پژوهشگاه نیرو

NRI-ER-755-PEMPN21-00-F



رصد فناوری انواع سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار

مدیر پروژه: ارسلان حکمتی

مجری: ایمان صادقی محلی

DOI: 10.30503/nripress.2020.164


بسم الله الرحمن الرحيم

رصد فناوری انواع سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار

مدیر پروژه: ارسلان حکمتی

همکار پروژه: احمد مرادنوری

مجری: ایمان صادقی محلی

انتشارات پژوهشگاه نیرو
۱۴۰۰

کدگزارش: NRI-ER-755-PEMPN21-00-F
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار
رصد فناوری انواع سیستم‌های عایقی ماشین های الکتریکی دوار / مدیر پروژه: ارسلان حکمتی. ویراستار: نازنین محمدی‌نام. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.
۱۶۴ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. حکمتی، ارسلان، همکار پروژه. ۲. /مرادنوری، احمد، همکار پروژه.
۳. صادقی محلی، ایمان.

انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب،انتهای‌بلوارشهیددادمان،پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳
تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱
نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶
وبگاه: www.nri.ac.ir
پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب ارسلان حکمتی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع داده شده و در فهرست منابع و مآخذ آورده شده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. ارسلان حکمتی

۲. احمد مرادنوری

پیشگفتار

امروزه اهمیت و گستردگی مواد عایقی به‌کار گرفته‌شده در ماشین‌های الکتریکی دوّار بسیار زیاد و فراگیر است و در اغلب حوزه‌های مرتبط با صنعت برق و انرژی، هوا فضا، الکترونیک، صنعت حمل و نقل و غیره استفاده می‌شوند. مواد عایقی و طراحی سیستم‌های عایقی، با افزایش کاربری ماشین‌های الکتریکی در محیط‌های خاص و نامناسب، توجه روز افزونی را به خود اختصاص داده‌اند. این محیط‌ها شامل دمای بالا، رطوبت، خوردگی، فشار پایین هوا و ... هستند.

عایق با کیفیت و ساختار مناسب می‌تواند در مقابل ولتاژهای بالا مقاوم بوده و بالعکس کیفیت نامطلوب عایق‌های مذکور منجر به پدیده‌هایی از قبیل شکست عایقی شده که در نهایت منجر به تخریب عایق و اتصال کوتاه و از کار افتادن ماشین الکتریکی خواهد شد.

لذا رصد آخرین نوآوری های صورت گرفته در مواد، ساختار و سیستم‌های عایقی استفاده‌شده در هر کدام از بخش‌های ماشین‌های الکتریکی دوار از اهمیت بسیار برخوردار است. بیش از ۵۰ درصد عیوب مرتبط با ماشین‌های الکتریکی دوار مستقیماً از مسائل عایقی نشأت می‌گیرد.

در تدوین این گزارش، بر مبنای شرح خدمات پروژه، از اولویت‌ها و حساسیت‌های شرکت‌های سازنده ماشین‌های الکتریکی دوار بهره گرفته شده است. فرم های ارزیابی و نظرخواهی تدوین و به شرکت‌های فعال در این زمینه ارسال شد که اصل مدارک دریافتی در بخش پیوست قابل‌مشاهده است.

این گزارش، حاصل جمع‌بندی گزارش‌های پروژه «رصد فناوری انواع سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار» است که توسط آقای ارسلان حکمتی تدوین شده بود. مدیریت این پروژه بر عهده آقای ارسلان حکمتی و نظارت آن برعهده آقای احمد عاطفی پویا بوده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ..... و

۱- فصل اول انواع مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی ۲

۱ ۱ مقدمه ۱

۱ ۲ تعریف برخی اصطلاحات و پارامترها ۱

۱ ۳ شاخص‌های طبقه‌بندی مواد عایق الکتریکی ۲

۱ ۴ خرابی عایقی در ماشین‌های الکتریکی ۴

۱ ۵ عملکرد سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی ۴

۱ ۶ مؤلفه‌های سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی ۴

۱ ۷ سیستم عایقی سیم‌پیچی استاتور ۵

۱ ۷ ۱ عایق هادی ۸

۱ ۷ ۲ عایق حلقه ۹

۱ ۷ ۳ عایق بدنه ۹

۱ ۷ ۴ نگهدارنده‌ی مکانیکی در شیار ۹

۱ ۷ ۵ نگهدارنده‌ی مکانیکی در سر سیم‌پیچی‌ها ۹

1 -8- سیستم عایقی سیم‌پیچی روتور ۱۰

۱ ۸ ۱ روتورهای قطب برجسته ۱۱

۱ ۸ ۲ روتورهای قطب صاف ۱۲

۱ ۹ دسته بندی مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی ۱۳

۱ ۹ ۱ مواد طبیعی ۱۳

۱ ۹ ۲ مواد عایقی مصنوعی ۱۴

۱ ۹ ۳ نوارهای پلاستیکی و بافته‌نشده ۱۴
۱ ۹ ۴ رزین‌های مصنوعی مایع ۱۴
۱ ۹ ۵ پلی‌استرها ۱۵
۱ ۹ ۶ اپوکسی رزین‌ها (اپوکسیدها) ۱۵
-7- 9- ۱ میکا ۱۵
۱ ۹ ۸ الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس) ۱۶
۱ ۹ ۹ لمینیت‌ها (ورقه‌ها) ۱۶
۱ ۱۰ سیستم‌ها و مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشار ضعیف ۱۶
۱ ۱۰ ۱ تفاوت ژنراتورهای توربین باد فشارضعیف و فشارقوی ۱۷
۱ ۱۰ ۲ عایق هادی‌ها در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف ۱۷
۱ ۱۰ ۳ عایق شیار و بدنه در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف ۱۸
۱ ۱۰ ۴ مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف ۱۸
۱ ۱۰ ۵ عایق بین فازها و Overhang در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف ۲۰
۱ ۱۰ ۶ رزین‌ها و لاک‌های مورداستفاده در سیستم عایقی ماشین‌های کوچک و فشارضعیف ۲۰
۱ ۱۱ جمعبندی ۲۱
-2 فصل دوم : تست‌های عایقی کلیدی متداول و آخرین استانداردها ۲۲
۲ ۱ تست‌های سیستم‌های عایقی ۲۳
۲ ۱ ۱ تست‌های عایقی آفلاین ۲۳
۲ ۱ ۲ تست‌های عایقی آنلاین ۲۵
-2- 2 جمعبندی ۲۶
۳- فصل سوم: فاکتورهای تنزل عایقی و چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف..... ۲۷

۳ ۱ تخلیه‌ی جزئی به‌عنوان یک فاکتور مهم تنزل عایقی ۲۸
۳ ۲ چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف ۲۹
۳ ۲ ۱ هوافضا ۲۹
-2- 2- 3 ژنراتور توربین بادی ۳۲
۳ ۲ ۳ ژنراتور برق آبی ۳۹
۳ ۳ جمعبندی ۴۰
۴- فصل چهارم: پیشرفت‌های اخیر مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی ۴۱
۴ ۱ سیستم‌ها و مواد عایقی جدید برای ماشین‌های الکتریکی بزرگ ۴۲
۴ ۲ نانوکامپوزیت‌های پلیمری ۴۲
۴ ۳ کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور ۴۳
۴ ۳ ۱ افزایش توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی با تغییر ضخامت عایق بدنه ۴۳
۴ ۴ استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica ۴۴
۴ ۵ کاهش امپدانس حرارتی عایق بدنه ۴۵
۴ ۶ پیشرفت‌های اخیر در کاهش ضخامت عایق بدنه ۴۷
۴ ۷ نمونه مواد عایقی مدرن مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی امروزی ۴۹
۴ ۷ ۱ محصولات شرکت وانرول برای عایق هادی‌ها ۴۹
۴ ۷ ۲ محصولات شرکت وانرول برای عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی ۵۰
۴ ۷ ۳ محصولات شرکت وانرول برای حفاظت از کرونا ۵۲
۴ ۷ ۴ محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور ۵۳
۴ ۷ ۵ محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور ۵۴
۴ ۷ ۶ محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده ۵۵

۴ ۸ جمعبندی ۵۵

۵- فصل پنجم: تعیین سازندگان و تولیدکنندگان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی در داخل و خارج کشور ۵۷

۵ ۱ مقدمه ۵۸

۵ ۱ ۱ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نوع ماشین ۵۸

۵ ۱ ۲ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی توان خروجی ۵۸

۵ ۱ ۳ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی ولتاژ..... ۵۸

۵ ۱ ۴ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس سرعت ماشین ۵۸

۵ ۱ ۵ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کلاس عایقی ۵۹

۵ ۱ ۶ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نو ع عایق ۵۹

۵ ۱ ۷ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کاربرد..... ۵۹

۵ ۱ ۸ سازندگان و تولیدکنندگان کلیدی خارجی مواد عایقی ماشینهای الکتریکی..... ۵۹

۵ ۱ ۹ سازندگان و تولیدکنندگان داخلی مواد عایقی ماشینهای الکتریکی..... ۸۱

-6 فصل ششم:شناسایی کاربران عمده مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی در کارخانجات داخلی و شناسایی حجم بازار داخلی ۸۶

۶ ۱ شرکت موتوژن [۱۳]-[۱۴] ۸۷

۶ ۲ شرکت جمکو [۱۵]-[۱۶]..... ۸۸

۶ ۳ الکتروژن [۱۷]..... ۸۹

۶ ۴ جایگزینی الکتروموتور زیمنس توسط شرکت‌های داخلی [۱۸]..... ۹۰

۷- فصل هفتم: آثار اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی تکنولوژی های عایقی شناسایی و معرفی شده ۹۱

۷ ۱ مقدمه ۹۲

۷ ۲ آثار اقتصادی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی شده ۹۴

۷ ۳ آثار اجتماعی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی شده ۹۶
۷ ۴ آثار زیست محیطی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی شده ۹۷
-8 فصل هشتم: پیشنهاد جهت ورود تکنولوژی های نوین عایقی به کشور و توسعه کاربرد آنها و بهبود ساختارهای عایقی ماشین های الکتریکی موجود در صنعت برق کشور ۹۸
۸ ۱ ساخت عایق اپوکسی رزین پر شده با مواد نانوکامپوزیت عایقی به منظور بهبود طول عمر، ولتاژ شکست و هدایت حرارتی عایق در ماشین‌های الکتریکی فشارقوی و فشارضعیف ۹۹
۸ ۱ ۱ خواص نانوکامپوزیت‌ها ۱۰۰
۸ ۱ ۲ مشکلات نانو کامپوزیت ها ۱۰۰
۸ ۱ ۳ کاربردهای نانوکامپوزیت ها ۱۰۰
۸ ۱ ۴ روش های تولید نانوکامپوزیت ها ۱۰۰
۸ ۲ استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephthalate (PET) mica ۱۰۱
۸ ۳ استفاده از یک عایق بدنه با رسانایی حرارتی ذاتی بالا ۱۰۲
۸ ۴ استفاده از یک عایق بدنه‌ی نازک تر بر اساس طرح "شیشه‌ی تخت" نوار کاغذی میکا از طریق افزایش محتوی میکا ۱۰۳
۸ ۵ استفاده از رزین های مصنوعی مایع ۱۰۴
۸ ۶ استفاده از مواد عایقی انعطاف پذیر برای عایق شیار و بدنه ۱۰۴
۸ ۷ استفاده از مواد عایقی سیم‌پیچی مناسب برای کاربردهای مختلف هوافضا و ژنراتور بادی ۱۰۴
۸ ۸ استفاده از رزین‌های پلی اورتان ۱۰۶
۸ ۸ ۱ مزایا و ویژگیهای پلیاورتان ۱۰۶
۸ ۹ استفاده از گازهای فومینگ ۱۰۷
۸ ۱۰ راه‌اندازی خط تولید میکا ۱۰۷

۸ ۱۰ ۱ مزایای میکا ۱۰۸
۸ ۱۰ ۲ فرایند استخراج ۱۰۹
۸ ۱۰ ۳ روش های متداول فرآوری میکا ۱۰۹
۸ ۱۰ ۴ معادن ایران ۱۱۰
۸ ۱۰ ۵ کاربردهای میکا ۱۱۱
۸ ۱۰ ۶ میکا موسکوویت و میکا فلوگوپیت ۱۱۱
۸ ۱۰ ۷ انواع میکا ۱۱۱
۸ ۱۱ راه‌اندازی خط تولید عایق کپتون در کشور ۱۱۲
8 -12- راه‌اندازی خط تولید عایق نومکس در کشور ۱۱۲
۸ ۱۲ ۱ ویژگی‌های فنی نومکس [۵۴] ۱۱۳
۸ ۱۲ ۲ فرایند تولید نومکس [۵۴] ۱۱۴
۹- پیوست ۱۱۵
۱۰- مراجع ۱۳۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۶-۱- مشخصات Dupont Kapton 100CRC [۶] ۶۸

جدول ۶-۲- مشخصات DuPont Kapton 150FCRC019 [۶] ۶۸
جدول ۶-۳- مشخصات فیزیکی DuPont Kapton HN در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد [۶] ۶۹
جدول ۶-۴- مشخصات حرارتی DuPont Kapton HN [۶] ۶۹
جدول ۶-۵- مشخصات الکتریکی DuPont Kapton HN در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد [۶] ۷۰
جدول ۶-۶- مشخصات DuPont Kapton PV9100 Series [۶] ۷۰
جدول ۶-۷- مشخصات انواع samicafilm [۸] ۷۳
جدول ۶-۸مشخصات samicapor [۹] ۷۴
جدول ۶-۹- جدول مشخصات samicatherm [۹] ۷۵
جدول ۶-۱۰- مشخصات انواع coronashield [۹] ۷۷
جدول ۶-۱۱- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۹] ۷۸
جدول ۶-۱۲- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور [۹] ۷۹
جدول ۶-۱۳- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۸] ۷۹
جدول ۹-۱- مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱- محدوده‌ی مجاز حرارتی و مواد طبقه‌بندی شده برای کلاس‌های عایقی [۱]-[۳] ۳
شکل ۱-۲ - مؤلفه های یک سیستم عایقی ماشین های الکتریکی دوار [۳] ۵
شکل ۱-۳- سطح مقطع دو ساختار سیم‌پیچی استاتور (a) سیم‌پیچی تصادفی (b) سیم‌پیچی شکل یافته [۳] ۶
شکل ۱-۴- تصویر سر سیم‌پیچی و شیارها در یک استاتور با سیم‌پیچی تصادفی [۳] ۷
شکل ۱-۵- الف) تصویر یک استاتور با سیم‌پیچی شکل‌یافته، ب) نحوه‌ی جایگذاری یک کویل در دو شیار [۳] ۸
شکل ۱-۶- نیروی شعاعی بین لایه بالایی و پایینی کویل‌ها در سر سیم‌پیچی [۳] ۱۰
شکل ۱-۷-نیروی محیطی بین کویل‌ها [۳] ۱۰
شکل ۱-۸- تصویر یک قطب از یک روتور قطب برجسته. بلوک v شکل بین قطب‌های مجاور [۳] ۱۱
شکل ۱-۹- سطح مقطع یک قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی وعایق‌بندی آن برای ماشین‌های با توان حدود چند مگاوات [۳] ۱۱
شکل ۱-۱۰- سطح مقطع یک شیار روتور قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی و عایق‌بندی آن برای ماشین‌های بزرگ [۳] ۱۲
شکل ۱-۱۱- سطح مقطع یک شیار روتور قطب صاف یک توربوژنراتور[۳] ۱۳
شکل ۱-۱۲- اجزای سیستم عایقی یک ماشین الکتریکی کوچک و فشار ضعیف [۹۸] ۱۷
شکل ۱-۱۳- آستر شیار، جدا کننده‌ی شیار و گوه‌ها، نشان داده شده در حین ساخت [۹۸] ۱۸
شکل ۱-۱۴- شکل عایق بین فازها و overhang [۹۸] ۲۰
شکل ۲-۱- الف) سطح مقطع یک کویل در شیار، هنگامی‌که تخلیه‌ی جزئی در سطح کویل اتفاق افتاده، ب) مدار معادل الکتریکی این حالت ۲۴
شکل ۲-۲- تست‌های عایقی آفلاین متداول و استانداردهای مربوطه [۱] و [۱۰]-[۲۰] ۲۵
شکل ۳-۱- مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست ۳۱
شکل ۳-۲- اجزای اساسی سیستم درایو اینورتر PWM [۷۰] ۳۲
شکل ۳-۳- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی اینورتر PWM [۷۰] ۳۲

شکل (۳-۴) مقایسه‌ی مقدار زمان خیز پالس IGBT، با دوره تناوب فرکانس قدرت و زمان متناظر با فرکانس سوییچینگ IGBT [۷۰] ۳۳
شکل ۳-۵- مدل توزیع شده برای امپدانس کابل، وقتی که در فرکانس‌های بالا کار می‌نماید [۷۰] ۳۳
شکل ۳-۶- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی انتهای زمان خیز پالس [۷۰] ۳۳
شکل ۳-۷- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی انتهای زمان خیز پالس + زمان انتشار در کابل [۷۰] ۳۴
شکل ۳-۸- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی ۲* (انتهای زمان خیز پالس + زمان انتشار در کابل) [۷۰] ۳۴
شکل ۳-۹- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی (۲* انتهای زمان خیز پالس + ۳* زمان انتشار در کابل) [۷۰] ۳۵
شکل ۳-۱۰- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، شکل موج پالس در ترمینال ماشین الکتریکی و با کابل به طول ۴۲ متر [۷۰] ۳۵
شکل ۳-۱۱- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل نیم متر [۷۰] ۳۶
شکل ۳-۱۲- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل چهار متر [۷۰] ۳۶
شکل ۳-۱۳- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل ۴۲ متر [۷۰] ۳۷
شکل ۳-۱۴- متداول‌ترین مواد عایقی برای ژنراتورهای توربین بادی فشار ضعیف [۸] ۳۸
شکل ۳-۱۵- دسته‌بندی مواد عایقی مورداستفاده در ژنراتورهای توربین بادی با سیم‌پیچی تصادفی و سطح ولتاژ ۶۹۰ تا ۹۰۰ ولت [۶۹] ۳۸
شکل ۳-۱۶- واد عایقی روکشی و دربرگیرنده در سیستم عایقی [۵] ۳۹
شکل ۳-۱۷- پوشش نیمه هادی آسیب دیده از تخلیهی جزئی سطحی [۷۱] ۴۰
شکل ۴-۱- کاهش ضخامت عایق بدنهی استاتور ۱۵ کیلوولتی یک ماشین الکتریکی [۸۷] ۴۳
شکل ۴-۲- تاریخچه‌ی تغییرات توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی دوار [۸۸]-[۸۹] ۴۴
شکل ۴-۳- مقایسه‌ی استقامت ولتاژی سیستم PET-میکای تقویت شده، نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET-میکا [۹۰] ۴۵
شکل ۴-۴- مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا و عایق مرسوم [۹۲] ۴۶
شکل ۴-۵- رشته‌های شیشه‌ای در روش استاندارد و روش powerfab [۹۳] ۴۶

شکل ۴-۶- ضخامت نوار استاندارد و نوار powerfab [۹۳] ۴۷
شکل ۴-۷- طولانی شدن مسیر انتشار درخت الکتریکی در عایق بدنه رزین با نانوذرات در مقایسه با حالت عدم وجود نانوذرات [۹۵] ۴۸
شکل ۴-۸- مقایسه‌ی طول عمر، micalastic با micalastic با ۱۰ درصد وزنی نانوذرات (قطر حدود ۲۰ نانومتر) به علاوه ۵ درصد وزنی 3-glycidyloxy-propyltrimethoxysilane [۹۶] ۴۹
شکل ۴-۹- مشخصات انواع samicafilm [۹] ۵۰
شکل ۴-۱۰- تصویر انواع samicafilm [۹] ۵۰
شکل ۴-۱۱- جدول مشخصات samicapor [۱۰] ۵۱
شکل ۴-۱۲- تصویر samicapor [۱۰] ۵۱
شکل ۴-۱۳- جدول مشخصات samicatherm [۱۰] ۵۱
شکل ۴-۱۴-تصویر samicatherm [۱۰] ۵۲
شکل ۴-۱۵- مشخصات انواع coronashield [۱۰] ۵۲
شکل ۴-۱۶- تصویر انواع coronashield [۱۰] ۵۳
شکل ۴-۱۷- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۱۰] ۵۳
شکل ۴-۱۸- تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۱۰] ۵۴
شکل ۴-۱۹- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور [۱۰] ۵۴
شکل ۴-۲۰- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۹] ۵۵
شکل ۴-۲۱- تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۹] ۵۵
شکل ۶-۱- محصولات شرکت Krempel به عنوان مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک، عایق شیار، عایق فاز و نگهدارنده شیار [۳] ۶۱
شکل ۶-۲- محصولات شرکت Krempel به عنوان مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک، گوه شیار [۳] ۶۱
شکل ۶-۳ - محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، عایق هادی یا حلقه [۴] ۶۲
شکل ۶-۴- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، استحکام دهنده سیم‌پیچی و میله [۴] ۶۳
شکل ۶-۵- محصولات شرکت Krempel به عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، پر کننده شیار [۴] ۶۴

