکتریکی که قبلاً نیز ذکر شد، در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از مراجع گوناگون، روابط انتقال حرارت به‌ویژه انتقال حرارت جابجایی ارائه شود. این روابط در زمان طراحی موتورها می‌توانند کمک بسیاری به بهبود انتقال حرارت و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی کنند.

در این موتورها انواع انتقال حرارت هدایتی، جابجایی و تشعشع اتفاق می‌افتند که با توجه به روابط و مقاومت‌های ارائه شده در این مقاله می‌توان یافت که سهم انتقال حرارت جابجایی در قسمت‌هایی از موتور مانند فاصله هوایی، انتهای مارپیچ، فاصله بین اجزای داخلی و بدنه و همچنین بدنه و هوای خارج بیش‌تر است. در مطالعه دقیق‌تر انتقال حرارت قابل‌ذکر است که بیش‌ترین انتقال حرارت جابجایی در فاصله هوایی، انتهای مارپیچ و داخل و خارجی موتور است و همچنین بیش‌ترین انتقال حرارت هدایتی در استاتور، روتور و آهنرباهای مغناطیسی دائم است. با افزایش عدد

تیلور و تغییر وضعیت جریان در فاصله هوایی از آرام به آشفته، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با توجه به بررسی های انجام شده در منابع ذکر شده در بخش های پیشین و همچنین با توجه به پیچیدگی و آسیب پذیری، می‌توان نتیجه گیری کرد که مهم ترین قسمت موتور برای دقت بیش تر روی آن از نظر انتقال حرارت، ماریپیچ ها هستند اهمیت این قسمت نسبت به سایر قسمت های موتور به علت این است که این بخش قبل از قسمت های دیگر موتور آسیب می‌بینند. انجام بیش تری تعداد مطالعه و استخراج تعداد بیش تری از روابط انتقال حرارت به صورت تجربی و شبیه سازی بر روی این قسمت از موتور می‌تواند نشانگر اهمیت بیش تر این قسمت از موتور باشد.

پس از بخش های انتهایی ماریپیچ، دومین قسمت موتور از نظر اهمیت انتقال حرارت، فاصله هوایی است که وقتی جریان هوای آشفته در درون موتور وجود دارد، بیش ترین گسیختگی بین داده های حاصل از شبیه سازی و داده های تجربی وجود دارد و از آنجایی که مقاومت گرمایی هوا بسیار بالاست، هوا تأثیر بسزایی در دمای روتور دارد و استفاده از خنک کننده ها در درون موتور بیش تر به کاهش دما کمک می‌کند تا استفاده از خنک کننده ها در بیرون موتور و در درون موتور، خنک کن باید بر روی شفت قرار گیرد و خنک کن خارجی باید در بیرون از موتور روی شفت نصب شود. مورد بعدی که باید مدنظر گرفته شود، فاصله فصل مشترک بین بدنه (فریم) و استاتور است که در زمان طراحی می‌توان از فاصله های بسیار بزرگ خودداری کرد.

منابع

۱. ایلکا، ر، طراحی بهینه و ساخت موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی پنج فاز، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، جلد ۱۵، شماره ۱، ص ۱۱۳-۱۲۱، ۱۳۹۱.
۲. پاکزاد، ع، کنترل و تغییر سریع سرعت در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۰.
3. Asef. P, Perpina. R, Barzegaran. M.R, An innovative natural air-cooling system technique for temperature-rise suppression on the permanent magnet synchronous machines, *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp 174-181, 2018.
4. Pyrhönen.J, Lindh.P, Polikarpova.M, Kurvinen. E, Naumanen.V, "Heat-transfer improvements in an axial-flux permanent-magnet synchronous machine", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 76, pp 245-251, 2015.
5. Fang.G, Yuan.W, Yan.Z, Sun.Y, Tang.Y, "Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 152, pp 594-604, 2019.
6. Wang, S, Li.Y, ZeLi.Y, Wang. J, WeiGuo.X,"Transient cooling effect analyses for a permanent-magnet synchronous motor with phase-change-material packaging", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, pp 251-260, 2016.
7. Lee.S. "Development and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation Structure", PhD thesis, University of Tennessee, 2009.
8. Pyrhonen, J, Jokinen.T, Hrabovcova. V, (2007), *Design of rotating electrical machines*, Wiley.
9. Gieras. J. F "Permanent magnet motor technology: design and applications/3rd edition", CRC press, 2010.



10. Demetriades, G., Zelaya Parra.H, *Andersson.E*, Olsson.H, "A Real-Time Thermal Model of a Permanent-Magnet Synchronous Motor", *Power Electronics*, Vol. 25, No. 2, pp 463-474, 2010.
11. Kylander.G, "Thermal modelling of small cage induction motors", School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology ,Göthenborg, Sweden, Technical Report No. 265, 1995.
12. Lindstorm.J, "Thermal model of a permanent-magnet motor for a hybrid electric vehicle", Department of Power Engineering., Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Internal report, 1999.
13. Boglietti.A, Cavagnino.A, Lazzari.M, and Pastorelli.M, "A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor", *Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 945–952, 2003.
14. Puranen.J, "Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: A comparative study", Ph.D. dissertation, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2006.
15. Touhami.S, Bertin.Y, Lefèvre.Y, Llibre.J.F, Henaux.C, Fenot.M, "Lumped Parameter Thermal Model of Permanent Magnet Synchronous Machines", *Electrimacs*, pp. 1-6, 2017.
16. Holman.J.P, "Heat Transfer", 7th edition. New York: McGraw-Hill, 1992.
17. Bertotti.G, "General Properties of Power Losses in soft Ferromagnetic Materials, *IEEE Transactions on magnetics*", vol. 24, no. 1, pp. 621- 630, 1988.
18. Burrell.T.A, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System, Technical Report", Oak Ridge National laboratory, 2011.
19. Widek, P. "Auxillary powered induction machines with inverter supply", Chalmers university of technology, Department of electrical machines and power electronics-technical report, R-90-08, 1990.
20. Becker.K.M, Kaye.J, "Measurements of adiabatic flow in an annulus with an inner rotating cylinder", *Journal of Heat Transfer*, Vol 84, pp. 97- 105, 1962.
21. Gazley.C, "Heat transfer characteristics of rotational and axial flow between concentric cylinders. *Transactions of the ASME*", Vol 80-1, pp.79-90, 1958.
22. Aoki.H, Nohira.H, Arai.H, "Convective heat transfer in an annulus with an inner rotating cylinder", *Bulletin of JSME*, Vol 10 - 39, p. 523- 532, 1967.
23. Bjorklund.I.S, Kays.W.M, "Heat transfer between concentric rotating cylinders", *Journal of Heat Transfer*, Vol 81, pp. 175-186, 1959.
24. Illet.C, Hadi.A.W, Perret.R, Isnard.R, "Identification du modèle thermique d'une machine à induction de puissance moyenne" *Revue de Physique Appliquée*, Vol 24 -9, pp. 923-931, 1989.
25. Luke.G.E, "The cooling of electric machine" *Transactions of the AIEE*, Vol 42, pp. 636-652, 1923.
26. Koziej.E, "Cooling and heating of electrical machines", Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Lecture Notes, Helsinki, Finland, pp104, 1989.
27. Incropera.F, DeWitt.D, Bergman.T, Lavine.A, "Fundamentals of heat and mass transfer", 6th edition. John Wiley and Sons, 2006.