نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره۳، جلد ۱۸، پاییز ۱۳۸۶، صفحه ۴۸-۴۱
ویژه‌نامه مهندسی برق و مکانیک

طراحی و ساخت سیستم اندازه‌گیری تلفات ماشین‌های الکتریکی به روش کالریمتری

علیرضا جلیلیان و فرخ طایفی

چکیده: در این مقاله عملکرد و مراحل طراحی و ساخت یک سیستم کالریمتری جهت اندازه گیری تلفات ماشینهای الکتریکی تشریح شده است. روشهای تئوری و عملی محاسبه تلفات حرارتی دیواره‌های کالریمتر و مشخصات هیتر مرجع، فن اصلی جهت انتقال هوای کالریمتر، سنسورهای اندازه‌گیری دما و سیستم کامپیوتری جمع آوری داده‌ها ارائه شده است. نحوه کالیبراسیون این سیستم با انجام آزمایش دو هیتره تشریح شده است. با منظور کردن خطای عناصر مرتبط، میزان خطا در حالت تئوری ٪۴/۹ و در حالت عملی در بدترین حالت ٪۵/۶ و با میانگین ٪۲/۷ بدست آمده است. نتایج اندازه گیری تلفات یک موتور القایی kW ۵/۵ در حالت بی‌باری توسط این سیستم گزارش و با مقادیر اندازه گیری شده توسط یک واتمتر آزمایشگاهی مقایسه شده است. بر اساس نتایج این آزمایشات میانگین خطاهای بدست آمده توسط این سیستم کمتر از ٪۵ می باشد که در مقایسه با روشهای متداول و روشهای مشابه کالریمتری قابل قبول می‌باشد. در این مقاله همچنین پیشنهاداتی جهت بهبود عملکرد سیستم طراحی شده ارائه شده است.

واژه های کلیدی: تلفات ماشینهای الکتریکی، روشهای کالریمتری، کالریمتر.

۱. مقدمه

به طور کلی روشهای کالریمتری که تاکنون برای اندازه گیری تلفات ماشینهای الکتریکی و ترانسفورماتورها ارائه شده‌اند مبتنی بر دو نوع کالریمتر بسته و باز می‌باشند. در بیشتر روشهای ارائه شده [۴-۱] از کالریمتر نوع باز با هوا بعنوان سیال خنک کننده استفاده شده است. در کالریمتر نوع باز یک سیال (معمولاً هوا) برای انتقال گرمای ایجاد شده توسط ماشین مورد آزمایش استفاده می‌شود و بطور کلی نسبت به نوع بسته دارای ساختمانی ساده تر و تجهیزات کم هزینه تر می باشد. در کالریمتر تعادلی [۱] دو آزمایش با شرایط یکسان بطور متوالی انجام می‌شود که در مرحله اول موتور مورد آزمایش و در مرحله دوم یک هیتر بعنوان منبع گرمایی بکار می‌روند. در این روش به شرط یکسان بودن شرایط آزمایش در دو مرحله و اندازه‌گیری توان ورودی هیتر می‌توان تلفات موتور را بدست آورد. وضوح اندازه‌گیری تلفات در این روش W ۹/۴ گزارش شده است. همچنین تلفات یک موتور القایی سه فاز kW ۵/۵ در بار کامل با دقت ۱/۴۵ و در بی باری با دقت ۴/۷ درصد اندازه گیری شده است. نیاز به سیستم کنترل دمای هوای ورودی، نیاز به اندازه‌گیری فشار، رطوبت و دمای هوا و نیاز به تجهیزات جانبی جهت اطمینان از ثابت بودن شرایط آزمایش در دو مرحله و همچنین زمان طولانی انجام آزمایش از مواردی است که کاربرد این روش را محدود می‌نماید.

روش کالریمتر دو محفظه‌ای [۳]، مبتنی بر روش تعادلی اصلاح شده می‌باشد که با قرار دادن ماشین تحت آزمایش در یک محفظه و هیتر مرجع در محفظه مجاور دو مرحله آزمایش بطور همزمان انجام می‌شود.

عدم نیاز به کنترل دقیق دبی، فشار، سرعت و میزان رطوبت هوای عبوری از کالریمتر و سادگی ساختمان و تجهیزات اندازه‌گیری از جمله مواردیست که کاربرد این روش را بمراتب از نوع تعادلی آسانتر نموده است. این سیستم جهت اندازه‌گیری تلفات هارمونیکی یک

مقاله در تاریخ ۸۲/۱۲/۱۶ دریافت و در تاریخ ۸۴/۸/۱۴ به تصویب نهایی رسید.

دکتر علیرضا جلیلیان، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران، jalilian@iust.ac.ir
مهندس فرخ طایفی، کارشناسی ارشد قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران،

Archive of SID
www.SID.ir

موتور القـایی سه فاز ۷/۵ kW (تلفات تا سقف ۱kW) با وضوح W ۱۵ و با دقت ۵ درصد بکارگرفته شده است. کالریمترهای از نوع بسته [۵] دارای دو سیستم انتقال حرارت بوده که یکی از آنها تلفات موتور تحت آزمایش را به محفظه کالریمتر منتقل کرده (معمولاً توسط هوا) و سیستم دوم گرمای محفظه را به بیرون از کالریمتر منتقل می‌کند (معمولاً توسط آب یا روغن). در این روش تلفات ماشین با استفاده از اندازه‌گیری خواص سیال سیستم دوم قابل دستیابی می‌باشد. پیچیدگی در ساختمان، نیاز به دو نوع سیستم انتقال حرارت، دشواری در اندازه‌گیری خواص سیال خنک کن، نیاز به کنترل مداوم شرایط آزمایش و در نتیجه هزینه نسبتاً بالا از جمله مواردی است که کاربرد این نوع کالریمتر را محدود می‌کند. البته دقت این روش بدلیل تغییرات کم خصوصیات سیال خنک کن (آب یا روغن) نسبت به هوا بالا می‌باشد. اساس کار ارائه شده در مقاله حاضر روش دو محفظه‌ای است که برای اندازه گیری تلفات یک موتور القائی استفاده شده است [۱، ۳ و ۶]. لازم به ذکر است که این روش نسبت به روشهای دیگر کالریمتری دارای برتری نسبی است زیرا با استفاده از مواد اولیه ارزان برای ساخت محفظه کالریمتر و همچنین سیستم اندازه‌گیری نسبتاً ساده و کم هزینه قابلیت اندازه‌گیری تلفات ماشینهای الکتریکی با دقت قابل قبول را دارد.