شکل ۶-۶- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، عایق اصلی [۴] ۶۵
شکل ۶-۷- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، روکش قسمت انتهایی سیم‌پیچی [۴] ۶۵
شکل ۶-۸- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشینهای الکتریکی فشار قوی، گوه و بسته‌بندی سیم‌پیچی‌ها [۴] ۶۶
شکل ۶-۹- مواد عایقی تولیدی شرکت Ganapathy Industries [۵] ۶۷
شکل ۶-۱۰- بازار صادرات شرکت Ganapathy Industries [۵] ۶۷
شکل ۶-۱۱ -تصویر انواع samicafilm [۸] ۷۴
شکل ۶-۱۲- تصویر samicapor [۹] ۷۵
شکل ۶-۱۳-تصویر samicatherm [۱۰] ۷۶
شکل ۶-۱۴- تصویر انواع coronashield [۱۰] ۷۷
شکل ۶-۱۵- تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۹] ۷۸
شکل ۶-۱۶ - تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۸] ۸۰
شکل ۶-۱۷- سیم‌لاکی پایش ۸۲
شکل ۶-۱۸- شرکت سیم‌لاکی کویر ۸۳
شکل ۶-۱۹- شرکت لاک سیم ۸۳
شکل ۶-۲۰- شرکت صنایع سیم‌لاکی کاشان ۸۴
شکل ۶-۲۱- سیم‌لاکی فارس ۸۵
شکل ۸-۱- مؤلفه‌های سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار [۳] ۹۳
شکل ۹-۱- مقایسه‌ی استقامت ولتاژی سیستم PET-میکای تقویت شده، نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET-میکا [۱۰] ۱۰۲
شکل ۹-۲- مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا و عایق مرسوم [۱۱] ۱۰۳
شکل ۹-۳- رشته‌های شیشه‌ای در روش استاندارد و روش powerfab [۱۲] ۱۰۳
شکل ۹-۴- ضخامت نوار استاندارد و نوار powerfab [۱۲] ۱۰۴

مقدمه

در این گزارش شاخص‌های طبقه‌بندی مواد عایق الکتریکی موردبررسی قرار گرفته و عوامل خرابی عایقی در ماشین‌های الکتریکی مطالعه شده است. همچنین عملکرد سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی موردبحث قرار گرفته و مؤلفه‌های سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی معرفی شده است، شامل: سیستم عایقی سیم‌پیچی استاتور، عایق هادی، عایق حلقه، سیستم عایقی سیم‌پیچی روتورهای قطب برجسته و روتورهای قطب صاف.

دسته‌بندی مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی انجام پذیرفته و انواع مواد عایقی مطالعه شده‌اند، شامل: مواد طبیعی، مواد عایقی مصنوعی، نوارهای پلاستیکی و بافته‌نشده، رزین‌های مصنوعی مایع، پلی‌استرها، اپوکسی رزین‌ها (اپوکسیدها)، میکا، الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس)، لمینیت‌ها (ورقه‌ها). سیستم‌ها و مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشارضعیف معرفی شده و تفاوت ژنراتورهای توربین باد فشارضعیف و فشارقوی، عایق هادی‌ها در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف، عایق شیار و بدنه در این ماشین‌ها، مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه، عایق بین فازها و Overhang و رزین‌ها و لاک‌های مورداستفاده در سیستم عایقی ماشین‌های کوچک و فشارضعیف موردبررسی قرار گرفته است.

انواع تست‌های سیستم‌های عایقی آفلاین و آنلاین، استانداردهای مربوطه و عیوب قابل‌تشخیص توسط این تست‌ها ارائه شده است. چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف موردتحلیل قرار گرفته و تخلیه‌ی جزئی به‌عنوان یک فاکتور مهم تنزل عایقی بررسی شده است.

سیستم‌های عایقی در کاربردهای خاص هوافضا و ژنراتور توربین بادی و ... بحث شده و مواد عایقی استفاده شده در سیستم‌های عایقی فوق معرفی شده‌اند.

در نهایت سیستم‌ها و مواد عایقی مدرن برای ماشین‌های الکتریکی بزرگ و کوچک به تفکیک بررسی شده و نانوکامپوزیت‌های پلیمری و کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور به‌عنوان دو رویکرد نوین در سیستم‌های عایقی موردمطالعه قرار گرفته است. تأثیر تغییر ضخامت عایق بدنه بر افزایش توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی، استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica، و کاهش امپدانس حرارتی عایق بدنه از موارد دیگری ست که بدان پرداخته شده است. پیشرفت‌های اخیر در کاهش ضخامت عایق بدنه نیز بررسی شده و در پایان، نمونه مواد عایقی مدرن مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی امروزی برای عایق هادی‌ها، عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی، برای حفاظت از کرونا و برای اجزای روتور و استاتور معرفی شده است.

فصل اول انواع مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۱ ۱ مقدمه

ساختمان ماشین‌های الکتریکی از سه دسته مواد اصلی هادی‌ها، هسته و عایق‌ها تشکیل شده است. عایق‌های الکتریکی برخلاف هادی‌ها و هسته در ماشین‌های الکتریکی، اجزای غیرفعال به‌شمار می‌آیند. بدین‌معنا که هیچ نقشی در تولید میدان مغناطیسی و یا هدایت آن و همچنین تولید گشتاور و هدایت جریان ندارند. درعین‌حال نیازمندی‌های اساسی الکتریکی، حرارتی و مکانیکی را در میان اجزای فعال در ساختمان ماشین‌های الکتریکی دوار، فراهم می‌سازند. عایق‌های الکتریکی در میان هادی‌های مختلف حامل جریان در ولتاژهای مختلف و نیز بین شیارهایی که هادی‌ها را در خود جای می‌دهند، جداسازی الکتریکی را ممکن می‌سازند. آنها با هدایت حرارت، نقش حرارتی و همچنین با نگهداشتن هادی‌ها در داخل شیارها و فراهم ساختن پوشش‌های حفاظتی، نقش مکانیکی خود را ایفا می‌کنند.

امروزه اهمیت و گستردگی مواد عایقی به‌کار گرفته‌شده در ماشین‌های الکتریکی دوار بسیار زیاد و فراگیر بوده و در اغلب حوزه‌های مرتبط با صنعت برق و انرژی، هوا فضا، الکترونیک، صنعت حمل و نقل و غیره به‌کار گرفته می‌شوند.

عایق با کیفیت و ساختار مناسب می‌تواند در مقابل ولتاژهای بالا مقاوم باشد و بالعکس کیفیت نامطلوب عایق‌های مذکور منجر به پدیده‌هایی از قبیل شکست عایقی شده که در نهایت منجر به تخریب عایق و اتصال کوتاه و از کار افتادن ماشین الکتریکی خواهد شد.

اولین سیستم‌های عایقی به‌کار گرفته‌شده در صنعت و تجهیزات برق بر پایه‌ی مواد عایقی طبیعی بوده‌اند که بعدها با توسعه مواد مصنوعی، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در سیستم‌های عایقی حاصل شد و این پیشرفت‌ها به‌سرعت در حال تغییر خصوصیات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی عایق‌ها هستند که لزوم بررسی جدیدترین تحولات در این زمینه و مقایسه با عایق‌های مرسوم را مشخص می‌سازد [۱]–[۳].

۱ ۲ تعریف برخی اصطلاحات و پارامترها

سیم‌پیچی[۱] ماشین‌های الکتریکی از تعدادی کلاف[۲] تشکیل شده است که هر کلاف ممکن است از یک یا چند دور یا حلقه[۳] ایجاد شده باشد.

چنانچه سیم‌پیچی دارای کلاف‌های تک‌دور باشد به آن شین یا میله تک‌دور[۴] می‌گویند.

هر دور یا حلقه دارای دو هادی[۵] است که هر هادی، یک بازوی حلقه یا بازوی کلاف[۶] به‌شمار می‌آید.

هادی‌ها اغلب از چند رشته[۷] تشکیل می‌شوند. آنها در قسمت پیشانی به هم متصل می‌شوند و به قسمت اتصال که خارج از هسته است، اتصال پیشانی[۸] گفته می‌شود.

1- Winding
2- Coil
3-Turn or Loop
4- Bar
5- Conductor
6- Coil Side
7- Strand or Sub Conductor
8- Overhang or End-Connection

در نهایت کلاف‌ها هنگام سربندی به یکدیگر متصل و سرسیم پیچی‌ها[1] را تشکیل می‌دهند.

۱ ۳ شاخص‌های طبقه‌بندی مواد عایق الکتریکی

عوامل حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی، چهار شاخص اصلی در تقسیم‌بندی و طبقه‌بندی مواد عایق‌های الکتریکی به‌شمار می‌آیند که از جمله آنها می‌توان به محدوده قابلیت هدایت حرارتی، سطح ولتاژ کار، استحکام در برابر خم‌شدگی و پارگی، مقاوم بودن در برابر واکنش‌های شیمیایی، قابلیت پذیرش مواد آغشته‌کننده، مقاومت در برابر سایش و خراشیدگی و سطح استقامت ولتاژ ماده عایقی اشاره کرد. طبقه‌بندی مواد عایق‌های الکتریکی بر اساس هر یک از شاخص‌های یادشده کاری دشوار و پیچیده است.

شاخص محدوده مجاز حرارتی و تحمل حرارتی عایق به‌عنوان مهم‌ترین عامل در میزان بازدهی و طول عمر تجهیزات به‌عنوان شاخص اصلی طبقه‌بندی مواد عایقی موردتوجه قرار گرفته است.

درصورتی که جنس نامناسب برای عایق استفاده‌شده در ساختار ماشین‌های الکتریکی انتخاب شود، در نتیجه امکان انتقال حرارت کافی وجود نداشته باشد و یا آن جنس تحمل دمای کاری ماشین را نداشته باشد، افت بازدهی ماشین و کاهش عمر آن حتمی خواهد بود.

با کمک فناوری‌های مدرن از قبیل نانو در ساخت مواد عایقی، چشم‌انداز جدیدی برای افزایش راندمان، افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های اورهال ماشین‌های الکتریکی گشوده شده است. ازاین‌رو امکان‌سنجی به‌کارگیری استفاده از این تکنولوژی‌ها در ساختار عایق‌های ماشین‌های الکتریکی استفاده‌شده در داخل کشور باید موردتوجه قرار بگیرد. از مهم‌ترین دستاوردهای توسعه فناوری فوق، بهبود قابلیت اطمینان و افزایش عمر تجهیز و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و در نتیجه صرفه اقتصادی برای بهره‌بردار است.

سیستم عایقی سیم‌پیچ‌های جریان متناوب به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که در یک ولتاژ و دمای مشخص حداقل برای طول عمر تعریف‌شده‌ی تجهیز، استقامت و پایداری الکتریکی و مکانیکی و ابعادی خود را حفظ کند.

در استانداردهای بین‌المللی کلاس‌های مختلف سیستم‌های عایقی الکتریکی توصیف شده است. این توصیف بر پایه ماکزیمم دمایی که این سیستم می‌تواند به‌صورت مداوم کار کند و نیز تحمل ولتاژ نامی سیستم را دارا باشد، انجام شده است.

بر طبق استانداردهای بین‌المللی، مواد عایقی بر اساس حداکثر دمای مجاز به هفت کلاس حرارتی Y، A، E، B ، F، H وC تقسیم‌بندی شده‌اند [۱]–[۳]. محدوده مجاز حرارتی و مواد طبقه‌بندی‌شده برای هر کلاس در جدول زیر ارائه شده‌اند:

1- End-Winding

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

شکل ۱-۱- محدوده‌ی مجاز حرارتی و مواد طبقه‌بندی‌شده برای کلاس‌های عایقی [۱]-[۳]

کلاس حرارتي	دماي مجاز (درجه سانتيگراد)	مواد عايقي
Y	90	كاغذ خشک، پنبه يا ابريشم، تركيب اوره و فرمالدئيد، كائوچوي طبيعي محكم و مواد مختلف ترموپلاستيک كه نقاط نرم شدگي مشخصي دارند
A	105	كاغذ، پنبه يا ابريشم آغشته به روغن يا اندود شده با روغن جلا، يا ورقهاي لايه لايه اي كه با خشک كردن طبيعي روغن ها و صمغ ها يا فنل فرمالدئيد روي هم قرار داده شده اند، الياف سلولزي كه به نمک اتري تبديل شده اند، پلي اميدها و روغنهاي آلي مختلف
E	120	فنل فرمالدئيد و ملامين فرمالدئيد كه قالب بندي شده و به صورت لايه لايه همراه با مواد سلولزي روي هم قرار داده مي شوند، تركيب پلي وينيل، پلي اورتان، صمغها و روغنهاي اپوكسي، تري استات سلولز، تري فتال پلي اتيلن، روغن تبديل شده به الكيد
B	130	مواد نرم و انحنا پذير معدني (از قبيل ميكا، تركيبات و الياف سنگ معدن يا شيشه)، كه با صمغ هاي آلي مناسب: قير مخصوص لاك، الكيد، اپوكسي، فنل يا ملامين فرمالدئيد آميخته شده و استحكام يافته اند.
F	155	مشابه كلاس B اما صمغ هاي ارائه شده براي اين كلاس عبارتند از: الكيد، اپوكسي، سيليكون-الكيد
H	180	مشابه كلاس B اما با صمغ هاي سيليكون، كائوچوي سيليكون.
C	180≥	ميكا، سنگ معدن، سراميک، شيشه (به تنهايي يا با چسبها يا صمغ هاي سيليكون معدني)، پلي اميدها و پلي تترافلور و اتيلن

معمولاً تنش حرارتی در شرایط نرمال کار، نقش کمی در ایجاد پیری ناشی از تنش‌های حرارتی ایجاد می‌کند. در موارد خاص همچون موتورهای مورداستفاده در متهها و دریل‌ها، راه آهن و ژنراتورهای هواپیما ممکن است ماشین الکتریکی در دمای بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و حتی ۳۰۰ درجه کار کند.

تنش‌های حرارتی– مکانیکی در سیستم‌های عایقی در اثر اختلاف دما در نواحی مختلف و یا متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی مواد مختلف در سیستم عایقی حادث می‌شود. بنابراین باید در طراحی سیستم عایقی، ترکیب مواد به‌کار گرفته‌شده با توجه به ضرایب انبساط حرارتی در نظر گرفته شود.

موارد ذیل می‌توانند عوامل ایجاد تنش‌های محیطی در ماشین‌های الکتریکی باشند:

- رطوبت محیط
- دمای محیط (تغییرات دمای محیط– هوای خیلی سرد)
- مواد محیط (موادساینده– بخارهای اسیدی و خورنده در محیط)

شرایط نامناسب محیطی تا حدی با ایزوله کردن ماشین الکتریکی از محیط اطراف قابل‌پیشگیری است.

ارتعاشات، شوک‌های مکانیکی ناشی از جریان‌های اتصال کوتاه و نیروهای گریز از مرکز در روتور از جمله تنش‌های مکانیکی ماشین‌های الکتریکی گردان هستند. اتصالات پیشانی و سرسیم‌پیچی‌ها نیز در معرض تنش‌های مختلف مکانیکی قرار دارند که با استفاده از بستن اتصال پیشانی سیم‌پیچ‌های استاتور به رینگ نگهدارنده و تزریق رزین به این ناحیه از اثرات نامطلوب تنش‌های مکانیکی جلوگیری می‌شود.

قطعات عایقی در روتور باید دارای استحکام مکانیکی بالا و سیستم نگهدارنده‌های مناسب برای مهار هادی‌ها در برابر فشارهای مکانیکی ناشی از میدان‌های مغناطیسی و به‌ویژه نیروهای چرخشی گریز از مرکز باشند. از دیگر تنش‌هایی که سیستم عایقی روتورها در معرض آن قرار دارند، فشارهای مکانیکی یا به عبارت بهتر ترمومکانیکی در هنگام راه‌اندازی و

خاموش کردن ماشین‌های الکتریکی است. با تحریک سیم‌پیچ روتور، جاری شدن جریان الکتریکی در هادی‌ها منجر به ایجاد حرارت و حرکت محوری آنها می‌شود که امکان آسیب به قطعات عایقی را فراهم می‌سازد. برای این منظور معمولاً از پوشش‌های لغزنده در عایق‌های شیار روتور استفاده می‌شود تا در مقابل خراشیدگی ناشی از تنش مذکور مقاوم باشند.

سیم‌پیچی روتور ماشین‌های سنکرون قطعات عایقی حلقه (حلقه با حلقه و حلقه با زمین) و شیار دارند. سیم‌پیچی روتور این ماشین‌ها تحت ولتاژ DC هستند که در نتیجه‌ی آن عایق حلقه‌ها نازک بوده و از طرفی به دلیل نبود اثر پوستی در رشته‌های هادی‌ها، عایق رشته‌ها نیاز نیست. از سوی دیگر تغذیه DC با سیستم تحریک استاتیک منجر به ایجاد تنش‌های اضافی در روتور شده که تخلیه جزئی در فواصل سیم‌پیچ روتور را ممکن می‌سازد.

۱ ۴ خرابی عایقی در ماشین‌های الکتریکی

شکست عایقی می‌تواند به خرابی‌هایی منجر شود که نهایتاً منجر به خروج از سرویس پیش‌بینی‌نشده و تأثیرات منفی مالی و بعضاً خطرات ایمنی خواهد شد. برای برخی صنایع خاص که عملکرد بی‌وقفه موردنیاز است، خروج از سرویس ناخواسته موردپذیرش نیست. هزینه‌ی خروج از سرویس پیش‌بینی‌نشده برای یک سکوی استخراج نفت در دریا حدود ۲۵۰۰۰ دلار در ساعت است [۱]. استقامت عایقی مواد عایقی مدام در حال افزایش و بهبود است. به‌عنوان مثال با معرفی مواد جدید در ۲۰ سال اخیر، استقامت عایقی عایق‌های بدنه[1] تقریباً دو برابر شده است [۲].

استرس‌های محیطی، الکتریکی، مکانیکی و حرارتی به تنزل عایقی منجر می‌شوند که در نهایت به خرابی عایقی می‌انجامد [۳]–[۴]. خرابی عایقی موجب اتصال کوتاه در سیم‌پیچی ماشین الکتریکی می‌شود و نهایتاً جریان‌های بالا از سیم‌پیچی معیوب عبور خواهند کرد [۵]. مطالعه‌ای بر روی۱۱۴۱ موتور القایی با توان نامی بالای ۲۰۰ اسب بخار نشان می‌دهد که حدود ۳۰ درصد خرابی‌های موتور ناشی از خرابی‌های عایقی است [۶]. با پیشرفت در سنسورها، پردازش سیگنال دیجیتال، روش‌های تشخیص و استانداردهای تست، خرابی‌های عایقی قابل‌تشخیص هستند [۷]–[۸]. با تخمین برخط تنزل عایقی و طول عمر در مراحل اولیه، سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی می‌توانند در برابر پیری به نحو بهتری حفاظت شوند و می‌توان با تعمیرات و نگهداری زمان‌بندی‌شده، از خروج از سرویس پیش‌بینی‌نشده اجتناب کرد.

ضخامت‌های مواد عایق که نمایانگر مقاومت حرارتی در ماشین الکتریکی هستند، تأثیر بسزا در خنک‌سازی ماشین و بنابراین بارگذاری الکتریکی و تولید گشتاور دارند. تلاش‌های بسیاری صورت پذیرفته است تا برای فشردگی طرح، هزینه‌ی کمتر ساخت، و بازده‌ی بالاتر، ضخامت عایقی حداقل شود [۳].

۱ ۵ عملکرد سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی

دو عملکرد اصلی سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی عبارت است از:

اجتناب از اتصال کوتاه بین دورهای سیم‌پیچی و نیز بین دورهای سیم‌پیچی با زمین (هسته آهنی)

اجتناب از لغزش و حرکت سیم‌پیچی در روتور و استاتور

۱ ۶ مؤلفه‌های سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی

سیستم عایقی برای انواع ماشین‌های الکتریکی مانند ماشین‌های سنکرون با تحریک سیم‌پیچی‌شده، ماشین‌های مغناطیس دائم و ... به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود:

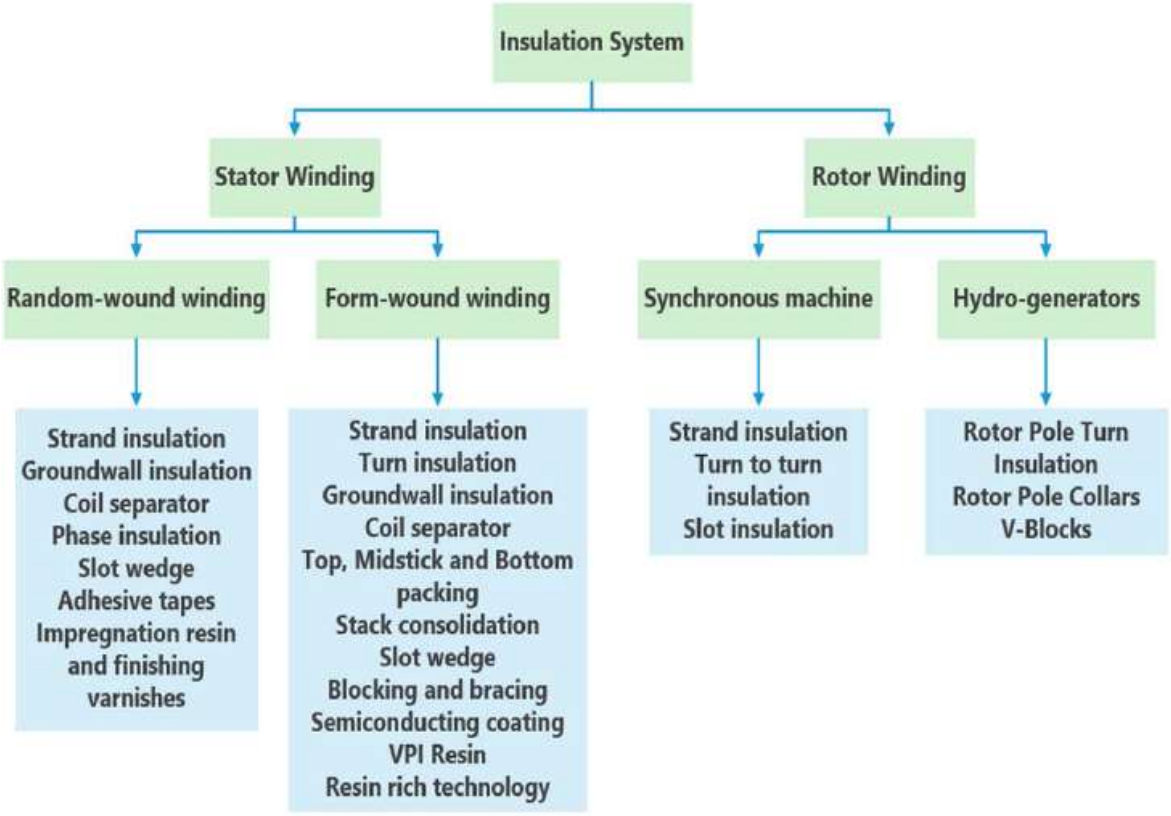
عایق سیم‌پیچی استاتور

1- Groundwall Insulations

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

عایق سیم‌پیچی روتور

مؤلفه‌های یک سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار در شکل (۱–۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، استاتور و روتور دارای مؤلفه‌های عایقی متفاوتی هستند.



شکل ۱-۲ – مؤلفه‌های یک سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار [۳]

۱ ۷ سیستم عایقی سیم‌پیچی استاتور

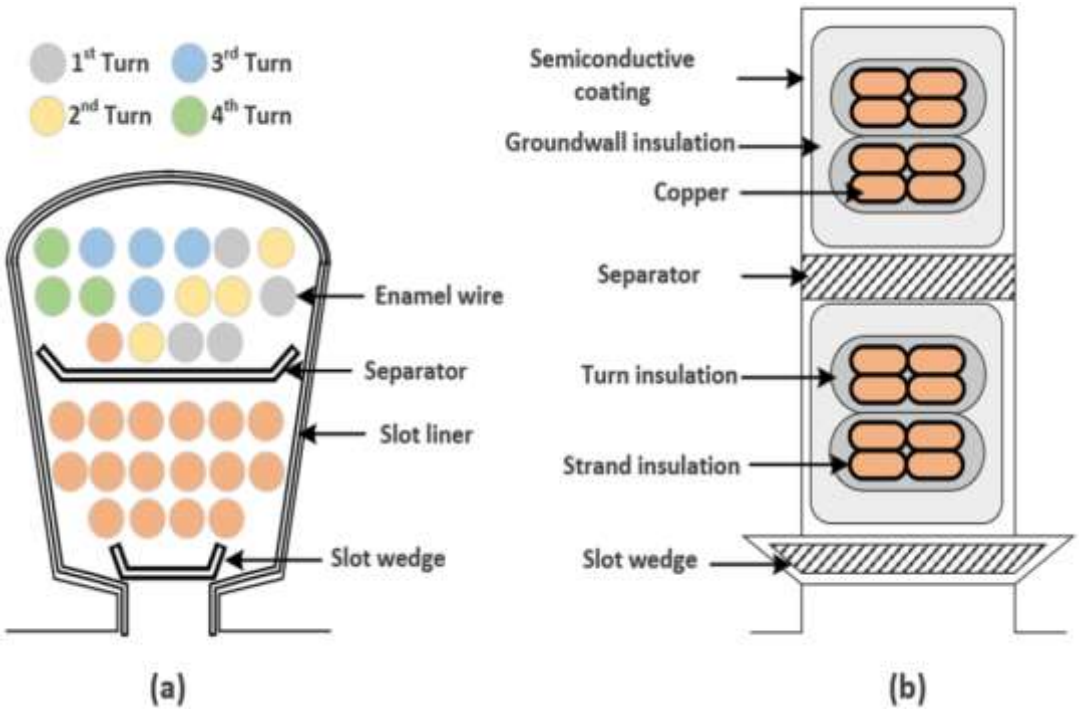
دو نوع اصلی سیم‌پیچی استاتور موجود است:

- سیم‌پیچی تصادفی[1]
- سیم‌پیچی شکل یافته[2] با هادی‌ها یا شمش‌ها

سطح مقطع هر دو ساختار سیم‌پیچی استاتور در شکل (۱–۲) به‌صورت نمای کلی نشان داده شده‌اند.

1 Random-wound winding

2 Form-wound winding



شکل ۱-۳- سطح مقطع دو ساختار سیم‌پیچی استاتور (a) سیم‌پیچی تصادفی (b) سیم‌پیچی شکل‌یافته [۳]

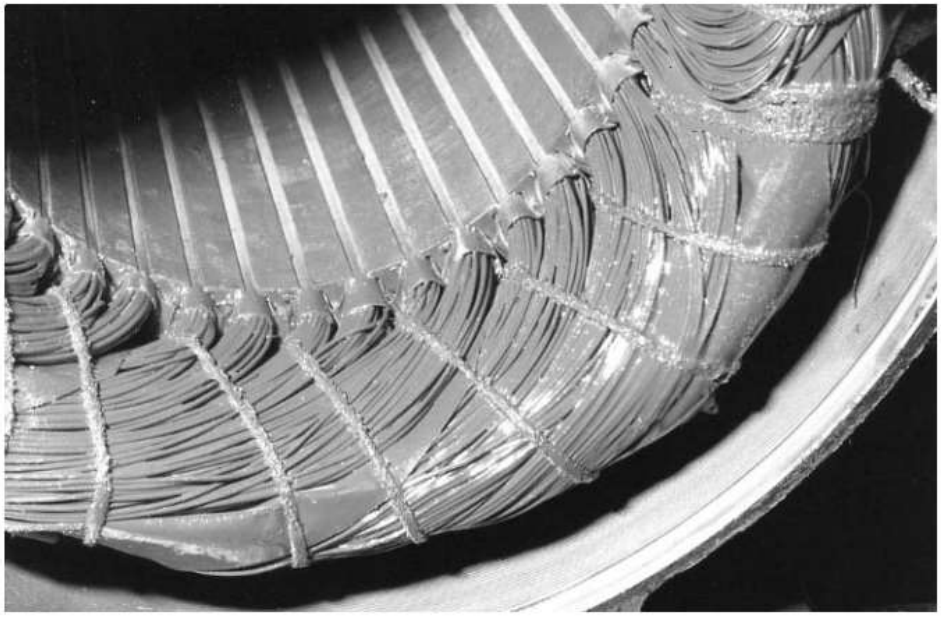
سیم‌پیچی‌های تصادفی شامل سیم با روکش عایقی لعابی، جداکننده،[۱] عایق شیار،[۲] عایق گوه‌ای شیار[۳] و .. هستند. در این نوع سیم‌پیچی، سیم‌های مسی گرد با روکش عایقی لعابی[۴] به‌طور تصادفی و در کنار هم به دور دندانه‌های استاتور پیچانده می‌شوند.

این نوع سیم‌پیچی اساساً برای ماشین‌های با توان تا چند صد کیلووات و سطح ولتاژ کمتر از ۱۰۰۰ ولت استفاده می‌گردند [۳]. به‌دلیل استفاده از این نوع سیم‌پیچی ممکن است یک دور با ولتاژ بالا (متصل به ترمینال ورودی) در جوار یک دور با ولتاژ پایین (نزدیک به نقطه خنثی ولتاژ پایین) قرار گیرد.

در شکل ۱-۴- تصویر سرسیم‌پیچی[۵] و شیارها در یک استاتور با سیم‌پیچی تصادفی نشان داده شده است.

1- separator
2- slot liner
3- slot wedge
4- magnet wire or enamel wire
5- End Winding

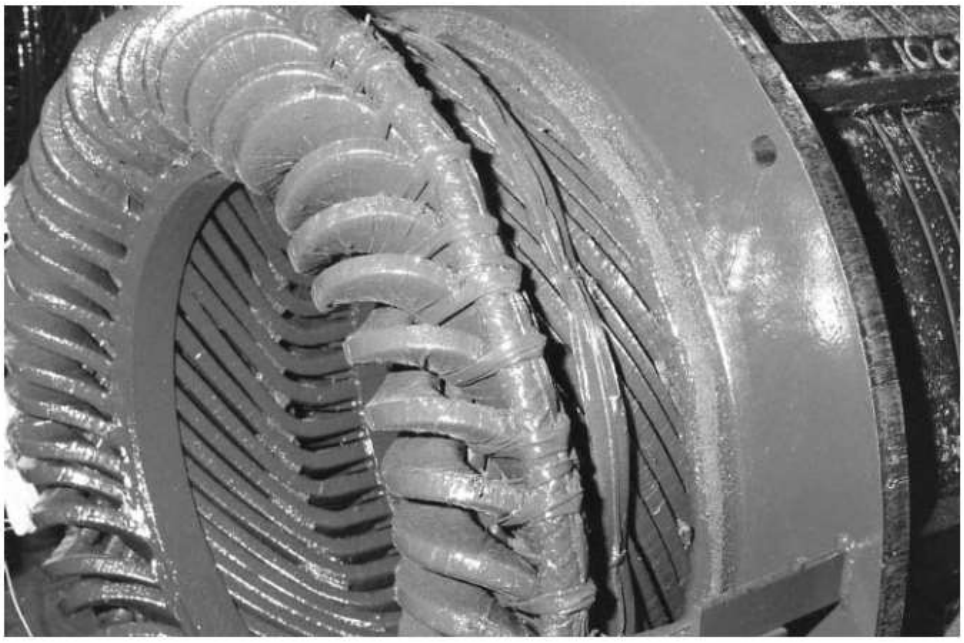
DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۱-۵- تصویر سرسیم‌پیچی و شیارها در یک استاتور با سیم‌پیچی تصادفی [۳]

درحالی‌که در سیم‌پیچی شکل‌یافته، کویل‌ها، پیش از قرارگیری در شیارها، شکل داده شده‌اند. هادی‌ها می‌توانند عامدانه به‌طریقی جاگذاری شوند که حداقل اختلاف ولتاژ بین دورهای هم‌جوار در یک کویل حاصل شود. این سیم‌پیچی‌ها معمولاً برای ماشین‌های الکتریکی با ولتاژ بیشتر از ۱۰۰۰ ولت استفاده می‌شود. با حداقل‌سازی ولتاژ بین دورهای مجاور در این نوع سیم‌پیچی، عایق نازک‌تری برای جداسازی دورها مورداستفاده قرار می‌گیرد [۳].

در شکل زیر، تصویر یک استاتور با سیم‌پیچی شکل‌یافته و نحوه‌ی جایگذاری یک کویل در دو شیار نشان داده شده است.



الف)



ب)

شکل ۱-۶- الف) تصویر یک استاتور با سیم‌پیچی شکل‌یافته، ب) نحوه‌ی جاگذاری یک کویل در دو شیار [۳]

۱ ۷ ۱ عایق هادی[1]

هادی‌ها به‌منظور کاهش سطح مقطع، حذف اثر پوستی و تلفات ناشی از آن، انعطاف‌پذیری و همچنین کاهش تلفات گردابی، از چند رشته[2] ساخته می‌شوند.

عایق رشته‌ها باید دارای ضخامت کم به‌منظور کاهش فضای اشغالی، مقاومت بالا در برابر سایش و خراشیدگی باشند و توانایی تحمل فشارها و تنش‌های حرارتی را داشته باشند. امروزه، این ملزومات به‌وسیله‌ی لایه روغن یا لایه روغن‌های جلادهنده مصنوعی مختلف (لعاب‌ها) برآورده می‌شود.

سیم‌های مستطیل‌شکل و گرد نیز ممکن است به‌وسیله لایه‌های روی هم نوارهای عایق‌بندی از قبیل نوارهای با الیاف شیشه و نوارهای کاغذ آمید، عایق‌بندی شوند. با این وجود، اغلب ملزومات عایق هادی‌های به‌کار گرفته‌شده در ماشین‌های الکتریکی کوچک به‌وسیله لعاب‌ها برآورده می‌شود.

در سیم‌پیچی‌های تصادفی، عایق هادی می‌تواند به‌عنوان عایق حلقه،[3] نیز عمل کند.

1- strand Insulation

2- Strands

3- Turn Insulation

۱ ۷ ۲ عایق حلقه

عایق حلقه، مجموعه‌ای از رشته‌های هادی را پوشانده و هدف اصلی آن عایق کردن حلقه‌ها و ممانعت از اتصال کوتاه بین آنها در هر کلاف است. این عایق‌ها باید قادر به تحمل ولتاژهای فاز با زمین، فاز به فاز و اضافه‌ولتاژهای گذرا و همچنین تنش‌های حرارتی و مکانیکی باشند [۳].

۱ ۷ ۳ عایق بدنه[1]

عایق بدنه، به قطعات عایقی که هادی‌های مسی عایق‌شده را از دیواره‌های هسته استاتور که زمین شده است جدا می‌سازند، گفته می‌شود. این قطعات همچنین ورق‌های جداکننده کلاف‌ها در فازهای مختلف را شامل می‌شوند. این قطعات باید قادر به تحمل فشارهای مغناطیسی باشند که منجر به لغزش حلقه‌ها می‌شوند [۳].

پوشش‌های کاهش‌دهنده‌ی تنش عایق بدنه برای سطوح ولتاژ ۶ کیلوولت و بالاتر، بسیار مهم بوده و استفاده می‌شوند تا از وقوع تخلیه‌ی جزئی جلوگیری شود [۳]. پوشش نیمه‌رسانا و پوشش سیلیکون کاربید از انواع پوشش‌هایی هستند که مورداستفاده قرار می‌گیرند [۳].

۱ ۷ ۴ نگهدارنده‌ی مکانیکی در شیار[2]

کلاف‌ها و میله‌ها در شرایط کار عادی موتورها و ژنراتورها در معرض فشارهای مغناطیسی قرار دارند. همچنین در صورت وقوع خطایی در ماشین برای مثال یک خطای فاز به فاز، جریان گذرای خطا ممکن است به چندین برابر جریان در شرایط عادی برسد که نیروهای مغناطیسی بسیار قوی‌تری نسبت به شرایط کار نرمال ایجاد خواهد کرد. کلاف‌ها باید در برابر حرکات ناشی از نیروهای مکانیکی در شرایط کار عادی و یا حالت گذرا مقاوم باشند در غیر این صورت هر گونه حرکت و لغزشی در کلاف‌ها ممکن است به عایق‌ها آسیب‌های جدی وارد کند. ضمن تأمین خواص مکانیکی و حرارتی موردنیاز، حجم سیستم عایقی شیار باید در مینیمم مقدار ممکن نگهداشته شود تا حجم ماده‌ی هادی فعال و مؤثر در شیار بتواند ماکزیمم شود [۳].

۱ ۷ ۵ نگهدارنده‌ی مکانیکی در سرسیم‌پیچی‌ها[3]

هدف سرسیم‌پیچی‌ها تأمین اتصال الکتریکی مطمئن میان کلاف‌ها است. این اتصالات باید نسبت به هسته زمین‌شده، به‌صورت مناسب، عایق شوند. در ماشین‌های الکتریکی با ولتاژهای بالا، فاصله‌ی خزشی طولانی‌تری بین اتصالات سرسیم‌پیچی و هسته وجود دارد و همچنین ماشین‌های الکتریکی سرعت بالا دارای سرسیم‌پیچ‌های با طول زیاد هستند.

سرسیم‌پیچی‌ها باید در برابر لغزش‌ها و حرکات احتمالی مهار شوند. برای این منظور روش‌های مختلفی موجود است. یکی از روش‌ها، چسباندن سرسیم‌های هر کلاف توسط نوعی چسب و یا استفاده از طناب‌های مهار است.

در ماشین‌های الکتریکی بزرگ‌تر، از نوعی تسمه‌های مهار یا نگهدارنده استفاده می‌شود. این تسمه‌ها از جنس استیل عایق‌شده با صفحات پلی‌استر یا اپوکسی گلاس یا فایبرگلاس هستند [۳].

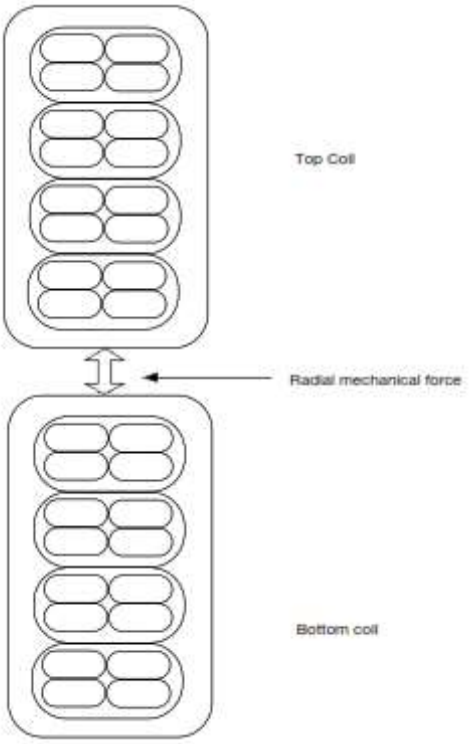
نیروهای شعاعی و محیطی بین کویل‌ها در سرسیم‌پیچی که در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند، متناسب با مجذور جریان گذرنده از سیم‌پیچی هستند.