۲. طراحی و عملکرد کالریمتر

کالریمتر طراحی شده دارای دو محفظه عایق گرمایی است و ماشین الکتریکی (که تلفات آن مجهول است) در محفظه اول و یک منبع گرمایی (هیتر مرجع) که توان ورودی آن معلوم است در محفظه دوم قرار می‌گیرند. با بکارگیری یک فن بصورت مکشی یا دمشی، هوا از طریق یک مجرا به محفظه اول وارد و پس از عبور از محفظه دوم از کالریمتر خارج می‌شود. با شروع تغذیه ماشین الکتریکی و هیتر مرجع، اختلاف دمائی بین هوای ورودی و خروجی هر محفظه (متناسب با تلفات ماشین و توان الکتریکی هیتر) ایجاد می‌شود. با فرض ایزوله بودن کامل حرارتی هر دو محفظه، در شرایط پایداری حرارتی می‌توان نوشت:

$$P_1 = \dot{m}_1 \; C_{P1} \, \Delta T_1 \qquad (۱)$$

$$P_2 = \dot{m}_2 \; C_{P2} \, \Delta T_2 \qquad (۲)$$

بطوریکه P توان منبع حرارتی واقع در محفظه (تلفات)، $\dot{m}$، C_P و ΔT به ترتیب: دبی، گرمای ویژه و اختلاف دمای سیال عبوری از هر محفظه می‌باشد [۷]. در روش فوق الذکر هوای عبوری از هر دو محفظه توسط یک فن تامین می‌شود ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$)، لذا با منظورکردن تلفات ماشین ($P_{machine}$) و توان هیتر مرجع (P_{heater}) در محفظه‌ها داریم:

$$P_{machine}/P_{heater} = (C_{P1} \, \Delta T_1)/(C_{P2} \, \Delta T_2) \qquad (۳)$$

بطوریکه تلفات مجهول ماشین با توجه به مقادیر معـلوم ΔT_1، C_{P1}، C_{P2}، ΔT_2 و P_{heater} از این رابطه قابل دستیابی است. برای محاسبه تلفات موتور بطور دقیق با استفاده از این روش، ملحوظ کردن تلفات گرمایی محفظه‌ها و اندازه‌گیری دقیق پارامترهای رابطه ۳ ضروری است که در ادامه به آنها اشاره شده است.

۲-۱. ساخت کالریمتر و متعلقات

جهت ساخت محفظه کالریمتر از یک فریزر صندوقی خانگی به ابعاد ۷۰۰×۵۰۰×۸۰۰ mm استفاده شده است (شکـل ۱). دیواره‌های این محفظه بصورت دو جداره می‌باشد که جداره های خارجی آن از ورقه آهنی به ضخامت ۰/۵ mm بوده و فضای بین این دو جداره به ضخامت ۵۰ mm از اسفنج فشرده پر شده است. درب مـحفـظه از جـنس دیـواره‌های محفظه بوده و توسط دو لولای فنری به بدنه محکم شده است. جهت جلوگیری از ورود هوا به داخل محفظه از طریق درب، یک واشر لاستیکی بین درب و محفظه تعبیه شده است که خاصیت ارتجاعی آن مانع از نفوذ هوا به داخل محفظه می‌شود. تصاویری از کالریمتر مذکور به انضمام تجهیزات جانبی در پیوست «ب» آورده شده است.