1- Groundwall Insulation

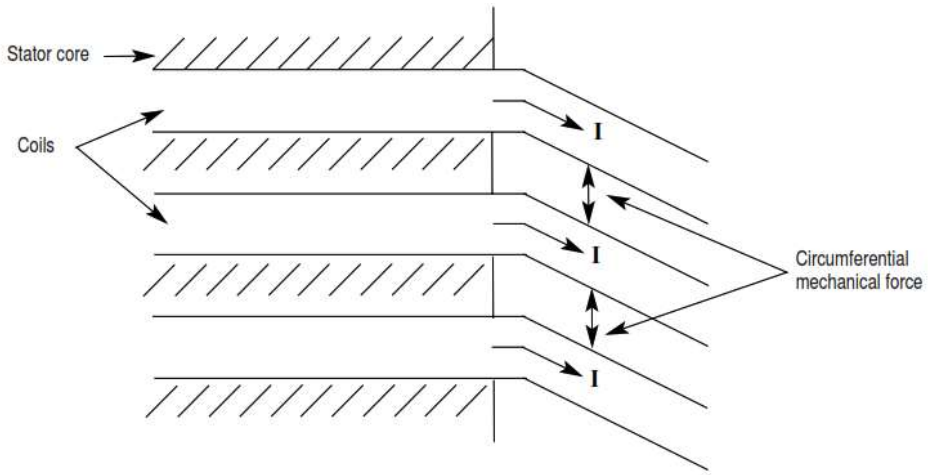
2- Mechanical Support in the Slot

3- Mechanical Support in the End Winding

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۱-۷- نیروی شعاعی بین لایه بالایی و پایینی کویل‌ها در سرسیم‌پیچی [۳]



شکل ۱-۸- نیروی محیطی بین کویل‌ها [۳]

۱ ۸ سیستم عایقی سیم‌پیچی روتور

سیم‌پیچی روتور ماشین سنکرون، دارای عایق حلقه به حلقه و عایق شیار (زمین) است. سیم‌پیچی روتور ماشین‌های سنکرون عمدتاً در معرض ولتاژ dc نسبتاً کوچکی در مقایسه با ولتاژ ac سیم‌پیچی استاتور قرار دارند. حتی در توربوژنراتورهای بسیار بزرگ، ولتاژ روتور معمولاً کمتر از ۶۰۰ ولت است [۳]. بنابراین عایق حلقه به حلقه و شیار در روتور این ماشین‌ها بسیار نازک هستند. درصورتی که ولتاژ dc از طریق سیستم تحریک استاتیکی ایجاد شود (با عملکرد ادوات الکترونیک قدرت ایجاد شود)، ولتاژهای ضربه‌ای بزرگی روی ولتاژ dc سوار خواهد بود و تنش‌های بیشتری اعمال می‌شود که می‌تواند تخلیه‌های

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

جزئی را ایجاد کند [۳]. سایر تنش‌های اعمالی به عایق روتور، تنش‌های حرارتی و تنش‌های ناشی از نیروهای گریز از مرکز خواهند بود.

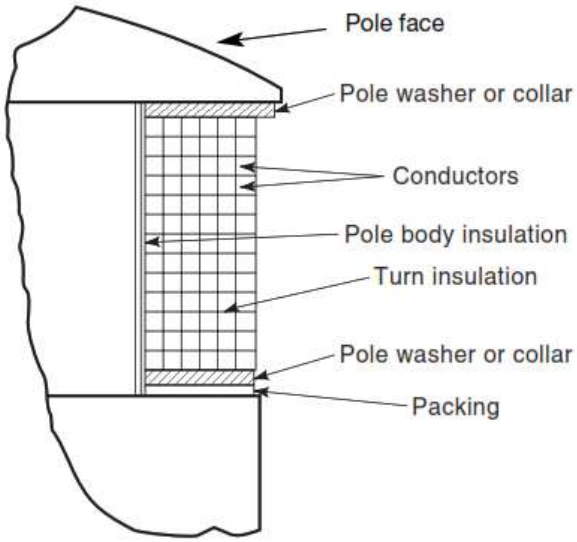
۱ ۸ ۱ روتورهای قطب برجسته

هیدروژنراتورها (ژنراتورهای برق‌آبی) و موتورهای سنکرون با تعداد قطب‌های برابر با چهار یا بیشتر، روتورهای قطب برجسته دارند. هر قطب، به‌صورت جداگانه ساخته شده و سیم‌پیچی روتور روی آن نصب می‌شود و سپس قطب‌های کامل‌شده، روی روتور نصب می‌شوند. تصویر یک قطب از یک روتور قطب برجسته در شکل زیر نشان داده شده است. بلوک v شکل بین قطب‌های مجاور نیز در این شکل نشان داده شده است.



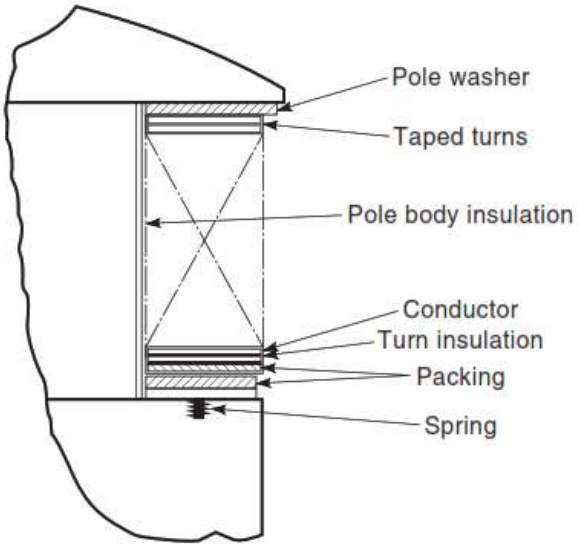
شکل ۱-۹- تصویر یک قطب از یک روتور قطب برجسته. بلوک v شکل بین قطب‌های مجاور [۳]

سطح مقطع یک قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی وعایق‌بندی آن برای ماشین‌های با توان حدود چند مگاوات، در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۰- سطح مقطع یک قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی و عایق‌بندی آن برای ماشین‌های با توان حدود چند مگاوات [۳]

سطح مقطع یک قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی و عایق‌بندی آن برای ماشین‌های بزرگ، در شکل زیر نشان داده شده است.



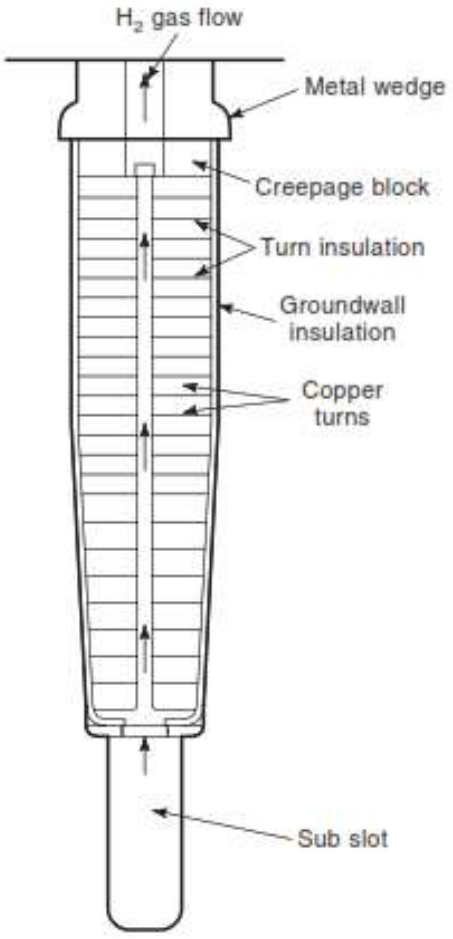
شکل ۱-۱۱- سطح مقطع یک شیار روتور قطب برجسته و نحوه‌ی سیم‌پیچی و عایق‌بندی آن برای ماشین‌های بزرگ [۳]

۱ ۸ ۲ روتورهای قطب صاف

روتورهای قطب صاف که روتورهای استوانه‌ای نیز نامیده می‌شوند، اغلب در توربوژنراتورهای ۲ یا ۴ قطب یا روتورهای سیم‌پیچی‌شده‌ی موتورهای الکتریکی استفاده می‌شوند [۳].

سطح مقطع یک شیار روتور قطب صاف یک توربوژنراتور، در شکل زیر نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۱-۱۲- سطح مقطع یک شیار روتور قطب صاف یک توربوژنراتور[۳]

یکی از چالش‌برانگیزترین، جنبه‌های طراحی روتور قطب صاف، سرسیم‌پیچی‌ها است. بعد از خارج شدن سیم از از هر شیار، سیم ۹۰ درجه خم می‌شود و در محیط روتور تا رسیدن به شیار موردنظر برای وارد شدن به آن، کشیده می‌شود. درست قبل از وارد شدن به شیار موردنظر، ۹۰ درجه‌ی دیگر خم می‌شود. هادی سیم‌پیچی و عایق آن باید در ناحیه‌ی سرسیم‌پیچی‌ها در روتور قطب صاف، تحمل نیروهای گریز از مرکز را داشته باشند تا دچار شکستگی نشوند [۳] و [۷].

۱ ۹ دسته‌بندی مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی

انتخاب سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی همیشه وابسته به مواد موجود، قیمت آنها، ملزومات فنی مرتبط با کاربرد خاص ماشین و نسبت قیمت‌های فرایندهای تولید موجود در یک زمان خاص است. در این بخش مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی موردبحث قرار گرفته و دسته‌بندی شده‌اند [۳]–[۵].

۱ ۹ ۱ مواد طبیعی

اولین سیستم‌های عایقی از مواد طبیعی استفاده می‌کردند که در صنعت برای سایر کاربردها، بسیار استفاده می‌شدند. این مواد شامل الیاف کاغذی، ابریشم، پنبه، کتان، پشم، پنبه‌ی نسوز (آزبست) بودند. این الیاف برای استفاده به‌عنوان عایق هادی‌ها بعد از ترکیب با رزین‌های طبیعی گرفته‌شده از درختان، گیاهان و حشرات و نفت خام، مورداستفاده قرار می‌گرفتند. رزین‌های

طبیعی گرفته‌شده از نفت خام شامل واکس‌ها، آسفالت‌ها و قیر و لاک هستند. مواد جامد از قبیل شن، میکا، پنبه‌ی نسوز، کوارتز و سایر مواد معدنی اغلب به‌عنوان پرکننده[1] در کنار این مواد استفاده می‌شدند.

از اولین مواد استفاده‌شده در عایق بدنه‌ی استاتور، نوعی پارچه‌ی کتانی لاک‌زده بود. این ماده عمدتاً از ترکیب پارچه‌کتان اشباع‌شده با یک رزین طبیعی ساخته می‌شد که بعد از قرارگیری در معرض هوا اکسید شده و تبدیل به یک لایه‌ی نازک محکم، سخت و الاستیک می‌شد [۳].

در طی جنگ جهانی اول، رزین‌های آسفالتی (بیتومن) برای اولین بار با میکا ترکیب شدند و موجب بهبود عایق بدنه‌ی استاتور توربین ژنراتورها شدند [۳].

۱ ۹ ۲ مواد عایقی مصنوعی

در سال ۱۹۰۸، دکتر باکلند، به‌عنوان اولین ماده‌ی عایق مصنوعی، ترکیب phenol-formaldehyde resins را توسعه داد. Alkyd resins در سال ۱۹۲۶ و در همین سال aniline-formaldehyde به‌عنوان عایق‌های مصنوعی جدید معرفی شدند. در ادامه نیز volatile organic chemiclas (VOC) و سپس مواد دیگری با نام‌های polyvinyl chloride و urea-formaldehyde و acrylic و polystyrene و nylon و melamine-formaldehyde نیز پیش از جنگ جهانی دوم استفاده شدند [۳]. از آن پس مواد عایقی و رزین‌های مصنوعی متعدد دیگری ارائه شدند که می‌توان به پلی‌اورتان، پلی‌پروپیلن، پلی‌کربنات و پلی‌اتیلن و گروه دیگری از الیاف‌ها و نوارها از گلیکول پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) اشاره کرد [۳].

۱ ۹ ۳ نوارهای پلاستیکی و بافته‌نشده

در دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی، مهندسان با تخصص عایق، شروع به استفاده از مواد جدید ساخته‌شده با نوارهای پلاستیکی مصنوعی کرده و در ادامه مواد با پایه‌ی پلیمر– الیاف، به‌عنوان عایق شیار، عایق حلقه و عایق فاز به تولیدکنندگان موتورهای القایی با سیم‌پیچی تصادفی پیشنهاد شد. این مواد جدید، پتانسیل کاهش قیمت، عملکرد بهتر و فرایند ساخت آسان‌تر را داشتند. در ادامه از نایلون‌ها و پلی‌استرها نیز استفاده شد. این مواد به‌صورت وسیع در موتورهای کوچک و متوسط فشارضعیف مورداستفاده قرار گرفتند و با روش تست IEEE 117 پذیرفته شده که در صورت استفاده با لاک مناسب، به‌عنوان سیستم عایقی کلاس‌های B (۱۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) و F (۱۵۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) مورداستفاده قرار بگیرند [۳].

۱ ۹ ۴ رزین‌های مصنوعی مایع

یکی از فرایندهای توسعه‌ای مهم در بحث مواد عایقی، جایگزینی رزین‌های طبیعی و مصنوعی با قابلیت حل‌شوندگی، توسط رزین‌های مصنوعی نامحلول بوده است. این مواد معمولاً قابلیت سفت‌شدگی در برابر حرارت، کاتالیزروها و تابش را دارند. علاوه بر پایداری حرارتی بهبودیافته و مشخصات فیزیکی، حذف حل‌شونده‌ها، این مواد را به‌عنوان دوست‌دار طبیعت معرفی کرده و احتمال ایجاد حفره یا حباب در عایق بدنه نیز کاهش یافته است. به‌منظور عایق بدنه‌ی استاتورهای با سیم‌پیچی شکل‌یافته، دو خانواده از رزین‌ها بسیار مهم هستند که پلی‌استرها و اپوکسی‌ها هستند. دیگر رزین‌های نامحلول، که گاهی وقت‌ها برای کاربردهای خاص استفاده می‌شوند، سیلیکون‌ها، آکریلیت‌ها، ایمیدها و ترکیبات فنولیک‌ها با سایر رزین‌ها هستند [۳].

1- filler

۱ ۹ ۵ پلی‌استرها

رزین‌های پلی‌استری از رزین‌های آلکیدی تکامل پیدا کرده و از ۱۹۴۲ به بعد موجود هستند. اولین مصارف آن شامل کاربردهای نظامی بوده است. اندکی بعد از جنگ جهانی دوم، مهندسان شرکت وستینگهاوس شروع به کارهای آزمایشگاهی موردنیاز برای تبدیل مواد پلی‌استری به عایق با مشخصات خوب برای استفاده در ماشین‌های الکتریکی فشارقوی کردند و ماده‌ی با نام تجاری ترمالاستیک را تولید کردند [۳].

۱ ۹ ۶ اپوکسی رزین‌ها (اپوکسیدها)

اپوکسیدها از سال۱۹۴۷ به‌صورت تجاری موجود بودند. اپوکسی رزین‌ها مزایای بسیار زیادی نسبت به رزین‌های پلی‌استری موجود در سال‌های ابتدایی و میانی دهه‌ی ۱۹۵۰ داشتند. شرکت جنرال الکتریک در آن زمان از این مواد به‌عنوان عایق ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌کرد [۳].

۱ ۹ ۷ میکا

انسان‌ها در زمان‌های ماقبل تاریخ نیز از میکا استفاده می‌کردند. از نظر شیمیایی، میکاها، سیلیکات‌های پیچیده‌ای از ترکیب آلومینیوم با پتاسیم، منیزیم، آهن، سدیم، لیتیم، فلوئور هستند. میکاهای مهم، muscovite، Phlogopite، biotite به‌شمار می‌آیند. از میکاهای دیگری که زیاد شناخته‌شده نیستند می‌توان، lepidolite، paragonite و zinnwaldite را نام برد [۳]. میکا ماده‌ای معدنی است که در صنایع مختلف برای عایق‌بندی حرارتی و الکتریکی کاربرد فراوانی دارد. میکا به دلیل مقاومت بالایی که در برابر حرارت و الکتریسیته دارد باعث شده که در زمره مهم‌ترین عایق‌های حرارتی و الکتریکی قرار گیرد. این ماده معدنی از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگون به‌دست می آید و آن را برای استفاده در صنایع به شکل ورق ورق شده در اندازه و ضخامت‌های مختلف در می‌آورند که این محصول به ورق میکا mica sheet مشهور است.

میکا به‌صورت‌های مختلفی از جمله ورق میکای نرم و سخت، ورق میکا رولی و طلق میکا در بازار موجود است. ورق میکا به دلیل تحمل بسیار بالایی که در حرارت و الکتریسیته دارند و تا ۸۵۰ الی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کند کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف به‌عنوان ماده نسوز و عایق الکتریکی دارد. میکا به‌عنوان بهترین عایق در قطعات یکسوکننده (کموتاتورها)، مولدهای بزرگ و موتورهای الکتریکی به‌کار گرفته شده است. استقامت الکتریکی میکای طبیعی ۲۵ کیلوولت بر میلی‌متر است. مقاومت در برابر قوس الکتریکی، فرسایش الکتریکی و قابلیت عبور امواج ماکروویو از دیگر مشخصه‌های اصلی الکتریکی میکا است. میکا در برابر آب و مواد شیمیایی از جمله اسیدها، حلال‌ها، بازها و روغن‌های معدنی پایدار و مقاوم است. میکا دارای ضریب الاستیسیته (قابلیت ارتجاعی) بالایی است و در برابر فشار، ضربه و تنش‌های کششی و خمشی مقاومت زیادی دارد.

در اصل میکا یک ماده عایق مقاوم است و به دلیل ساختار ویژه‌ای که دارد می‌تواند به ورقه‌های نازک تقسیم شود و در عین حال خصوصیات عایق‌بندی خود را حفظ کند. محصولات میکا به‌صورت ورق میکا، لمینت، میکا رولی و بسیاری از محصولات میکا دیگر تولید می‌شود. میکا هنگام قرار گرفتن در معرض گرمای شدید، در معرض نور، آب و برق، پایداری خود را حفظ می‌کند. در نتیجه در کوره‌های انفجار و مخازن استفاده گسترده‌ای از آن می‌شود. همچنین در کابل‌های برق، در سیستم‌های اعلام حریق و سیستم امنیتی و در بخاری و دیگ‌های بخار استفاده از میکا رواج دارد. به‌طور خلاصه، تطبیق‌پذیری میکا سبب شده است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع و بخش‌های مختلف داشته باشد.

نوار نسوز میکا ترکیبی از پارچه فیبرشیشه‌ای، کاغذ میکا و فیلم پلی‌اتیلن ترفتالات آغشته‌شده با اپوکسی پلی‌استر است.

استفاده از نوار نسوز میکا که در ساختار آن از کاغذ میکا، پارچه فیبر شیشه‌ای و پلی‌اتیلن ترفتالات استفاده می‌شود، برای افزایش امنیت کابل‌های ابزار دقیق و ثبت سیگنال در بیمارستان‌ها، سکوهای نفتی و تأسیسات نظامی و صنعتی و همچنین در تونل‌ها اهمیت زیادی دارد. چراکه در صورت آتش‌سوزی این سیم‌ها قادر هستند دمایی بین ۹۵۰ – ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را

تحمل کنند. ظرفیت گرمایی میکای مصنوعی ۱۲۰۰ درجه و میکا نوار طبیعی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد است. استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بالای این نوع نوارها باعث می‌شود که بتوان در تجهیزاتی که تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه با نوار کار می‌کنند از این نوع نوارها استفاده کرد. نوار میکا هیچ‌گونه گاز سمی، هالوژن و آزبستی ندارد.

۱ ۹ ۸ الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس)

تولید فایبرگلاس‌ها از سال ۱۹۲۲ شروع شده اما کاربرد آنها در ماشین‌های الکتریکی از سال ۱۹۴۴ شروع شد. به‌عنوان یک ماده‌ی غیر ارگانیک، شیشه در مقابل تخلیه‌ی جزئی رفتار بسیار خوبی دارد. فایبرگلاس‌ها برای تقویت خواص مکانیکی عایق‌های الکتریکی مورداستفاده قرار می‌گیرند.

۱ ۹ ۹ لمینیت‌ها (ورقه‌ها)

پلیمرهای با قابلیت سفت شدن در برابر گرما، به‌صورت وسیع برای ساخت مواد عایق الکتریکی به‌صورت ورقه (لمینیت) استفاده می‌شوند. لمینیت‌ها معمولاً در گوه‌ها،[1] مواد مسدودکننده، نوارهای پرکننده و آستر شیار کاربرد دارند. IEC و NEMA درجات مختلفی را بر اساس میزان تقویت‌شدگی لمینیت‌ها، رزین استفاده‌شده در ساخت آنها و مشخصات حرارتی، الکتریکی و مکانیکی آنها مشخص کرده‌اند.

۱ ۱۰ سیستم‌ها و مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشارضعیف

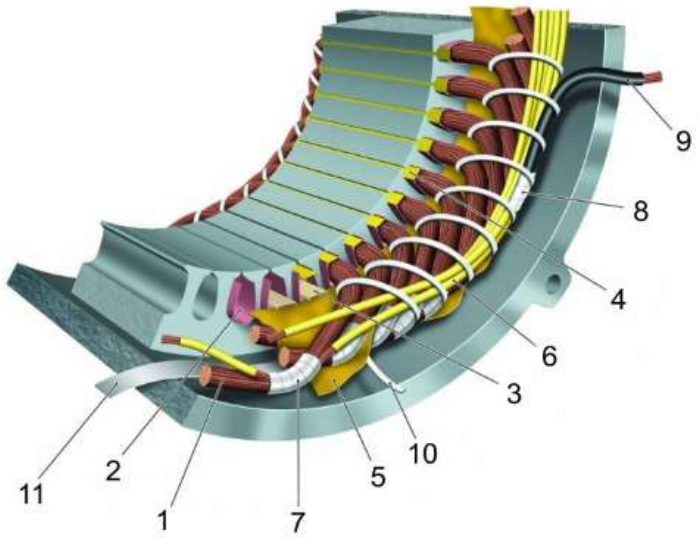
سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشارضعیف، نسبتاً ساده هستند اما با این اوصاف، چندین ماده عایقی دارند که باید به نحوی انتخاب شوند تا در هماهنگی با هم عملکرد مناسب داشته باشند. این ماشین‌ها، اغلب محصولات با قیمت پایین بوده و طول عمر محدودی نیز دارند، که این موارد سبب می‌شوند تا بازدهی و هزینه‌ی مواد، فاکتورهای غالب در انتخاب سیستم عایقی شود. سیستم‌های عایقی این ماشین‌ها، نسبت به سیستم‌های عایقی پیچیده‌ی به‌کار برده‌شده در ماشین‌های بزرگ و فشار قوی، ساده‌تر هستند [۹۸]–[۹۹]. به‌خصوص در موتورهای الکتریکی که درایو با اینورتر دارند، اضافه‌ولتاژهای گذرایی به بزرگی ۲ تا ۳ برابر ولتاژ نامی ماشین، باید توسط سیستم عایقی تحمل شود. این اضافه‌ولتاژها می‌توانند منجر به وقوع تخلیه‌ی جزئی شده و متعاقباً موجب شکست و تخریب عایقی کلی شوند [۹۹].

مؤلفه‌های عایقی این ماشین‌ها، بر اساس عملی که انجام می‌دهند، به سه دسته تقسیم می‌شوند. این سه دسته شامل، عایق سیم‌پیچی تولیدکننده‌ی میدان مغناطیسی (عایق هادی)، عایق بدنه/شیار و عایق بین فازها هستند. همچنین، مایع آغشته (لاک یا رزین)، نیز یکی از مؤلفه‌های اصلی بیشتر سیستم‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشار ضعیف است. این مواد، مانند چسب برای سیم‌پیچی‌ها عمل می‌کنند و استحکام مکانیکی لازم برای آنها را فراهم آورده و ارتعاشات سیم‌پیچی‌ها را کاهش می‌دهند. پلی‌استر، پلی‌استر آمید و اپوکسی، مواد شمیایی اصلی برای این کاربرد هستند [۹۸].

در شکل زیر، اجزای سیستم عایقی یک ماشین الکتریکی کوچک و فشارضعیف نشان داده شده‌اند [۹۸].

1- wedges

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



1 turn insulation, 2 slot liner, 3 slot separator, 4 wedge, 5 phase separator, 6 lead sleeving, 7 coil-nose tape, 8 connection tape, 9 cable, 10 tie cord, and 11 bracing.

شکل ۱-۱۳- اجزای سیستم عایقی یک ماشین الکتریکی کوچک و فشارضعیف [۹۸]

۱ ۱۰ ۱ تفاوت ژنراتورهای توربین باد فشارضعیف و فشارقوی

ژنراتورهای توربین باد موجود در بازار، هم در سطوح ولتاژ فشارضعیف موجود بوده و هم در سطوح ولتاژ فشارقوی موجود هستند. تفاوت طراحی سیستم عایقی این دو دسته، شامل موارد زیر است. ژنراتورهای فشارقوی از سیم‌پیچی‌های شکل‌یافته و هادی‌های تخت تشکیل شده‌اند و اغلب در آنها از میکا به‌عنوان عایق بدنه استفاده شده است. درحالی‌که در ژنراتورهای فشارضعیف، از سیم‌پیچی‌های تصادفی و هادی‌های گرد، استفاده می‌شود و از میکا به‌عنوان عایق بدنه یا عایق بین فازی استفاده نمی‌شود [۹۸].

۱ ۱۰ ۲ عایق هادی‌ها در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف

عایق هادی‌ها در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف، دو وظیفه اساسی دارند که اولین وظیفه، عایق‌سازی بین حلقه‌ها بوده و دومین وظیفه، چسبندگی خوب بین هادی و رزین آغشته است. در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف، سیم‌پیچی‌ها عمدتاً با سیم‌های گرد لعاب‌دار انجام می‌شود. لعاب یک فاکتور اساسی در سیستم عایقی هادی‌ها در این ماشین‌های است. حق انتخاب زیادی بین انواع مختلف لعاب، بر اساس کلاس حرارتی ماشین و کاربرد آن وجود دارد. NEMA MG-1 فهرست حاوی انواع مختلف لعاب‌ها را ارائه می‌دهد [۹۸]–[۹۹].

ملاحظاتی که باید برای عایق هادی‌های ماشین‌های کوچک و فشارضعیف در نظر داشت در ادامه عنوان شده‌اند [۹۸]–[۹۹]:

- مشخصات مکانیکی از قبیل دوام، انعطاف‌پذیری، چسبندگی، مقاومت در برابر سایش و خراشیدگی
- مشخصات شیمیایی از قبیل قرار گرفتن در معرض حل‌کننده‌ها و قرار گرفتن در محیط‌های سرد
- قابلیت لحیم‌پذیری بدون برداشتن لایه‌ی عایق هادی
- کلاس حرارتی مطلوب
- ولتاژ شکست الکتریکی

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

- ضریب تلفات عایقی
- مصالحه بین ضریب پرشدگی شیار (توسط هادی و عایق آن) و شکست الکتریکی
- مقاومت در برابر تخلیه‌ی جزئی
- میزان نیاز به رزین‌ها یا لاکی‌های آغشته
- مقاومت در برابر شوک حرارتی

۱ ۱۰ ۳ عایق شیار و بدنه در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف

عایق‌های شیار و بدنه برای حفاظت عایق الکتریکی و حفاظت مکانیکی سیم‌ها از لبه‌های تیز شیار استفاده می‌شوند و از مواد مختلفی بدین‌منظور استفاده می‌گردد [۹۸]–[۹۹].

آستر شیار و جداکننده‌ی شیار، در این ماشین‌ها عمدتاً از کاغذها، نوارها یا لایه لایه‌های دارای انعطاف ساخته می‌شوند. گوه‌ها وظیفه‌ی نگهداری سیم‌پیچی‌ها در شیارها و جلوگیری از حرکت سیم‌پیچی‌ها را دارند و بنابراین باید استحکام مکانیکی بالایی داشته باشند. در شکل زیر، آستر شیار، جداکننده‌ی شیار و گوه‌ها در حین ساخت نشان داده شده‌اند [۹۸].



شکل ۱-۱۴- آستر شیار، جداکننده‌ی شیار و گوه‌ها، نشان داده‌شده در حین ساخت [۹۸]

۱ ۱۰ ۴ مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف

مواد عایقی انعطاف‌پذیر زیادی برای استفاده به‌عنوان عایق شیار و بدنه وجود دارد. این مواد به سه دسته تقسیم می‌شوند [۹۸]–[۹۹]:

- ✓ تک‌لایه‌های عایقی: این مواد اغلب کاغذها یا نوارهای عایقی هستند. کاغذها شامل موارد زیر هستند:
- کاغذ کرافت که از فیبرهای چوب با قیمت پایین ساخته شده و در تجهیزات با عایق غوطه‌ور در روغن استفاده می‌شود.
- کاغذ rag که ۱۰۰ درصد کتان بوده و بنابراین نسبت به کاغذ کرافت محکم‌تر بوده و عملکرد بهتری دارد.
- کاغذ fish که کاغذ تا حدی بازسازی‌شده سلولز–پلاستیک بوده و عموماً به‌دلیل خاصیت صلب و سخت بودنش استفاده می‌شود.

- کاغذ چرمی[1] در گذشته یک کاغذ بهبودیافته با تغییرات شیمیایی با لاستیک یا کائوچو و نوعی رزین sandarac gum resin بود اما هم‌اکنون، عموماً با پایه‌ی PVC است.
- کاغذ غیر ارگانیک که مشخصات حرارتی خوبی دارد اما از نظر استحکام مکانیکی ضعیف است.
- کاغذ آرامید که زمانی‌که استحکام بیشتر و توانایی انجام فرایند روی کاغذ نیاز باشد، از آن استفاده می‌شود.

همچنین نوارهایی که معمولاً استفاده می‌شوند شامل موارد زیر هستند:

- نوار پلی‌استر که قیمت پایینی دارند و به‌صورت وسیع استفاده می‌شود. مقاومت حرارتی متوسط داشته و در کاربردهای لوازم خانگی و هرمتیک بسیار مفید است.
- نوار پلی‌آمید که عملکرد بسیار خوبی دارند و به‌صورت وسیع در حمل و نقل و کاربردهای هوافضا استفاده می‌شوند.

✓ عایق‌های لایه لایه‌ای (مورق‌های) انعطاف‌پذیر: این مواد، اغلب به‌صورت ترکیب نوار با یک کاغذ یا ماده آغشته به رزین هستند. زمانی‌که مشخصات تک‌لایه‌های عایقی برای رسیدن به عملکرد مطلوب، ناکافی باشند، از این مواد استفاده می‌شود. نام اختصاری انواع مرسوم این عایق‌ها به‌صورت زیر است: KM, KMK, RM, RMR, DM, DMD, NM, NM, NKN که در نام‌های اختصاری ذکرشده، R نشان‌دهنده‌ی کاغذ rag بوده، M نشان‌دهنده‌ی نوار پلی‌استر (PETP)، D نشان‌دهنده‌ی polyster fleece، N نشان‌دهنده‌ی کاغذ آرامید و K نشان‌دهنده‌ی نوار پلی‌آمید هستند.

- KM و KMK شامل کاغذ سلولزی با قیمت پایین و لایه‌ی PETP می‌شوند. عمده مصرف این مواد در کاربردهای با قیمت پایین شبیه لوازم خانگی هستند. این مواد از نظر مکانیکی، سخت بوده و با لایه PETP استقامت الکتریکی بسیار خوبی هم پیدا کرده‌اند. ساخت و شکل‌دهی این مواد نیز بسیار آسان است.
- RM و RMR شامل کتان ۱۰۰ درصد با لایه‌ی PETP هستند. این مواد نیز در کاربردهای با قیمت پایین استفاده می‌شوند و مشخصات بسیار نزدیک به KM و KMK دارند.
- DM و DMD اغلب در موتورهای صنعتی مورداستفاده دارند و در کلاس دمایی ۱۵۵ درجه قرار می‌گیرند. عمدتاً به‌صورت دو لایه و سه لایه ساخته می‌شوند. به‌راحتی ساخته شده و شکل داده می‌شوند. مشخصات مکانیکی بسیار عالی دارند. تولید به میزان بالا برای آنها انجام می‌گیرد و در بازار به وفور موجود هستند.
- NM و NMN شامل کاغذ آرامید و نوار PETP هستند. در کاربرد موتورهای صنعتی با کلاس حرارتی ۱۸۰ درجه استفاده می‌شوند. تولید به میزان بالا برای آنها انجام می‌گیرد و در بازار موجود هستند. عمدتاً به‌صورت دولایه و سه‌لایه ساخته می‌شوند. به‌راحتی ساخته شده و شکل داده می‌شوند. مشخصات مکانیکی بسیار عالی و با عمر بالا دارند.
- NKN شامل کاغذ آرامید و نوار پلیآمید است. اغلب در موتورهای صنعتی دمابالا و با کاربردهای حمل و نقل و نظامی استفاده می‌شود. عمدتاً به‌صورت سه‌لایه استفاده می‌شود. عایق دمای بالای بسیار خوبی دارد و از نظر مکانیکی هم قوی‌تر از سایر رقبا هست. همچنین مشخصات عایقی بسیار خوبی دارد.

1-leatheroid

- ✓ مواد دارای پوشش: اگر مشخصات عایقی و مکانیکی بیشتری مطلوب ما باشد، از مواد دارای پوشش استفاده می‌شود. مواد دارای پوشش از لایه‌های مختلف استفاده می‌کنند تا مشخصات عایقی، و مکانیکی را بهتر نمایند. لایه‌ها عمدتاً از پارچه‌ی شیشه‌ای، پارچه‌ی شیشه‌ای پلی‌استر مخلوط‌شده، نوارها و کاغذ آرامید ساخته می‌شوند. پوشش‌ها بیشتر شامل پلی‌استر، سیلیکون، اپوکسی رزین و پوشش‌های B-stage (عموماً با پایه‌ی اپوکسی) هستند.

۱ ۱۰ ۵ عایق بین فازها و Overhang در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف

عایق بین فازها، مجموعه‌ی سیم‌پیچی‌های هر فاز را در شیار و در overhang همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده، از هم جدا می‌کند. این عایق باید علاوه بر داشتن استقامت عایقی کافی، از نظر مکانیکی هم مشخصات موردنیاز را داشته باشد و از نظر حرارتی با سایر مؤلفه‌های سیستم عایقی، سازگار باشد. موادی که به این منظور استفاده می‌شوند، بسیار شبیه به مواد مورداستفاده در عایق شیار و بدنه هستند.



شکل ۱-۱۵- شکل عایق بین فازها و overhang [۹۸]

۱ ۱۰ ۶ رزین‌ها و لاک‌های مورداستفاده در سیستم عایقی ماشین‌های کوچک و فشارضعیف

رزین یا لاک، به‌عنوان یک مایع آغشته، معمولاً قسمتی از سیستم عایقی ماشین‌های کوچک و فشار ضعیف هستند. این مواد به‌عنوان عایق الکتریکی عمل می‌کنند و همچنین با هدف محکم نگهداشتن سیم‌پیچی‌ها و افزایش استحکام مکانیکی و کاهش ارتعاشات مورداستفاده قرار می‌گیرند. این مواد، انتقال حرارت را بهتر می‌کنند و مقاومت حرارتی و محیطی را افزایش می‌دهند. استفاده از این مواد، درصورتی‌که از سیم‌پیچی‌های دارای پوشش خودنگهدار استفاده نشده باشد، ضروری است [۹۸-۹۹].

توجه به تفاوت‌های بین لاک و رزین در سیستم‌های عایقی بسیار مهم است. لاک، از ترکیب رزین و یک حلال ساخته می‌شود. حلال، برای کاهش دادن گرانروی و آسان کردن استفاده و به‌دست آمدن پوشش هموار و صاف، افزوده می‌شود. لاک‌ها عیب انتشار مقادیر زیاد مواد آلی فرار (VOC) را دارند. رزین بدون حلال، یک مونومر برای کاهش گرانروی و اغلب

یک کاتالیست برای افزایش سرعت پخت را به همراه خود دارد. اخیراً از رزین‌های بدون حلال و با مقادیر بسیار کم مونومر استفاده می‌شود که موجب کاهش چشمگیر انتشار VOC شده است [۹۸]–[۹۹].

۱ ۱۱ جمع‌بندی

در این فصل شاخص‌های طبقه‌بندی مواد عایق الکتریکی موردبررسی قرار گرفت و عوامل خرابی عایقی در ماشین‌های الکتریکی مطالعه شد. عملکرد سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی بحث شده و مؤلفه‌های سیستم‌های عایقی در ماشین‌های الکتریکی معرفی گردید شامل: سیستم عایقی سیم‌پیچی استاتور، عایق هادی، عایق حلقه، سیستم عایقی سیم‌پیچی روتورهای قطب برجسته و روتورهای قطب صاف.

دسته بندی مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی انجام پذیرفت. انواع مواد عایقی شامل مواد طبیعی، مواد عایقی مصنوعی، نوارهای پلاستیکی و بافته‌نشده، رزین‌های مصنوعی مایع، پلی‌استرها، اپوکسی رزین‌ها (اپوکسیدها)، میکا، الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس)، لمینیت‌ها (ورقه‌ها)، مطالعه شد.

و در نهایت سیستم‌ها و مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی کوچک و فشارضعیف معرفی شده و تفاوت ژنراتورهای توربین باد فشارضعیف و فشارقوی، عایق هادی‌ها در ماشین‌های کوچک و فشارضعیف، عایق شیار و بدنه در این ماشین‌ها، مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه، عایق بین فازها و Overhang و رزین‌ها و لاک‌های مورداستفاده در سیستم عایقی ماشین‌های کوچک و فشارضعیف موردبررسی قرار گرفت.

فصل دوم : تست‌های عایقی کلیدی متداول و آخرین استانداردها

۲ ۱ تست‌های سیستم‌های عایقی

دو دسته از تست‌های عایقی وجود دارند:

- ✓ تست‌های آنلاین
- ✓ تست‌های آفلاین

تست آنلاین در حال چرخش ماشین انجام می‌گیرد و استرس‌های زمان واقعی[1] روی ماشین برای مانیتور تنزل مواد عایقی استخراج می‌شوند. اما نشان دادن همه‌ی خرابی‌های داخل ماشین با اتکا به فقط این تست امکان‌پذیر نیست. بنابراین نیاز به انجام تست‌های آفلاین نیز است. در این تست‌ها بعد از خاموشی ماشین الکتریکی و قطع از منبع تغذیه، روش‌های تست اعمال می‌شوند [۳] و [۹]. برخی عیوب قابل‌شناسایی توسط انجام تست‌های فوق عبارت‌اند از:

- عدم تقارن فاصله هوایی
- مشکلات استاتور
- مشکلات روتور
- عیوب عایقی از قبیل رطوبت، آلودگی و...
- عیوب اتصالات
- ارتعاشات پیچشی
- عیوب تغذیه

۳ ۱ ۱ تست‌های عایقی آفلاین

متداول‌ترین تست‌های عایقی آفلاین عبارتند از:

تست مقاومت عایقی، IR: تست IR مقاومت بین کویل مسی و هسته‌ی استاتور–روتور را اندازه‌گیری می‌کند.

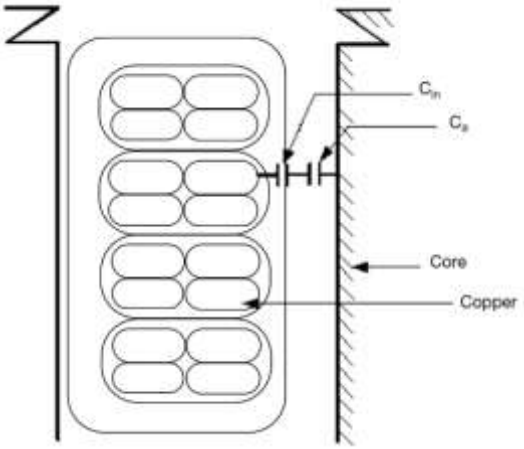
شاخص پلاریزاسیون، PI: تست PI گسترش یافته‌ی تست IR است و معادل نسبت اندازه‌گیری‌شده IR بعد از ۱۰ دقیقه به IR اندازه‌گیری‌شده بعد از۱ دقیقه است. برای ترانسفورماتورهای قدرت حاوی روغن شاید این تست خیلی مورداستناد نباشد چرا که این تست بیشتر در مواد جامد خود را نشان می‌دهد. برای ترانسفورمرهای قدرت روغنی، در ۱۵ ثانیه و یک دقیقه سنجش انجام می‌گیرد. در مواد عایقی جامد به‌دلیل غیر سیال بودن آنها دیگر شاهد عبور جریان جابه‌جایی یا Convection نخواهیم بود که دائماً روغن را به هم می‌زند و از میان نمونه‌های حاوی روغن مسیر را برای عبور جریان می‌سازد و موجب جلوگیری از ساختاری پایسته می‌شود که درست در نقطه مقابل با روش اجرایی تست PI خواهد بود.