۲-۲. هدایت گرمایی دیواره‌ها

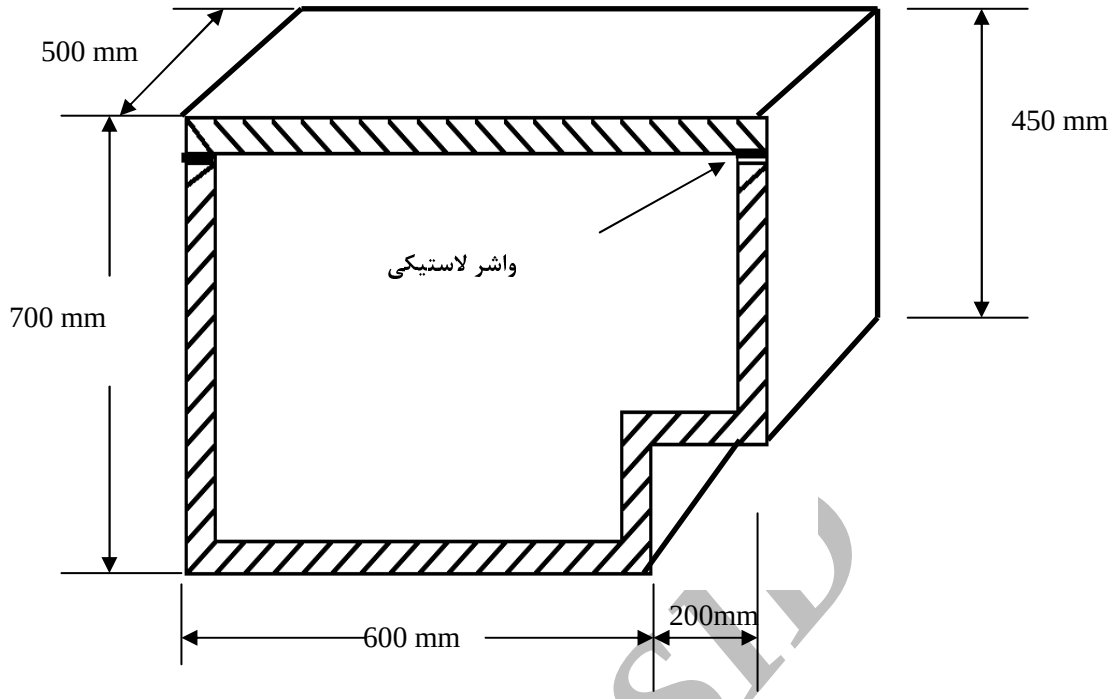
هدایت گرمایی دیواره‌های محفظه به دو صورت تئوری و عملی محاسبه گردیده است. مبنای محاسبات تئوری، ضریب هدایت گرمایی، مساحت و ضخامت دیواره‌ها (شامل ورقه‌های آهنی و اسفنج فشرده) و اختلاف دمای داخل و بیرون محفظه می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب هدایت گرمایی آهن و اسفنج فشرده به ترتیب ۸۰ و ۰/۰۳ [۷] بوده و با احتساب مساحت دیواره‌ها (مجموعاً به اندازه ۲/۵۲ متر مربع) تلفات دیواره‌های محفظه به روش تئوری معادل ۱/۴ W/°C محاسبه شده است.

جهت برآورد هدایـت گرمایی محفظه بصورت عملی از یک هیتر مقاومتی با توان مشخص در داخل محفظه در بسته استفاده شده است. همچنین برای ترکیب و یکنواخت شدن دمای هوای درون محفظه، یک فن در مقابل هیتر نصب شده است. این فن با ولتاژ متناوب ۲۲۰ ولت کار می‌کند و دارای توان ۲۸ W بوده که با توان هیتر جمع می‌شود. بر اساس اصول ترمودینامیکی، هدایـت گرمایی دیواره‌های محفظه در شرایط پایداری حرارتی، معادل توان منبع گرمایی درون محفظه (توان تولیدی توسط هیتر و فن) می‌باشد [۳ و ۷]. دمای داخل و خارج محفظه توسط دو دماسنج جیوه‌ای با وضوح ۰/۱°C و توان مصرفی هیتر و فن توسط یک واتمتر دیجیتال تکفاز با وضوح ۰/۱ W و دقت ۰/۵ درصد اندازه‌گیری شده است.

با انجام چندین آزمایش، هدایت گرمایی دیواره‌های محفظه محاسبه و مقدار متوسط ۱/۶۸ W/°C به دست آمده است (جدول ۱). این مقدار مبنای محاسبات بعدی قرار گرفته است. شکل ۲ افزایش دمای هوای درون محفظه بر حسب زمان در یکی از آزمایشها را نشان می‌دهد.

Archive of SID

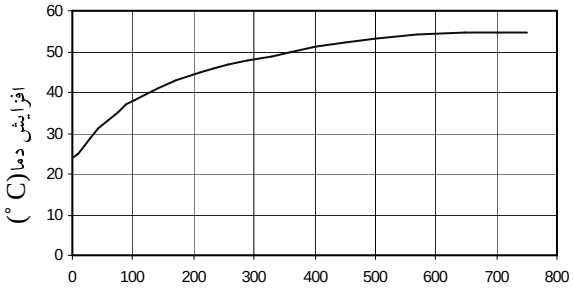
www.SID.ir



شکل ۱. شمای کلی محفظه کالریمتر ساخته شده

جدول ۱. محاسبه هدایت گرمایی دیواره های محفظه کالریمتر

مقدار متوسط	هدایت گرمایی دیواره های محفظه کالریمتر (W/°C)	اختلاف دما در شرایط پایدار گرمائی (°C)	متوسط دمای هوای داخل محفظه کالریمتر (°C)	متوسط دمای هوای بیرون محفظه کالریمتر (°C)	توان مصرفی هیتر و فن (W)
۱/۶۸	۱/۷	۱۶/۵	۳۹/۵	۲۳	۲۸
	۱/۶۸	۲۲/۵	۴۵/۵	۲۳	۳۸
	۱/۶۵	۳۱/۵	۵۴/۵	۲۳	۵۲



شکل۲. نمودار افزایش دما در محفظه کالریمتر بر حسب زمان در آزمایش هدایت گرمایی دیواره‌های کالریمتر

۳-۲. آماده سازی محفظه برای آزمایش موتور

ابتدا محفظه کالریمتر به دو بخش (نه الزاماً مساوی) برای جا دادن موتور و هیتر تقسیم شد که در اینجا فضای بزرگتر به موتور و فضای کوچکتر به هیتر اختصاص یافت. برای جداسازی محفظه از یک قطعه فیبر فشرده بهمراه یک ورقه پلاست فوم استفاده شد. این ورقه توسط چسب سیلیکون به بدنه محکم شده تا علاوه بر آب بندی دیواره بین دو محفظه، مقاومت گرمایی آن را تقویت کند. برای جلوگیری از نفوذ هوا به داخل محفظه دوم از طریق فضای بالای دیواره حائل از فیبر فشرده و یک لایه عایق گرمایی استفاده شده است.