- تست ولتاژ بالای DC: تست ولتاژ بالای DC، خرابی‌های موجود در عایق بدنه را مشخص می‌کند.
- تست ولتاژ بالای AC: تست ولتاژ بالای AC مؤثرتر از تست ولتاژ بالای DC است چرا که ممکن است خرابی‌های عمده‌ای در تست ولتاژ بالای DC تشخیص داده نشوند اما در تست ولتاژ بالای AC آشکار شوند.
- تست کاپاسیتانس: تست کاپاسیتانس، ظرفیت خازنی سیم‌پیچی را نسبت به نقطه‌ی خنثی اندازه‌گیری می‌کند و خرابی عایقی ناشی از اضافه گرما را نشان می‌دهد.
- تست ضریب تلفات: تست ضریب تلفات، تلفات دی‌الکتریک داخل سیستم عایقی را اندازه‌گیری می‌کند.

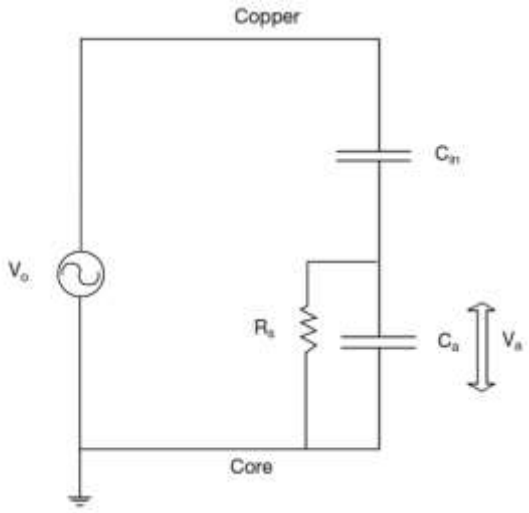
1- Real-time

- تست صاعقه: در تست صاعقه یا ضربه، ولتاژ ضربه به سیم‌پیچی تزریق می‌شود و نقاط ضعف عایقی قابل‌تشخیص خواهند بود.
- تست تخلیه‌ی جزئی آفلاین: تست‌های تخلیه‌ی جزئی آنلاین و آفلاین می‌توانند فعالیت‌های PD درون سیستم عایقی را اندازه‌گیری کنند.

در شکل زیر، سطح مقطع یک کویل در شیار، هنگامی‌که تخلیه‌ی جزئی در سطح کویل اتفاق افتاده و مدار معادل الکتریکی این حالت نشان داده شده است.



الف)



ب)

شکل ۲-۱- الف) سطح مقطع یک کویل در شیار، هنگامی‌که تخلیه‌ی جزئی در سطح کویل اتفاق افتاده، ب) مدار معادل الکتریکی این حالت

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

تست‌های عایقی آفلاین متداول و استانداردهای مربوطه در جدول (۲-۱) ارائه شده‌اند [۱] و [۱۰]-[۲۰].

شکل ۲-۲- تست‌های عایقی آفلاین متداول و استانداردهای مربوطه [۱] و [۱۰]-[۲۰]

Test	Standard	Test Description
Insulation resistance (IR)	IEEE 43 [10], NEMA MG1 [11]	Contaminations and defects between phase to ground can be found
Polarization index (PI)	IEEE 43	Contaminations and defects between phase to ground can be found
DC high potential test	IEEE 95 [12]	Defects between phase to ground can be found
AC high potential test	NEMA MG1 or IEC 60034	Defects between phase to ground can be found and more effective than DC high potential test
Offline partial discharge	IEC 60270 [13], IEC 62478 [14], IEEE 1434 [15], IEC 60034-27-1 [16], ASTM D1868 [17]	Defects between turn to turn and phase to ground can be found
Dissipation (power) factor	IEEE 286 [18] or IEC 60894 [19]	Contaminations and defects between phase to ground can be found
Surge test	IEEE 522 [20] and NEMA MG1	Defects between turn to turn and phase to ground can be found

۲ ۱ ۳ تست‌های عایقی آنلاین

متداول‌ترین تست‌های عایقی آنلاین عبارت‌اند از:

- مانیتورینگ حرارتی: مانیتورینگ حرارتی از سنسورها برای مانیتور دمای داخل ماشین الکتریکی بهره می‌برد و می‌تواند برای تشخیص خرابی‌های عایقی جاری و درحال پیشرفت استفاده شود. آنالیز مانیتورینگ حرارتی (ترموگرافی) که به نام‌های گرمانگاری، ترموویژن و تصویربرداری حرارتی نیز شناخته می‌شود، تکنیک مهمی است که دامنه کاربردهای آن بسیار گسترده و فراتر از بحث مراقبت وضعیت (CM) تجهیزات و ماشین‌آلات است. داده‌برداری به کمک دوربین ترموگرافی (ترموویژن) صورت می‌پذیرد. از این طریق همه اشکالاتی که منجر به تغییر در الگوی توزیع دمای سطحی می‌شوند، قابل‌شناسایی خواهند بود. به‌طور مثال تشخیص نامتعادلی بار فازها، داغ‌شدگی زغال‌ها، بوبین‌های اتصال‌شده، کموتاتورهای معیوب، و سایر نقاط داغ موتور و ژنراتور امکان‌پذیر است.
- تست ازن: ازن نتیجه‌ی وقوع تخلیه‌ی جزئی در هوا است. تست ازن می‌تواند تمرکز ازن در ماشین الکتریکی را اندازه‌گیری کند.
- تحلیل طیف فرکانسی: تحلیل طیف فرکانسی می‌تواند رینگ‌های ترک‌خورده و میله‌های شکسته‌ی روتور و نیز خرابی‌های سیم‌پیچی را در موتور القایی قفسی تشخیص دهد. به‌وجود آمدن و رشد ارتعاشات در ماشین‌های الکتریکی یک پدیده مضر و نابهنجار است که موجب کاهش عمر ماشین و قطعات و بالاتر رفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. بسیاری از عیوب در هنگام نصب ماشین به‌وجود می‌آیند و در بسیاری از موارد قابل‌ردگیری و برطرف کردن هستند. بعضی از این عیوب تا مدت‌ها با تجهیز باقی خواهند ماند و اختلالی در کارکرد آن به‌وجود نمی‌آورند. البته این امر به ماهیت دستگاه و شدت عیوب بستگی دارد. چه بسا که عیوبی

مانند عدم تعادل جرمی،[1] عدم هم‌محوری کوپلینگ‌ها[2] و ... همیشه وجود دارند، اما با توجه به میزان حساسیت دستگاه و مود ارتعاشی در اکثر مواقع با شدت کم قابل‌تحمل هستند. اما در برخی موارد، عیوب مدتی بعد از ابتدای کارکرد دستگاه به‌وجود می‌آیند و با گذشت زمان بر شدت آنها افزوده می‌شود. میزان رشد این عیوب بسته به نوع عیب و کار کرد ماشین می‌تواند متفاوت باشند.

- مانیتور ولتاژ صاعقه: مانیتور ولتاژ ضربه صاعقه می‌تواند ولتاژهای ضربه که در سیم‌پیچی ماشین به‌دلیل سوئیچینگ اینورتر PWM، صاعقه و ... اتفاق می‌افتد را تشخیص دهد.
- دیتکتورهای دود و ذرات متصاعد در دماهای بالا: دیتکتورهای دود و ذرات متصاعد می‌توانند محل‌های دمای بالا را در سیستم عایقی داخل ژنراتورها مشخص کنند. ترکیبات رنگی موجود است که در دماهای بالا ترکیبات شیمیایی آزاد می‌کنند. بنابراین ناحیه‌ی گرم‌شده توسط دیتکتورها قابل‌ردگیری خواهند بود.
- تست تخلیه‌ی جزئی آنلاین: از مدت‌ها پیش اندازه‌گیری تخلیه جزئی به‌منظور تشخیص وضعیت عایقی سیم‌پیچ استاتور موتورها و ژنراتورها معرفی شد. امروزه مانیتورینگ تخلیه جزئی به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر، برای عیب‌یابی ماشین‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. با اندازه‌گیری‌های دوره‌ای و مقایسه نتایج می‌توان به تشخیص سریع عیب پی برد و با انجام تعمیرات و یا با اقدامات اصلاحی به‌موقع از وقوع حوادث جدی در حین بهره‌برداری ماشین‌ها جلوگیری کرد. یکی از مؤثرترین روش‌های تشخیص عیب سیستم عایقی، اندازه‌گیری پالس‌های تخلیه جزئی به‌صورت آنلاین است. سیستم اندازه‌گیری on-line تخلیه جزئی، قابلیت تشخیص عیوب زیر در ماشین‌های فشارقوی را دارد:

۱- وجود تخلیه‌های سطحی
۲- ورقه – ورقه شدن عایق
۳- تشخیص وجود حفره در عایق
۴- لقی سیم‌پیچ‌های استاتور ولقی یا آسیب‌دیدگی گوه‌ها
۵- وجود تخلیه در سیم‌پیچ‌های انتهایی استاتور[3]

۲ ۲ جمع‌بندی

در این فصل مختصری از انواع تست‌های سیستم‌های عایقی آفلاین و آنلاین، استانداردهای مربوطه و عیوب قابل‌تشخیص توسط این تست‌ها موردبحث قرار گرفت. شایسته یادآوری است مبحث تست عایقی ماشین‌های دوار بسیار گسترده است و در این فصل تنها به مختصری از معرفی تست‌ها اکتفا شده است و ارائه جزئیات بیشتر از این بحث، موضوع اصلی گزارش را تحت الشعاع قرار خواهد داد.

1- unbalance
2- misalignment
3- End Windings

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

فصل سوم: فاکتورهای تنزل عایقی و چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۳ ۱ تخلیه‌ی جزئی به‌عنوان یک فاکتور مهم تنزل عایقی

تخلیه‌ی جزئی، PD، یکی از فاکتورهای مهمی است که می‌تواند خرابی عایقی را به‌وجود آورد. ازآنجاکه کلاف‌ها و میله‌ها، خارج از هسته استاتور تهیه و عایق‌بندی می‌شوند، هنگام جانمایی در هسته باید نازک‌تر از شیارهای هسته باشند و به همین منظور ایجاد فاصله‌های هوایی بین شیارها و سطح کلاف‌ها یا میله‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی در طول پروسه ساخت کلاف‌ها و میله‌های ماشین‌های الکتریکی در سطوح ولتاژ بالای چهار کیلوولت ممکن است فضاهای خالی در سطح آنها ایجاد شده باشد.

فواصل هوایی زمینه پدیده تخلیه جزئی در اثر اضافه‌ولتاژها را در سطح کلاف‌ها و یا میان کلاف‌ها و دیواره شیارها فراهم می‌سازد. این پدیده در ماشین‌های الکتریکی، در محاوره به‌طور نادرست، پدیده کرونا تلقی می‌شود. تنش‌های الکتریکی می‌توانند هوای موجود در فواصل هوایی را شکسته و منجر به تولید جرقه شود. جرقه‌ها سرانجام موجب ساییده شدن و حتی ایجاد حفره در عایق و یا دیواره هسته می‌شوند.

به‌منظور جلوگیری از این پدیده، ماده عایقی موردنیاز است که فاصله‌های هوایی میان کلاف‌ها و دیواره‌های هسته را حذف و مانع از پدیده تخلیه جزئی و در نتیجه ایجاد خطا در سیستم ماشین الکتریکی شود. برای حذف پدیده تخلیه جزئی در سطح کلاف‌ها و میله‌ها از روکش‌های عایق اضافی استفاده می‌شود. همچنین سازندگان از پوشش‌های نیمه‌هادی در فاصله بین کلاف‌ها و دیواره شیارها استفاده می‌کنند. این پوشش معمولاً از جنس کربن سیاه است که با مقاومت اهمی کافی در تماس با شیار و هسته پتانسیل زمین را خواهد داشت. به این ترتیب ولتاژ دو سر فواصل هوایی صفر بوده و تخلیه جزئی نخواهیم داشت. پدیده تخلیه جزئی در فواصل هوایی بین شیار و کلاف‌ها در ماشین‌های الکتریکی بالاتر از شش کیلوولت رخ می‌دهد.

پوشش نیمه‌هادی میان کلاف‌ها و شیارها، معمولاً حدود چند سانتی‌متر از دو لبه انتهایی شیارها را نیز پوشش می‌دهند. همچنین روکش سطح کلاف‌ها و میله‌ها نیز تا حدود زیادی، نزدیکی اتصالات انتهایی را پوشش می‌دهند. اما به هر ترتیب حفاظت نقاط اتصال سرسیم‌پیچ‌ها را فراهم نمی‌سازند. ازآنجاکه عایق‌های این نقاط نیز در معرض فواصل هوایی قرار دارند، و همچنین از طرفی یکنواخت کردن میدان الکتریکی در خارج از فضای هسته و شیارها از دیگر مسائل ماشین‌های الکتریکی است، باید پوششی را برای حذف فواصل هوایی و یکنواخت نمودن میدان در سرسیم‌پیچ‌ها در نظر گرفت. این نیازمندی‌ها با به‌کارگیری نوار کاربید سیلیکون در اتصال سرسیم‌پیچ‌ها برآورده شده است. کاربید سیلیکون دارای مشخصه‌ای است که با افزایش تنش‌های الکتریکی مقاومت آن کاهش می‌یابد، بدین‌معنا که اهمیک نیست. این خاصیت مقاومت متغیر موجب هادی شدن آن هنگام اضافه ولتاژ و هدایت آن به هسته زمین‌شده استاتور و همچنین عدم انتقال سایر شرایط نامی به هسته و عایق‌های آن در حالت کار عادی ماشین می‌شود. با حذف اضافه‌ولتاژها، امکان آسیب سیستم عایقی در سرسیم‌پیچ‌ها در اثر تخلیه جزئی نیز حداقل می‌شود.

تخلیه‌ی جزئی عمدتاً می‌تواند در حباب ایجاد شده در داخل و بین منافذ و لایه لایه شدگی ماده‌ی عایقی، رخ دهد. عموماً چهار نوع تخلیه‌ی جزئی در سیستم‌های عایق الکتریکی وجود دارد [۲۱]:

- تخلیه‌ی جزئی در فاصله‌ی هوایی کوتاه: این تخلیه‌ها در فواصل هوایی بین سیم‌ها یا در داخل سیستم عایقی رخ می‌دهند. این تخلیه‌های جزئی از نوع پالس‌های جرقه‌ای بوده که زمان خیز کوتاه یا بلندی دارند.
- تخلیه‌ی جزئی در فاصله‌ی هوایی بلند: تخلیه‌ی از نوع استریمر در زمان بسیار کوتاهی به خاطر یونیزه شدن در لبه‌ها رخ می‌دهد.
- کرونا: یک لبه‌ی تیز فلزی که پتانسیل الکتریکی بالایی را دارد، می‌تواند تخلیه‌ی کرونا را ایجاد کند.

- تخلیه‌ی جزئی در سطح عایق: این تخلیه‌ها، کرونای سطحی نام دارند. آلودگی و رطوبت می‌توانند احتمال وقوع این نوع تخلیه‌ها را افزایش دهند.

در موتورهای ولتاژپایین (فشارضعیف)، تخلیه‌ی جزئی عمدتاً در فاصله‌های هوایی کوتاه اتفاق می‌افتد. حباب‌ها یا حفره‌های بین سیم‌های مجاور یا سیم‌ها و هسته‌ی استاتور، محل وقوع این تخلیه‌ها است. این حفره‌ها و حباب‌ها معمولاً در حین فرایند ساخت به‌وجود می‌آیند. در ژنراتورهای چند مگاواتی ممکن است تخلیه‌ی سطحی و نیز تخلیه‌ی جزئی در فواصل هوایی کوتاه رخ دهد. وقتی که میدان الکتریکی در هوا بزرگ‌تر از ۳ کیلوولت بر میلی‌متر شود (در فشار یک اتمسفر و دمای اتاق)، هوا دچار شکست عایقی می‌شود. در ادامه جرقه و حرارت ایجاد خواهد شد. عایق با وقوع تکرارشونده‌ی جرقه‌ها، دچار خرابی می‌شود. اگر از وقوع این جرقه‌ها جلوگیری نگردد، نهایتاً یک حفره‌ی بزرگ در درون عایق ایجاد خواهد شد.

مواد عایقی معدنی مانند پلیمرهای استفاده‌شده در سیستم عایقی ماشین‌های فشارضعیف (نوع یک) و شامل Polyimide (PI), polyesterimide (PEI), polyamideimide (PAI) به‌راحتی تحت تخلیه‌های جزئی مکرر دچار خرابی عایقی می‌شوند [۲۲]. برخلاف آن، مواد عایقی ترکیبی معدنی/آلی استفاده‌شده در سیستم‌های عایقی فشارقوی (نوع ۲) می‌توانند تخلیه‌های جزئی طی سرویس عادی را تحمل کنند. انواع مختلف تخلیه‌های جزئی، منجر به سطوح تنزل عایقی متفاوتی در سیستم عایقی نوع ۲ می‌گردند. به‌عنوان مثال اگر دو نوع تخلیه‌ی جزئی در یک ماشین الکتریکی تشخیص داده شود، تنها دامنه تخلیه‌ی جزئی تعیین‌کننده نیست و رتبه‌بندی تخلیه‌ی جزئی بر اساس IEC 60034-27-1 مطرح می‌شود. در مرجع [۲۳]، یک ضریب سلامت برای مانیتور سابقه تخلیه‌ی جزئی، نوع تخلیه‌ی جزئی، سابقه‌ی تجهیز و .. برای پیش‌بینی برنامه تعمیرات و نگهداری معرفی شده است.

مبدل‌های قدرت PWM فرکانس‌های سوئیچینگ بالا و مؤلفه‌های هارمونیکی تولید می‌کنند. استفاده از سوئیچ‌های قدرت پهنای باند گسترده[1] مانند سیلیکون کربید[2] و گالیوم نیترید[3] می‌تواند فرکانس سوئیچ زنی را افزایش داده و زمان‌های افت و خیز را کاهش دهد که هارمونیک‌های بالاتر و استرس الکتریکی روی عایق سیم‌پیچی نتیجه خواهد داد [۲۴]. به‌علاوه، این هارمونیک‌های فرکانس بالا باعث گرمایش سیستم عایقی و تولید تخلیه‌های جزئی شدیدتر می‌شود [۲۵]. در مراجع استفاده از فیلترهای اکتیو و پسیو توصیه شده است [۲۶]، اما هزینه و حجم و وزن سیستم را افزایش می‌دهند [۲۷].

۳ ۲ چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف

در این بخش چالش‌های سیستم عایقی برای کاربردهای مختلف موردبحث قرار می‌گیرد.

۳ ۲ ۱ هوافضا

اساس سیستم‌های هوایی الکتریکی۴ (MEA) بر جایگزینی سیستم‌های پنوماتیکی و هیدرولیکی با سیستم‌های الکتریکی است. مانند سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی، نسل بعدی MEA می‌تواند بهبود کارایی سیستم و کاهش مصرف سوخت به‌دنبال داشته باشد. توان نامی یک ژنراتور برای هواپیمای بزرگ مسافربری معمولاً بیش از ۱ مگاوات است. برای کاهش اندازه کابل، تلاش‌هایی برای افزایش ولتاژ سیستم ماشین‌های الکتریکی انجام پذیرفته است. اما سطح ولتاژ توسط

1- WBG
2- SiC
3- GaN
4- More Electric Aircraft

پدیده تخلیه‌ی جزئی محدود می‌شود چراکه ولتاژ آغاز تخلیه‌ی جزئی[1] در ارتفاعات بالاتر و فشار هوای کمتر کاهش پیدا می‌کند. در سال ۱۹۳۶ سطح ولتاژ هواپیما 14.25 VDC بود اما در سال ۱۹۴۶ به 28 VDC ارتقا یافت [۲۸]. نیاز به سیستم‌های الکتریکی فشارقوی منجر به گذار از 28 VDC به سیستم 115/200 VAC, 400 Hz برای هواپیماهای تجاری همچون ایرباس A280, A350 و بوئینگ 787 شد. هنوز سیستم 28 VDC برای سیستم ولتاژ پایین یک هواپیما استفاده می‌شود. با این افزایش ولتاژ، اندازه و وزن ژنراتور می‌تواند به‌طور چشمگیر کاهش یابد [۲۹]–[۳۰].