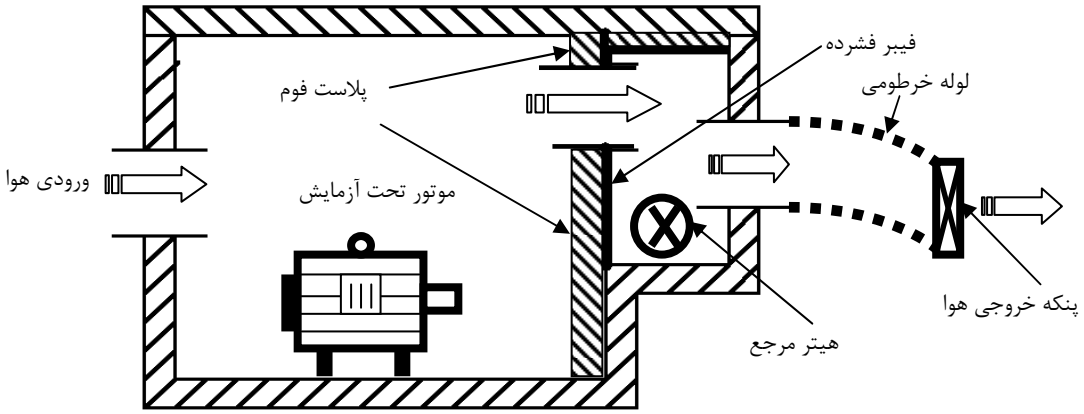
آب‌بندی محفظه دوم از محفظه اول از لحاظ نفوذ هوا بدین دلیل است که هوای ورودی به محفظه دوم فقط باید از مجرای تعبیه شده بگذرد تا اندازه‌گیری دمای هوا و به تبع آن تلفات با دقت مورد نظر انجام شود.

برای مجاری عبوری هوای محفظه‌ها از لوله‌هائی از جنس آهن سفید با قطر ۱۵۰ mm استفاده شده است (شکل ۳ و شکل‌های پیوست «ب»). جهت انتقال هوا از محفظه‌های کالریمتر به بیرون از یک فن در مجرای خروجی محفظه دوم مطابق شکل (۳) استفاده شده است.

این فن ac تک فاز ۲۲۰V، ۰/۴ A با سرعت ۳۰۰ ± ۱۸۰۰ rpm می‌چرخد و هوای کالریمتر را بصورت مکشی با دبی متوسط ۱۱ متر مکعب در دقیقه (حدود ۱۸۰ lit/s) از محفظه‌ها تخلیه می‌کند. این فن با استفاده از یک تبدیل مخروطی شکل و یک لوله خرطومی پلاستیکی به محفظه کالریمتر متصل شده است (پیوست «ب»).

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳. شمای کالریمتر ساخته شده و اجزا تشکیل دهنده آن

هیتر مرجع از اتصال موازی چند المنت حرارتی که با یک اتوترانسفورماتور تکفاز تغذیه می‌شوند تشکیل شده است. برای جلوگیری از تشعشع حرارتی، المنت‌ها درون یک استوانه فلزی نصب شده‌اند. برای کاهش درجه حرارت سطحی المنت‌ها و همچنین ترکیب هوای داخل محفظه کالریمتر از یک فن برقی در انتهای استوانه و در مقابل المنت‌ها استفاده شده است (پیوست «ب»).

۳. اندازه‌گیری اختلاف دما

جهت اندازه گیری اختلاف دما از ترموکوپل نوع J (آهن و کنستانتن) با پنج اتصال در هر نقطه بصورت ترموپیل استفاده شده است (شکل ۴). پنج اتصال سمت چپ در دمای T_1 (دمای هوای ورودی محفظه) و پنج اتصال سمت راست در دمای T_2 (دمای هوای خروجی همان محفظه) قرار می‌گیرند. بنابراین ولتاژ تولیدی این ترموپیل تابعی از اختلاف دمای T_1 و T_2 خواهد بود که در این کاربرد توسط یک تقویت کننده تفاضلی با بهره ۱۰۰۰ تقویت می‌شود. همچنین برای کاهش نویز از دو فیلتر RC با فرکانس قطع حدود $3\ Hz$ در ورودی یک سیستم کامپیوتری جمع آوری داده ها استفاده شده است. این سیستم برای انتقال نمونه‌ها به کامپیوتر و انجام محاسبات لازم توسط نرم افزارهای مربوطه بکار گرفته شده است. با انجام آزمایشهای متعدد ترموپیل‌ها در بازه دمایی بین $0\ ^\circ C$ تا $50\ ^\circ C$ مطابق جدول ۲ در سیزده نقطه دمائی کالیبره شدند. در این آزمایشها از دو مخزن ایزوله حرارتی آب با دمای معین و ثابت و دو دماسنج جیوه‌ای با وضوح $0.1^\circ C$ استفاده و ضریب میانگین $0.3\ V/^\circ C$ بدست آمده است.

۳-۱. تحلیل تئوری و عملی خطا و کالیبراسیون سیستم

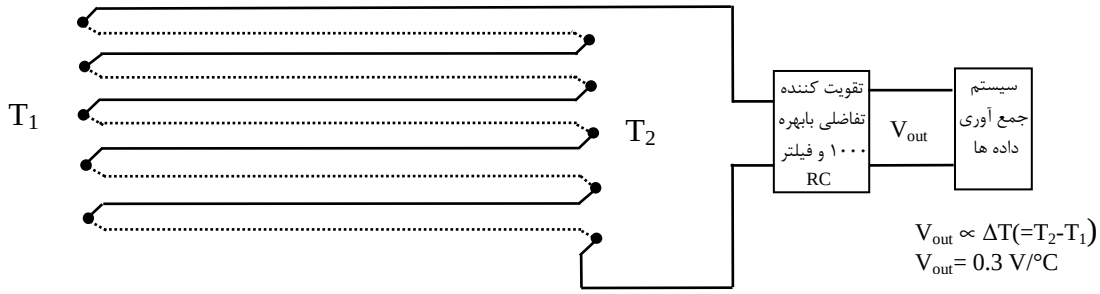
برای بررسی و تحلیل خطای اندازه‌گیری تلفات از لحاظ تئوری، عوامل خطا را با توجه به رابطه ۳ و تاثیر عوامل مختلف روی هر یک از مقادیر، می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی کرد. لازم به ذکر است که در رنج دمایی آزمایشها تغییرات C_{P1} و C_{P2} بسیار کم بوده و لذا این دو پارامتر در محاسبات مساوی فرض می‌شوند. با استناد به اطلاعات فنی قطعات و تجهیزات استفاده شده، مجموع خطاهای ذیل دربدترین حالت از لحاظ تئوری ٪ ۴/۹ محاسبه شده است [۶].