طی سال‌های اخیر، کمپانی بوئینگ B787 را ساخته است که در سیستم ولتاژ ترکیبی 235 VAC, 360-800 Hz و ±270 VDC کار می‌کند [۳۱]–[۳۳]. با افزایش ولتاژها، احتمال وقوع PD بیشتر می‌شود و شکست عایقی در سیستم‌های HVDC هواپیماهای تجاری به یک نگرانی اساسی برای امنیت و قابلیت اطمینان تبدیل شده است [۳۴]. اخیراً با افزایش تمایل به سیستم‌های رانشی الکتریکی/هایبریدی، سیستم‌های عایقی با ولتاژهای بالای ۱ کیلوولت استفاده می‌شوند که چالش تخلیه‌ی جزئی را افزایش می‌دهد.

تخلیه‌ی جزئی یکی از عوامل اصلی خرابی عایق‌های آلی یا معدنی/آلی است. سیم با لعاب معدنی تکنولوژی بالغی در صنعت برای کلاس عایقی H(180C) و کلاس N(200C) است. دمای کارکرد بیشینه برای مواد معدنی ۲۰۰ درجه است اما در برخی ماشین‌های بخصوص می‌توانند در دماهای بالاتر هم برای مدت کوتاه عملکرد داشته باشند مانند موتور فن برای دمیدن دود ناشی از حریق یا موتور الکتریکی برای اژدر الکتریکی [۳۵].

نتایج تجربی نشان می‌دهد که خرابی عایقی با افزایش دامنه و فرکانس ولتاژ به‌شدت افزایش می‌یابد [۳۶]. سیستم عایقی یک ژنراتور هواپیما می‌تواند فرکانس‌ها و فشار هوای مختلفی را طی یک سیکل پروازی تجربه کند که انجام یک ارزیابی کامل را پیچیده می‌سازد. عوامل افزایش احتمال تخلیه‌ی جزئی و کاهش عمر سیستم عایقی عبارتند از: فشار هوای کم، ارتفاع بالا [۳۷]، پالس‌های dv/dt بالا در ترمینال‌های ماشین (که ترکیبی از پالس‌های PWM و موج‌های برگشتی به‌دلیل عدم تطابق امپدانسی کابل و ترمینال موتور است) [۳۸]–[۴۰] و دمای عملکردی بالا [۴۱].

در استاندارد IEC 600034-27-1، انواع مختلف تخلیه‌ی جزئی مانند تخلیه شیار، تخلیه سطحی و ... دسته‌بندی شده‌اند و بر اساس سطح تنزل عایقی‌شان در یک جدول مرتب شده‌اند [۴۲].

در کاربرد هوایی، باید تخلیه‌ی جزئی در طرح سیستم عایقی در نظر گرفته شود [۴۳]. در [۴۴] ابزاری برای طراحان ماشین و سازندگان کویل برای در نظر گرفتن تخلیه‌ی جزئی در ماشین‌های فشارضعیف ارائه شده است. در [۲۱]، [۲۷] و [۴۵]–[۶۸] مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... ارائه شده است. جدول زیر خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست را ارائه می‌دهد. متداول‌ترین این مواد عایقی polyester-imide است.

1- Inception Voltage

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

شکل ۳-۱- مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست

Test condition	*Wire insulation/size*
Excitation: 540 VDC	Ceramic: D= 1 mm, T= 5 μm; Mica film: D= 1 mm; Mix of organic and morganic material: D= 1.2 mm
Excitation: 60 Hz, Thermal: 660°C	Class200 and Silox magnet wire, AWG 20
-	Litz wire: Heavy polyimide, AWG 27
Excitation: 500 Vdc, 5 to 15 kHz, Thermal: -55 to 180 °C	Polyester-imide
Excitation: 5 to 200 kHz and 20 to 100 kPa	D = 625 μm ± 4 μm, T = 28 μm ± 2 μm
Excitation: 280 and 400 Vdc, 5 kHz sinusoidal and square voltage waveforms, altitude= 2.5, 5, 10, 20 and 30 km	Polyamide-imide
Excitation: 800, 900 and 1000 V @ 10, 100 kHz, Thermal: 120 °C	Polyester-imide
Excitation: 4.5kV @ 10 kHz, rise rate= 2000 V/μs, Thermal: -30 to 120 °C, RH= 20%-80%, Vibration: 100 Hz, 0.2mm	Stator insulation thickness= 0.8 mm
Excitation: 4-6 kV@5-20kHz, Thermal: -70 to 150 °C, RH= 20%-98%	Magnetic wire: polyimide film, T= 0.5 mm Main insulation: lapped glass-mica tapes impregnated with unsaturated Polyester-imide, T= 0.8 mm
Excitation: 50 Hz	Polyimide film (100HN), T= 25 μm; Polyimide film (100CR), T= 25 μm
Excitation:12kV, Thermal: 25 and 80 °C, RH= 30, 60 and 70%	Epoxy-mica, groundwall thickness= 3.04 mm
Excitation: 2 to 10 kV peak-to-peak @3kHz	Kapton HN: T= 25.4, 50.8, 76.2 and 127 μm
-	Polyamide-imide, D= 1.5 mm, T= 40 μm; Mica (bar), D= 2mm×5mm, T= 0.2 mm
Excitation: 600V square wave @ 10 kHz, Thermal: 240 °C, RH= 85%, Vibration: 50 Hz, 1.5 mm	Polyester inner coating and polyamide-imide overcoat
Excitation:1 kV@ 0.5-2 kHz, PWM duty cycles= 0.85	Polyamide-imide, T= 40 μm, D= 1.5 mm
Excitation:10 kHz, Thermal: 20 °C	Ceramic coated wire: D= 0.8 mm, T= 10 μm; PEI-PAI coated wire: D= 0.8 mm, T= 28 μm
Thermal: 20-25 °C, RH= 30-40%	Polyamide-imide: D= 0.822 mm, T= 21.5, 34.5 and 41 μm Inner coating polyester-imide and outer coating polyamide-imide: D=0.75, T=20 μm
Excitation: 50/60 Hz	Polyamide-imide, D= 0.67 and 2.24 mm, T=40 μm
Excitation: PWM duty cycles=10, 50 and 90%, 100 and 1000 Hz, Thermal: 20 °C, 1 atm, RH= 40%,	D= 1.25 mm
Excitation: 500 Hz, rise time= 0.2 μs, fall time= 20 μs	Polyamide-imide, D= 1.4 mm, T= 45 μm
Excitation: sine, triangular and square waveforms with 10, 20 and 30 kHz	Modified Polyester, A16 gauge, T= 40 μm
Excitation: 50/60 Hz, Thermal: 220-260 °C	with and without nano-modified polyester glass fiber, D= 0.5 and 1 mm
Excitation: 50 Hz sinusoidal, 500 Hz square wave, 25 kHz surge wave	Polyamide-imide, D= 0.71 mm, T= 26.5 μm; Polyamide-imide with ceramic nanoparticles: D= 0.38 mm, T= 20 μm; polyamide-imide with unspecified nanoparticles, D= 1 mm, T= 42.5 μm
Excitation: 500 Hz	Polyamide-imide cellular coating, D= 1 mm, T= 0.37 μm
Excitation: 3kV@1kHz, rise time= 10,30,80 and 100 ns	Polyamide-imide, D= 1.5, T= 0.37 μm
Thermal: 25°C, RH= 40%	Polyamide-imide, D= 1.7, T= 50 μm

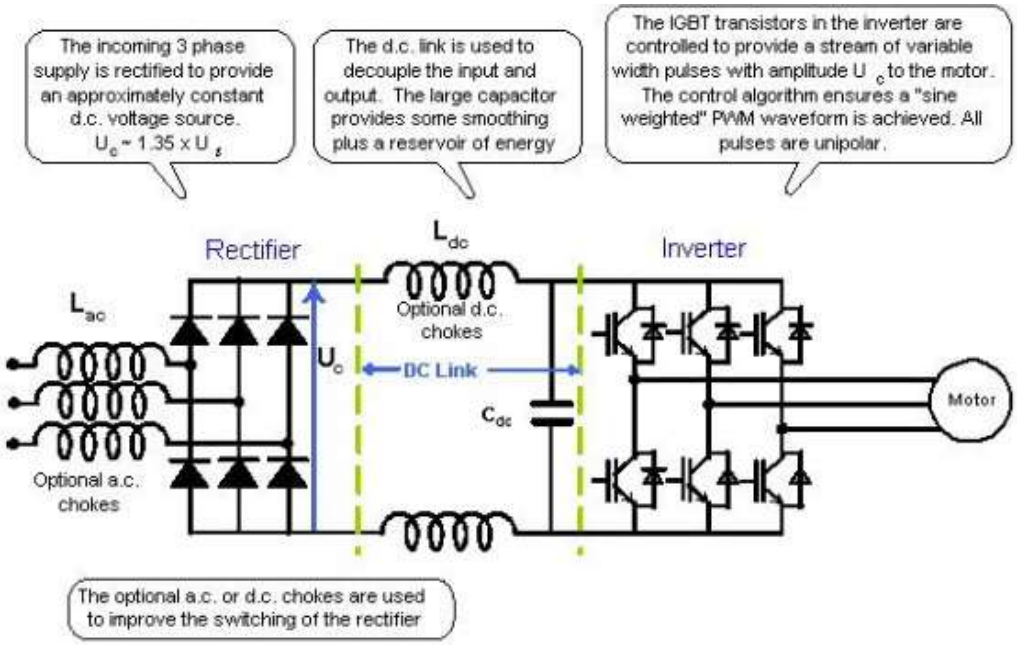
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۳ ۲ ۳ ژنراتور توربین بادی

تحقیقات نشان داده‌اند که سیستم عایقی ژنراتورهای توربین‌های بادی تحت dv/dt بالای ایجادشده در این شرایط، بسیار سریع‌تر از سیستم عایقی ژنراتورهای با مشخصات مشابه اما مورداستفاده در کاربردهای معمول، خراب می‌شوند [۶۹]-[۷۰].

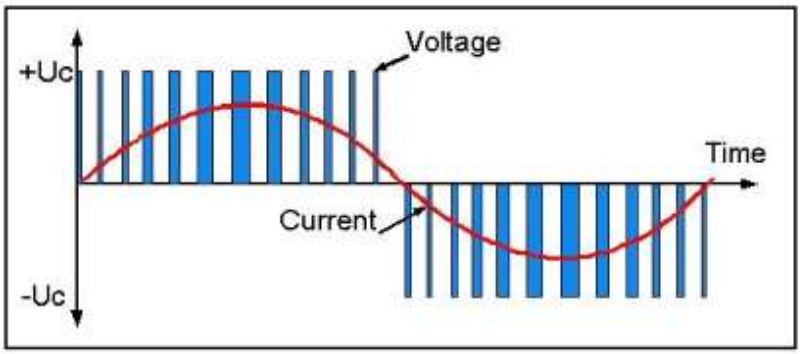
همچنین طول کابل نیز فاکتور بسیار مهمی برای تنش‌های عایقی ایجادشده به‌وسیله‌ی پالس‌های ولتاژ با زمان خیز سریع است. برای سیستم‌های با ولتاژ بالاتر از ۵۰۰ ولت، ماشین الکتریکی باید با سیستم عایقی تقویت‌شده طراحی شده باشد. هزینه‌ی ماشین الکتریکی با عایق تقویت‌شده، ۱۰ تا ۲۰ درصد نسبت به ماشین الکتریکی معمولی بیشتر است [۷۰].

در شکل زیر اجزای اساسی سیستم درایو اینورتر PWM نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- اجزای اساسی سیستم درایو اینورتر PWM [۷۰]

شکل موج ولتاژ و جریان خروجی اینورتر PWM در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی اینورتر PWM [۷۰]

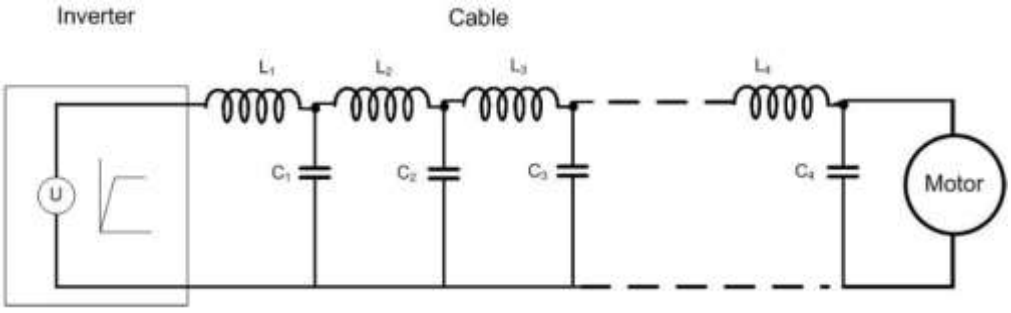
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

طراحان درایو معمولاً از بیشترین فرکانس عملی سوئیچینگ برای طراحی استفاده می‌کنند. تجهیزات سوئیچینگ سریع‌تر، زمان‌های خیز کوچک‌تری ایجاد می‌کنند. در جدول زیر، مقدار زمان خیز پالس IGBT، با دوره تناوب فرکانس قدرت و زمان متناظر با فرکانس سوئیچینگ IGBT مقایسه شده‌اند.

شکل (۳-۴) مقایسه‌ی مقدار زمان خیز پالس IGBT، با دوره تناوب فرکانس قدرت و زمان متناظر با فرکانس سوئیچینگ IGBT [۷۰]

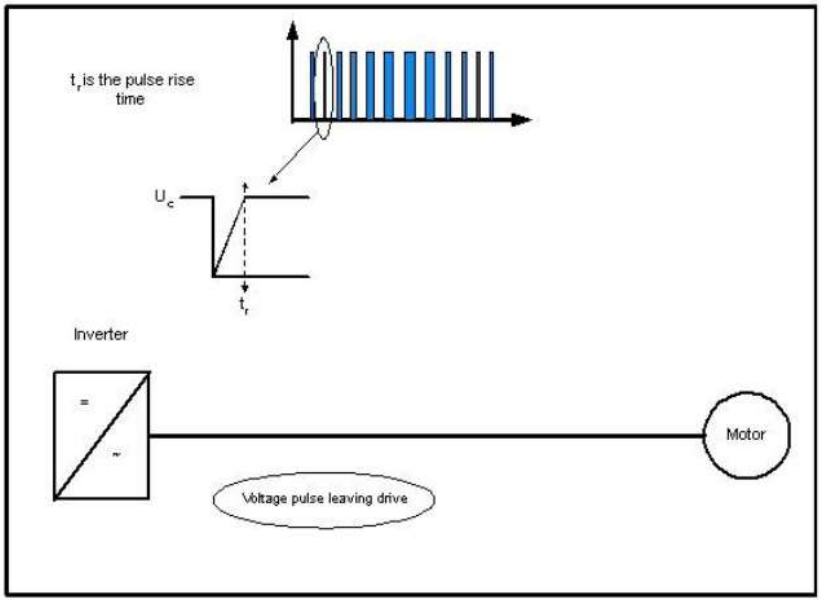
	Frequency (Hz)	Period/time
Power frequency	50	20 ms
IGBT Pulse switching frequency	3000	333 µs
IGBT Pulse rise-time		100 ns

مدل توزیع‌شده برای امپدانس کابل، وقتی که در فرکانس‌های بالا کار می‌کند، باید در نظر گرفته شود که در شکل زیر نشان داده شده است.



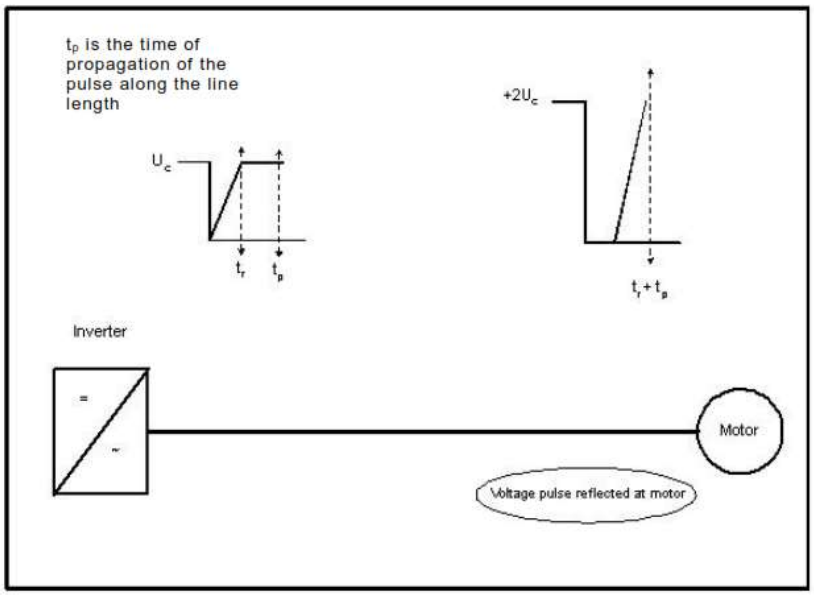
شکل ۳-۵- مدل توزیع‌شده برای امپدانس کابل، وقتی که در فرکانس‌های بالا کار می‌کند [۷۰]

مشخصات نحوه‌ی انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

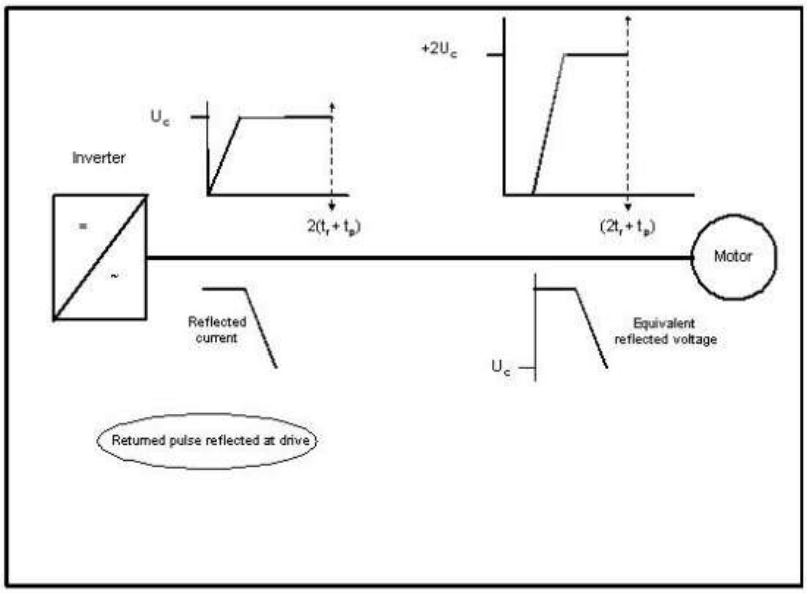


شکل ۳-۶- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی انتهای زمان خیز پالس [۷۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

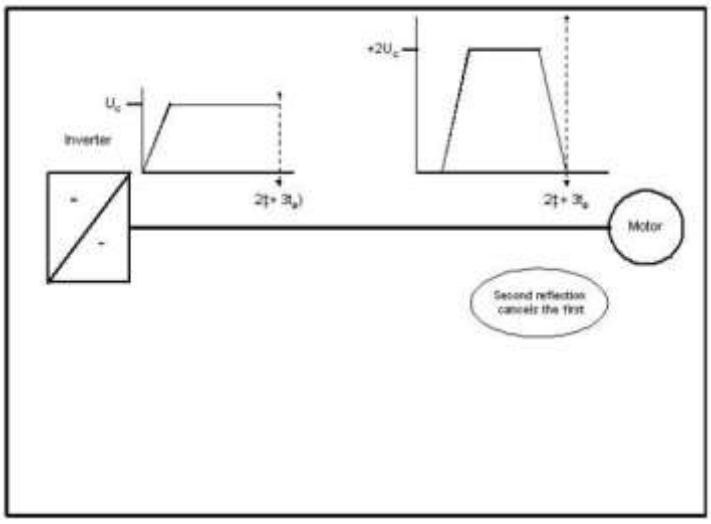


شکل ۳-۷- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی انتهای زمان خیز پالس + زمان انتشار در کابل [۷۰]