- خطای خطی سازی ترموپیل‌ها
- درصد خطای مقاومت تنظیم بهره تقویت کننده ترموپیل‌ها (R_G)
- خطای خطی سازی مدار تقویت کننده
- خطای ناشی از وضوح و خطای خطی سازی کارت A/D
- خطای دستگاه اندازه‌گیری توان هیتر اصلی (واتمتر)
- خطای ناشی از نویز

برای بررسی خطای سیستم بصورت عملی و همچنین کالیبراسیون سیستم یک سری آزمایش دو هیتری انجام شد. در این آزمایش ها هیتری با شرایط مشابه هیتر مرجع در محفظهٔ اول (بجای موتور) قرار داده شد. برای اندازه‌گیری توان آن نیز از یک واتمتر عقربه‌ای مشابه واتمتر هیتر مرجع استفاده شد. با تنظیم توان هیتر مرجع در ۳۰۰ W، توان هیتر واقع در محفظهٔ اول در ده مرحله تا حداکثر ۶۵۰ وات تغییر داده شد. سپس توان هیتر واقع در محفظهٔ اول بر اساس رابطه ۳ و با لحاظ کردن تلفات حرارتی دیواره‌های کالریمتر (۱/۶۸ W/°C) در هر آزمایش محاسبه شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آمده است بطوریکه P_{main} توان هیتر مرجع واقع در محفظه دوم، P_{test} توان تنظیمی هیتر واقع در محفظه اول، ΔT_1 و ΔT_2 به ترتیب اختلاف دمای هوای عبوری از محفظه اول و دوم، P_{cal} توان بدست آمده از رابطه ۳ و P_{total} توان نهائی محاسبه شده با درنظرگرفتن تلفات دیواره‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که درصد خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط واتمتر (P_{test}) و مقادیر محاسبه شده توسط سیستم طراحی شده (P_{total}) در بدترین حالت ٪۵/۶ و دارای میانگین ٪۲/۷ (در ده آزمایش) می‌باشد که با نتایج تئوری همخوانی مناسبی دارد. همچنین این میزان خطا بیانگر دقت قابل قبول سیستم ساخته شده در اندازه‌گیری تلفات ایجاد شده توسط هیتر (و یا هر منبع حرارتی دیگر مانند یک ماشین الکتریکی) واقع در محفظه اول می باشد که در بسیاری از کاربردها قابل قبول است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. مدار اندازه‌گیری اختلاف دما با استفاده از ترموکوپل نوع J به صورت ترموپیل

جدول ۲. نتایج آزمایش کالیبراسیون ترموپیل‌ها

$\Delta T=T_2-T_1$ (°C)	V_{out} (V)	$V_{out}/\Delta T$ (V/°C)
۸ = ۸/۵ − ۰/۵	۲/۲۴	۰/۲۸
۷/۵ = ۸ − ۰/۵	۲/۰۹	۰/۲۷
۵/۱ = ۸/۵ − ۳/۴	۱/۵۰	۰/۲۹
۴/۷ = ۱۰/۶ − ۵/۹	۱/۴۰	۰/۲۹
۴/۴ = ۱۴/۹ − ۱۰/۵	۱/۵۶	۰/۳۵
۲/۵ = ۱۷/۴ − ۱۴/۹	۰/۷۵	۰/۳۰
۵/۱ = ۲۰ − ۱۴/۹	۱/۵۸	۰/۳۰
۵/۲ = ۲۶/۴ − ۲۱/۲	۱/۴۳	۰/۳۴
۴/۶ = ۳۰/۱ − ۲۵/۵	۱/۴۵	۰/۳۱
۴/۸ = ۳۵ − ۳۰/۲	۱/۳۵	۰/۲۸
۴/۹ = ۴۰/۷ − ۳۵/۸	۱/۳۹	۰/۲۸
۳/۵ = ۴۴/۵ − ۴۱	۱/۲۳	۰/۳۵
۵/۴ = ۵۰/۴ − ۴۵	۱/۶۲	۰/۳۰

جدول ۳. نتایج آزمایش کالیبراسیون سیستم با استفاده از آزمایش دو هیتری

P_{main} (W)	ΔT_2 (°C)	P_{test} (W)	ΔT_1 (°C)	P_{cal} (W)	P_{total} (W)	خطا
۳۰۰	۴/۹	۳۰۰	۴/۷	۲۸۷	۲۹۶	۱/۳٪
"	"	۴۰۰	۶/۳	۳۸۶	۳۹۶	۱٪
"	"	۵۰۰	۷/۵	۴۵۹	۴۷۳	۵/۶٪
"	"	۶۰۰	۹/۱	۵۵۷	۵۷۴	۴/۵٪
"	"	۶۵۰	۱۰	۶۱۲	۶۲۹	۳/۳٪
"	"	۵۵۰	۸/۷	۵۳۷	۵۴۷	۰/۵٪
"	"	۴۵۰	۷	۴۲۹	۴۴۰	۲/۲٪
"	"	۳۵۰	۵/۵	۳۳۷	۳۴۶	۱/۱٪
"	"	۲۵۰	۳/۹	۲۳۹	۲۴۵	۲٪
"	"	۲۰۰	۳	۱۸۴	۱۸۹	۵/۶٪

۴. اندازه‌گیری تلفات یک موتور القایی در حالت بی‌باری

در این قسمت نتایج آزمایش اندازه‌گیری تلفات یک موتور القایی ۵/۵ kW به مشخصات ارائه شده در پیوست «الف» در حالت بی باری ارائه شده است.

در این آزمایش توان هیتر مرجع در ۳۳۰W تنظیم شده است. تغییرات اختلاف دمای هوای محفظه اول و محفظه دوم (ΔT_1 و ΔT_2) ثبت شده توسط سیستم کامپیوتری جمع‌آوری داده‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

مشاهده می‌شود که محفظه اول نسبت به محفظه دوم دیرتر به پایداری حرارتی می‌رسد (پس از حدود ۲۰۰ دقیقه). دلیل آن می‌تواند ابعاد بزرگتر محفظه اول و بیشتر بودن ثابت زمانی حرارتی موتور نسبت به هیتر مرجع باشد.

تلفات محاسبه شده در حالت پایدار حرارتی با استفاده از سیستم کالریمتری ساخته شده و با فرض $Cp_1 \approx Cp_2$ در بازه دمائی ۲۰°C الی ۳۵ °C و همچنین با احتساب رسانایی گرمایی دیواره‌های کالریمتر برابر ۴۰۷ W و ۴۰۸/۴ W برآورد شده است (جدول ۴).

برای اطمینان از نتایج آزمایش‌ها و قابلیت تکرار پذیری سیستم، آزمایش‌های دیگری در شرایط مشابه انجام و نتایج مشابهی حاصل شد.

از آنجا که کل توان مصرفی موتور القایی در حالت بی‌باری به تلفات تبدیل می‌شود، لذا مقایسه تلفات اندازه‌گیری شده توسط کالریمتر با کمیت‌های ورودی موتور (جریان، ولتاژ و توان) اندازه‌گیری شده توسط یک آمپرمتر، یک ولتمتر و یک واتمتر سه فاز جهت برآورد دقت سیستم ضروری می‌باشد. متوسط مقادیر اندازه گیری شده پس از رسیدن سیستم به پایداری حرارتی در جدول ۴ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که میانگین خطا در دو آزمایش کمتر از ٪۴ می‌باشد که در مقایسه با مقادیر تئوری و عملی همخوانی داشته و با توجه به روشهای متداول قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که این میزان خطا در حد خطای گزارش شده در روشهای دیگر کالریمتری [۱] بوده که با صرف هزینه و زمان آزمایش کمتر حاصل شده است.

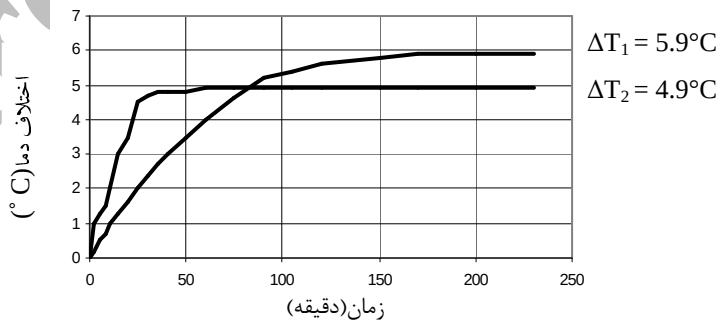
۵. نتیجه گیری

طراحی و ساخت یک سیستم کالریمتری از نوع باز به منظور اندازه گیری تلفات ماشینهای الکتریکی در این مقاله ارائه شده است. عملکرد سیستم ساخته شده بر اساس مقایسه اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی دو محفظه که حرارت تولیدی یکی از آنها (هیتر مرجع) معلوم است می‌باشد.

جهت ساخت کالریمتر از بدنه یک فریزر صندوقی استفاده شده است که توسط یک صفحه فایبر گلاس تقویت شده با پلاست فوم به دو محفظه تقسیم شده است. تلفات حرارتی دیواره‌های کالریمتر به دو روش تئوری و عملی محاسبه و گزارش شده است. در روش عملی متوسط هدایت گرمایی دیواره‌ها ۱/۶۸ W/°C برآورد و مبنای محاسبات بعدی قرار گرفت.

برای انتقال هوا از محفظه‌های کالریمتر از یک فن با قدرت هوا دهی متوسط ۱۸۰ lit/s بصورت مکشی در مجرای خروجی محفظه دوم کالریمتر استفاده شده است. برای هیتر مرجع چند المنت حرارتی با اتصال موازی بصورت محصور در یک استوانه فلزی (برای جلوگیری از تشعشع حرارتی المنتها) بکار رفته است. برای کاهش حرارت سطحی المنت ها و ترکیب هوای درون محفظه یک فن ac در انتهای استوانه فلزی و در مقابل المنتها نصب شده است.

برای اندازه‌گیری اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی هر محفظه از ترموکوپل نوع J (آهن و کنستانتن) بصورت ترموپیل استفاده شده است. ولتاژ تولیدی هر ترموپیل که تابعی از اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی هر محفظه است، با استفاده از یک تقویت کننده تفاضلی و فیلتر مناسب برای کاهش نویز، توسط یک سیستم کامپیوتری جمع‌آوری داده‌ها اندازه‌گیری می‌شود. کالیبراسیون ترموپیل‌ها در آزمایشهای متعدد در بازه دمایی مناسب انجام و ضریب متوسط ۰/۳ V/°C برای آنها بدست آمد.



شکل ۵. نمودار اختلاف دما بر حسب زمان در محفظه‌های اول و دوم در آزمایش موتور بی بار

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های بی‌باری موتور القائی بروش کالریمتری

آزمایش	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	P_{heater}(W)	P_{cal} (W)	V_L (V)	I_L (A)	P_{3p} (W)	خطا
آزمایش اول	۵/۹	۴/۹	۳۳۰	۴۰۷	۳۸۰	۳/۱	۴۲۴	۴ ٪
آزمایش دوم	۵/۸	۴/۸	۳۳۰	۴۰۸/۴	″	″	″	۳/۷ ٪

Archive of SID

www.SID.ir

برای انتقال نمونه‌ها به کامپیوتر و انجام محاسبات لازم توسط نرم‌افزارهای مربوطه، یک سیستم کامپیوتری جمع آوری داده‌ها بکار گرفته شده است. خطای اندازه‌گیری سیستم ساخته شده به دو صورت تئوری و عملی محاسبه، مقایسه و گزارش شده است.

همچنین کالیبراسیون سیستم با انجام آزمایش دو هیتره در شرایط مختلف انجام شده است. براساس محاسبات و نتایج آزمایشهای عملی مقدار خطا در حالت تئوری ٪۴/۹ و در حالت عملی در بدترین حالت ٪۵/۶ و میانگین ٪۲/۷ بدست آمده است که در بسیاری از کاربردهای عملی و صنعتی قابل قبول می‌باشد.

همچنین اندازه‌گیری تلفات یک موتور القایی kW ۵/۵ در حالت بی باری توسط این سیستم در چند مرحله انجام شد. نتایج بدست آمده همخوانی قابل قبولی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط یک واتمتر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. میانگین خطاهای بدست آمده ٪۴ می باشد که با مقادیر تئوری و نتایج بدست آمده در آزمایش کالیبراسیون (دو هیتری) همخوانی قابل قبولی دارد.

دقت این سیستم در مقایسه با دقت گزارش شده در خصوص کالریمتر تعادلی و با توجه به هزینه کمتر و زمان آزمایش کوتاه‌تر قابل قبول می‌باشد و لذا کاربرد این روش توصیه می‌شود.

۶. پیشنهادات

برای بهبود عملکرد سیستم طراحی شده موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

الف) از آنجا که اندازه‌گیری اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی هر محفظه در دقت برآورد تلفات ماشین مورد آزمایش نقش مهمی دارد لذا استفاده از سنسورهای حرارتی دقیق‌تر که بتواند در شرایط محیطی داخل کالریمتر (با توجه به وجود نویزهای محیطی) دمای هر قسمت را با دقتی بالاتر از دقت سنسورهای موجود (۰/۱ درجه سانتیگراد) اندازه گیری کند توصیه می‌شود.

ب) دقت اندازه‌گیری توان هیتر مرجع نیز در برآورد تلفات ماشین مورد آزمایش نقش اساسی دارد. لذا بهبود سیستم اندازه‌گیری توان هیتر مرجع با بهره‌گیری از سیستم جمع‌آوری داده‌ها پیشنهاد می‌شود. همچنین اندازه‌گیری ولتاژ و جریان اعمال شده به موتور تحت آزمایش با استفاده از سیستم جمع‌آوری داده‌ها به تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها کمک قابل توجهی خواهد نمود.

پ) بکار گیری یک فن با قابلیت عبور هوادهی بالاتر از فن موجود محدوده کاری کالریمتر را افزایش داده و بر قابلیت سیستم طراحی شده در اندازه گیری تلفات در در رنج وسیعتر خواهد افزود.

ت) انجام تغییرات لازم جهت اندازه‌گیری تلفات موتور تحت بار کارائی این سیستم را افزایش خواهد داد. شایان ذکر است که این تغییرات عمدتا" مکانیکی بوده و در بیرون از محفظه کالریمتر انجام می‌شود و لذا روی عملکرد و دقت سیستم طراحی شده تاثیر نخواهد داشت.

ث) استفاده از نرم‌افزارهای استاندارد بهمراه سخت افزار موجود (سیستم جمع‌آوری داده‌ها) به قابلیت‌های نظارتی و کنترلی سیستم مذکور خواهد افزود. کنترل درجه حرارت هر محفظه و هوای عبوری از کالریمتر، کنترل توان هیتر مرجع و کنترل شرایط کاری ماشین از جمله مواردیست که با بهره‌گیری از امکانات نرم افزاری و سخت افزاری موجود امکان پذیر بوده و باعث افزایش قابلیت و کارائی سیستم خواهد شد. اندازه‌گیری تلفات ماشینهای الکتریکی (موتور، ترانسفورماتور و . . .) در تغذیه‌های هارمونیکی، اندازه‌گیری گرمای حاصل از عناصر الکترونیک قدرت و ... از جمله کاربردهای بالقوه این سیستم می‌باشد.

مراجع

[1] Turner et al, "*Accurate Measurement of Induction Motor Losses Using Balance Calorimeter*", IEE Proceedings B, Vol. 138, No. 5, Sept. 1991, pp. 233-242.

[2] Bowman, C., Sayani, Wilson, "*A Calorimetric Method for Measurement of Total Loss in a Power Transformer*", IEEE IEMDC Conference 1991.

[3] Jalilian, Gosbell, Perera, Cooper, "*Double Chamber Calorimeter (DCC): a New Approach to Measure Induction Motor Harmonic Losses*". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, Sept. 1999, pp. 680-685.

[4] Bradley, Ferrah, Magill, Clare, "*Improvments to Precision Measurement of Stray Load Loss by Calorimeter*", IEE Conference on Electrical Machines, 1999.

[5] Malliband, Carter, Gordon, "*Design of a Double Jacketed Closed Type Calorimeter for Direct Measurement of Motor Losses*", IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, Pub. No. 456, Sept. 1998.

[۶] طایفی، جلیلیان، "*طراحی وساخت سیستمی جهت اندازه گیری تلفات ماشینهای الکتریکی*" مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی برق، صفحه ۷۲-۶۲، آبان ۱۳۸۲.

[۷] فرخ‌نیا، محمد حسن، "*ترمودینامیک صنعتی، جلد اول و دوم*"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۵۹.

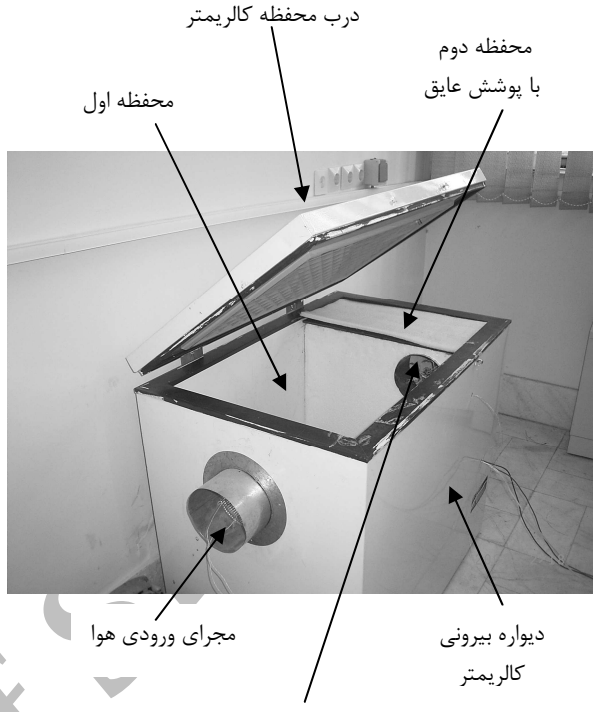
پیوست

پیوست الف: مشخصات موتور القائی تحت آزمایش

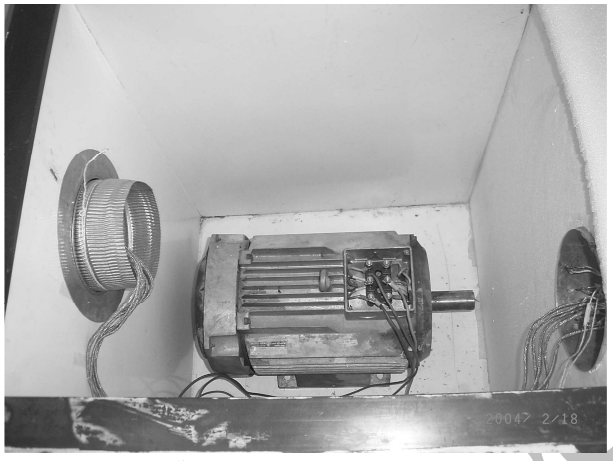
سایز و مدل : YPE 132 M2A، سه فاز، 5.5 kW
2850 rpm ،380 V ،12.5 A ،PF = 0.81 ،50 Hz
ساخت کارخانه موتوژن تبریز – ایران

Archive of SID
www.SID.ir

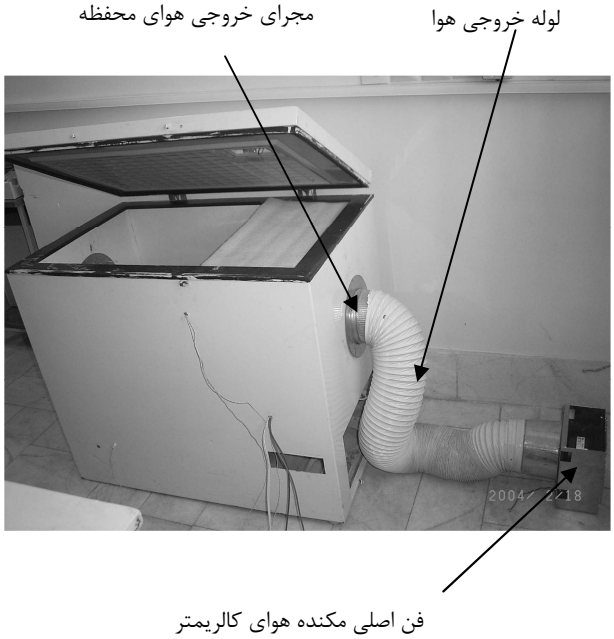
پیوست «ب»: تصاویری از کالریمتر ساخته شده

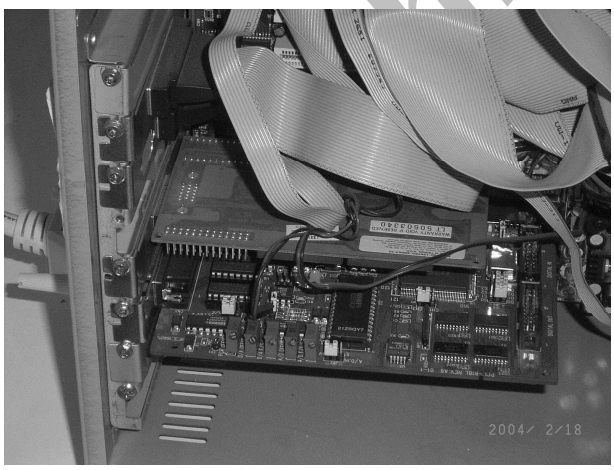


قرارگیری هیتر در محفظه اول برای آزمایش کالیبراسیون (دو هیتری)



قرارگیری موتور القایی در محفظه اول برای آزمایش بی باری





کارت کامپیوتری جمع آوری داده های اندازه گیری شده

Archive of SID
www.SID.ir