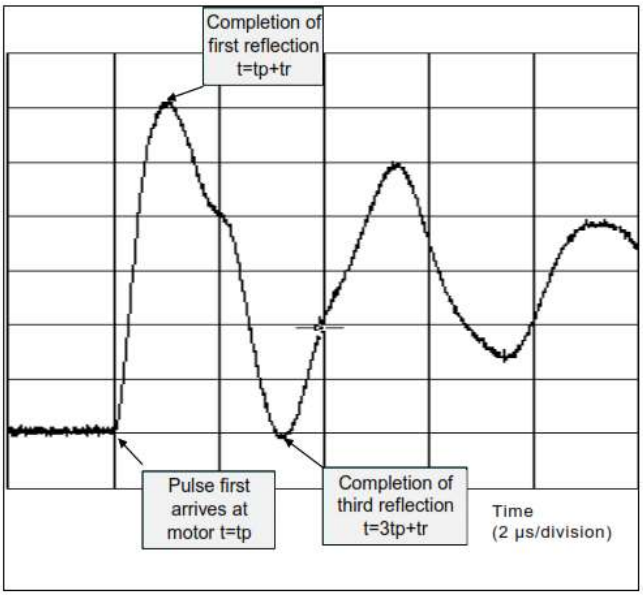


شکل ۳-۸- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی ۲* (انتهای زمان خیز پالس + زمان انتشار در کابل) [۷۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



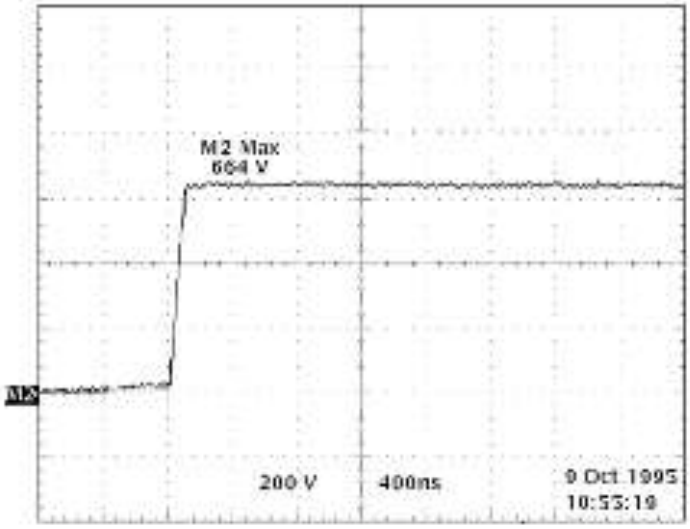
شکل ۳-۹- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، در لحظه‌ی (۲* انتهای زمان خیز پالس + ۳* زمان انتشار در کابل) [۷۰]



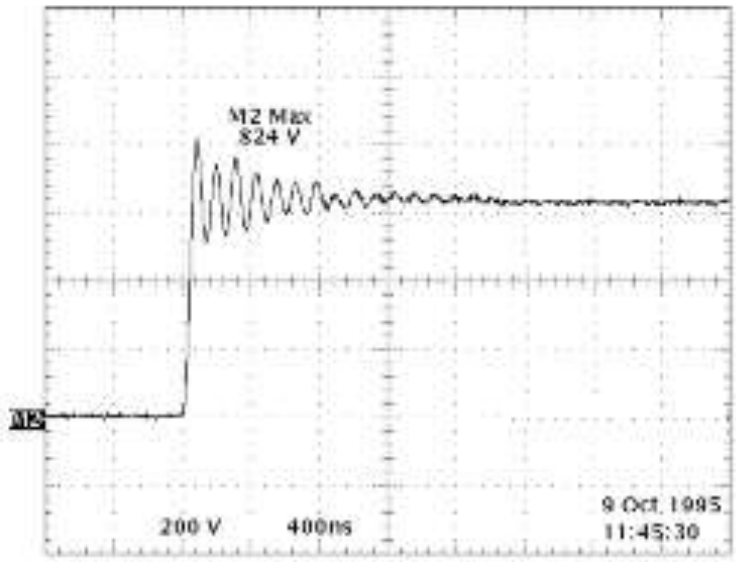
شکل ۳-۱۰- انتشار یک پالس در طول کابل متصل به ماشین الکتریکی، شکل موج پالس در ترمینال ماشین الکتریکی و با کابل به طول ۴۲ متر [۷۰]

ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول‌های مختلف کابل در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

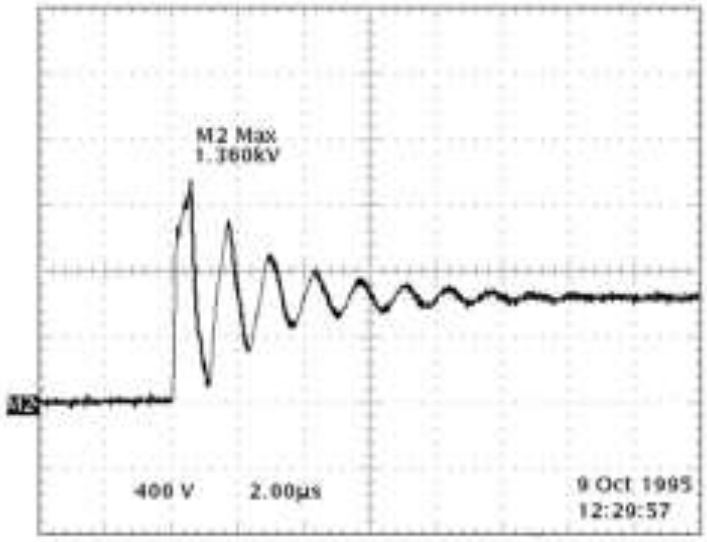


شکل ۳-۱۱- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل نیم‌متر [۷۰]



شکل ۳-۱۲- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل چهار متر [۷۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۳-۱۳- ولتاژ ترمینال ماشین الکتریکی به ازای طول کابل ۴۲ متر [۷۰]

۱۲۲۳ سیستم‌های عایقی ژنراتور توربین بادی

در این بخش مواد مختلف برای سیستم‌های عایقی ژنراتور توربین بادی خلاصه شده‌اند. مواد عایقی شدیداً به امکان دسترسی و هزینه وابسته هستند. اولین مواد عایقی از آغاز قرن ۱۹ مواد فیبر طبیعی مانند کتان، ابریشم، سلولز و .. بوده است. مواد عایقی فیبر را با رزین طبیعی استفاده می‌کردند که از گیاهان یا نفت استخراج می‌شود. ظهور مواد همچون اپوکسی رزین، فیبرهای شیشه، میکا و ...که از مواد آلی استخراج می‌شوند، دارای استقامت عایقی بسیار بالا در قیاس با مواد معدنی هستند و عمر سیستم عایقی را افزایش می‌دهند.

در [۴۵] پژوهشی بر ۱۲۰۰ ژنراتور بادی تعمیرشده انجام شده است. نتیجه مطالعه نشان می‌دهد که برای سیستم عایقی ژنراتورهای بادی کمتر از 1 MW، عمده خرابی‌ها در عایق روتور اتفاق می‌افتد و ناشی از خرابی‌های مکانیکی و الکتریکی هادی‌ها، یا خرابی بانداژ[1] است؛ چرا که بانداژهای روتور به‌طور مناسب طراحی نشده بوده‌اند. به‌علاوه، آلودگی و bracing با طراحی نامناسب برای سیم‌پیچی استاتور باعث خرابی عایقی می‌شود. برای ژنراتورهای با توان ۱ تا ۲ مگاوات، اضافه گرما به خرابی عایقی منجر می‌شود. برای ژنراتورهای با توان بالاتر از ۲ مگاوات، روکش‌های مغناطیسی شیار[2] می‌توانند باعث خرابی‌های استاتور شوند. ژنراتورهای بادی با مبدل PWM با سیستم‌های عایقی سیم‌پیچی کلاسیک، از پالس‌های ولتاژی مکرر با دامنه و فرکانس بالا بر روی عایق سیم‌پیچی آسیب می‌بینند که می‌تواند تخلیه‌ی جزئی تولید کند. تست پیری عایق دور نشان می‌دهد که برای ژنراتور بادی تحت فرکانس قدرت (۵۰ هرتز) و فرکانس PWM (۱۴ کیلوهرتز)، میکا نسبت به لعاب، به‌دلیل استقامت دی‌الکتریک بالا، مقاومت بهتری در قبال تخلیه‌ی جزئی دارد [۷۰]. متداول‌ترین مواد عایقی برای ژنراتورهای توربین بادی فشارضعیف در جدول خلاصه شده‌اند.

1- Banding Failure

2- Magnetic Wedged

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

شکل ۳-۱۴- متداول‌ترین مواد عایقی برای ژنراتورهای توربین بادی فشارضعیف [۸]

Component	*Insulation Material*
Winding wire	Enameled with modified Polyester-imide or Polyamide-imide and enameled with Polyester-imide base/Polyamide-imide overcoat/mica tape
End winding tape	Intertape® 4616/17/18 Glass cloth
Slot insulation	Impregnated PET felt/film/felt, Nomex/PET film/Nomex or PET film/mica/PET film
Impregnating resin	Polyester-imide, Polyester, Polyurethane
Wedges/closures	Glass mat with epoxy resin, glass fabric bonded with epoxy resin
Finishing varnish	Isophthalic acid Alkyd resin

در [۶۹]، مواد عایقی مورداستفاده در ژنراتورهای توربین بادی با سیم‌پیچی تصادفی و سطح ولتاژ ۶۹۰ تا ۹۰۰ ولت، به‌صورت جدول زیر دسته‌بندی شده‌اند.

شکل ۳-۱۵- دسته‌بندی مواد عایقی مورداستفاده در ژنراتورهای توربین بادی با سیم‌پیچی تصادفی و سطح ولتاژ ۶۹۰ تا ۹۰۰ ولت [۶۹]

Insulating materials for 690–900 V random wound coils	
Winding wire	Thermex® 200 or SamicaShield® (Samica® insulated round wire)
Slot insulation	Myoflex PVS (impregnated PETP fleece/film/fleece) or Myoflex 2N50/80 (Nomex®/PETP film/Nomex®) or Myosam (PETP film/Samica®/PETP film) or Myoflex 2N80S (Nomex®/Samica®/Nomex®) for the slot portion and Myoflex 2N130S (Nomex®/Samica®/Nomex®) for the end winding
Impregnating resin	Damisol 3040 (UPI resin) or Damisol 3032 (UPI resin)
End winding tape	4616/18 (adhesive glass fabric)
Wedges/closures	Myoflex PVS (impregnated PETP fleece/film/fleece) or Vetronite 64.120 (Glass fabric/epoxy composite material)
Finishing varnish	Damicoat 2404/07 (air drying varnish)

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

متناسب با توان و ولتاژ نامی ماشین، اندازه و نوع سیم‌پیچی (تصادفی یا شکل یافته)، از عایق شیار یا عایق بدنه استفاده می‌شود. که این امر در گستره وسیعی از کاربردها و نه فقط ژنراتور بادی صادق است. مثال خوبی که عایق بدنه (معمولاً بر پایه میکا) استفاده می‌شود در توربوژنراتورهای بزرگ است. در جدول زیر هدایت حرارتی و استقامت عایقی مواد عایقی روکشی و دربرگیرنده[1] در دسترس برای استفاده در ماشین‌های الکتریکی ارائه شده‌اند. اپوکسی رزین یکی از اصلی‌ترین این مواد است. همچنین، برخی از این مواد مانند رزین‌های دیگر می‌توانند در پروسه VPI[2] استفاده شوند که به حذف یا پرکردن حفره‌های هوا در سیستم عایقی ماشین می‌انجامد.

شکل ۳-۱۶- واد عایقی روکشی و دربرگیرنده[3] در سیستم عایقی [۵]

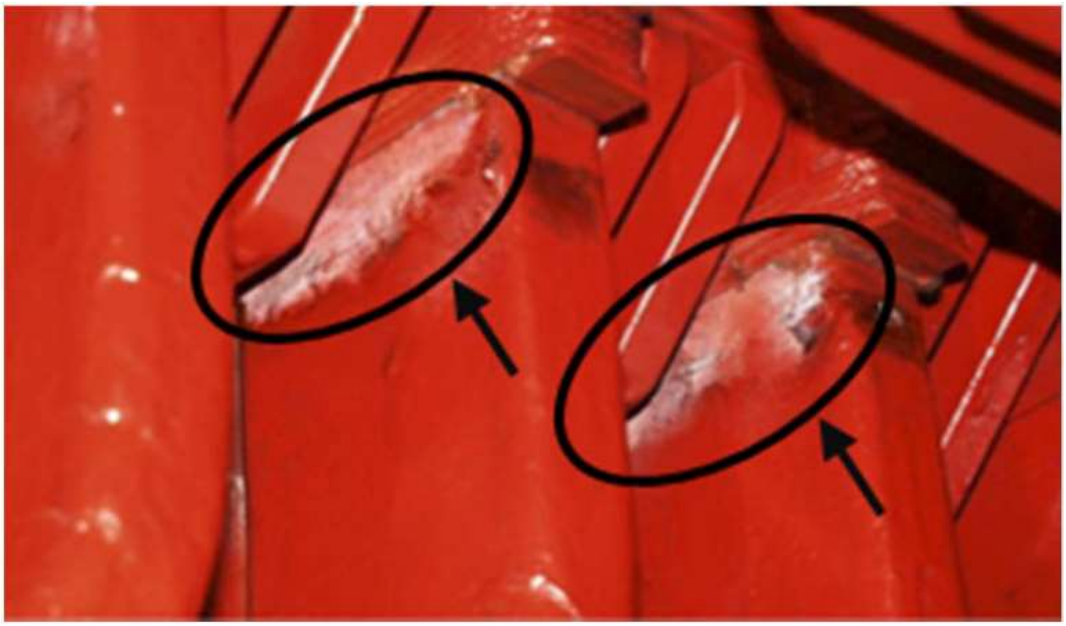
Encapsulation Material	*Dielectric Strength (kV/mm)*	*Thermal Conductivity (W/m-K)*
E88 epoxy C89 hardener	30.7	1.049 (at 23°C) 1.069 (at 50°C)
Aradur CW 229-3 Hardener HW-229	20	0.75
Altherm XB-2710 Aradur XB-2711	20	1.5
Araldite XB-2252 Aradur XB-2253	20	0.7
Araldite CW-1312 Aradur HY-1300	15	1.1
Arathane CW-5631 Arathane HY-5610	20	0.6
Aratherm CW-2731	-	3.0
Catalyst-11	15	1.28
Epoxy-234	16.3	3.77
Epoxy-1121	17.3	0.14
Epoxy-1282	17.3	0.14
Epoxy-1285	14.4–15.7	1–1.27
Thermoset SC 320	-	3.2
Epoxylite® 6203	22	0.25
Epoxylite® 8628	23.6	0.25
Dolphon® CC-1105	-	0.2–0.25

۳ ۲ ۳ ژنراتور برق آبی

برای سطح ولتاژ ۶ کیلوولت و بالاتر در سیم‌پیچی، احتمال وقوع تخلیه‌ی جزئی سطحی به‌دلیل ساخت معیوب سیم‌پیچی و عملکرد تحت استرس‌ها و دماهای بالا، افزایش می‌یابد. این امر پودرهای سفید درخشان بر سطح سیم‌پیچی‌های استاتور تولید می‌کند. استفاده از PWM در درایوهای سرعت قابل‌تنظیم وضعیت را بدتر می‌سازد [۷۱]. شکل زیر نشان می‌دهد که در پایین شیار، پوشش نیمه‌هادی (پوشش کاهش استرس) با تخلیه‌ی جزئی سطحی آسیب دیده است. پودرهای سفید در پایین شیارها نیز در نتیجه تأثیر تخلیه‌ی جزئی تولید می‌شود.

1- Encapsulation Material
2- Vacuum PressureImpregnation
3- Encapsulation Material

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۳-۱۷- پوشش نیمه‌هادی آسیب‌دیده از تخلیه‌ی جزئی سطحی [۷۱]

اخیراً حفاظت کرونای بیرونی ۱(OCP) ماشین‌های الکتریکی ولتاژبالا توجه بسیاری را جلب کرده است [۷۲]. OCP ها می‌توانند زبری سطحی غیر قابل‌اجتناب را هموار سازند و به توزیع یکنواخت میدان الکتریکی در سیستم عایقی منجر شوند [۷۳]. تأثیر ماده OCP در [۷۴] با روش اجزا محدود ارزیابی شده و تأثیر پارامترهای ماده OCP بر توزیع میدان الکتریکی ارائه شده است. و پارامترهای ایدئال ماده OCP نیز با روش بهینه‌سازی هوشمند به‌دست آمده است.

جمع‌بندی

در این فصل چالش‌های سیستم‌های عایقی در کاربردهای مختلف موردتحلیل قرار گرفت و تخلیه‌ی جزئی به‌عنوان یک فاکتور مهم تنزل عایقی بررسی شد. سیستم‌های عایقی در کاربردهای خاص هوافضا و ژنراتور توربین بادی و ... بحث شده است و مواد عایقی استفاده‌شده در سیستم‌های عایقی فوق ارائه گردید.

1- outer corona protection

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

فصل چهارم: پیشرفت‌های اخیر مواد و سیستم‌های عایقی مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی

۴ ۱ سیستم‌ها و مواد عایقی جدید برای ماشین‌های الکتریکی بزرگ

طبق گزارش‌های کمیته‌های SC11 و EG11.02، CIGRE بیشترین دلیل خرابی ژنراتورهای برق‌آبی، خرابی عایقی بوده است (۵۶ ٪). سایر دلیل‌ها، خرابی مکانیکی (۲۴ ٪)، خرابی حرارتی (۱۷ ٪)، خرابی بیرینگ (۳ ٪) بوده‌اند [۸۶].

دلایل خرابی عایقی نیز به پیری (۳۱ ٪)، تجمع آلودگی روی سیم‌پیچی (۲۵ ٪)، تخلیه‌های جزئی داخلی (۲۲ ٪)، شل‌شدگی میله‌ها در شیار یا در پیشانی انتهایی (۱۰ ٪)، اضافه باری (۷ ٪)، حفاظت معیوب کرونا (۳ ٪) و اضافه ولتاژها (۲ ٪) نسبت داده شده است [۸۶].

۴ ۲ نانوکامپوزیت‌های پلیمری

پیشرفت‌های اخیر در مواد نانوکامپوزیت پلیمری حاکی از بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی در قیاس با پلیمرهای پرنشده[1] است [۷۵]. این بهبودها با نوع، شکل، اندازه و توزیع پرکننده‌های نانو[2] در رزین پایه ارتباط دارند [۷۶]. اساساً نانوکامپوزیت پلیمری ترکیبی از تعداد دو ماده یا بیشتر است، که خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند [۷۷]. نانوکامپوزیت پلیمری در کاربردهای بسیاری قابل‌استفاده است مانند: هوافضا، حوزه سلامت، صنعت خودرو و.. [۷۸]. همچنین نانوکامپوزیت‌های پلیمری اخیراً در سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی موردتوجه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال اپوکسی رزین‌ها به‌طور گسترده در ماشین‌های الکتریکی ولتاژ پایین و ولتاژ بالا استفاده شده‌اند. هدایت حرارتی اپوکسی رزین خیلی کم است که از انتقال حرارت جلوگیری کرده و به تنزل عایقی منجر می‌شود [۷۹].

پرکننده‌های نانو و میکرو مختلفی موجود است مانند: Al2O3, SiO2, AlN, Si3N4, BN و ... هدایت حرارتی اپوکسی رزین کم و بین 0.1 تا 0.3 W/m.K است. اما پرکننده‌های نانو و میکرو هدایت حرارتی بسیار بالاتری دارند و می‌توانند به اپوکسی رزین اضافه شده و هدایت حرارتی آن را بهبود دهند که منجر به کاهش دما در سیم‌پیچی استاتور خواهد شد و بازده ماشین بهبود خواهد یافت [۸۰]. با استفاده از مواد نانوکامپوزیتی عایقی، بهبود در طول عمر، ولتاژ شکست و هدایت حرارتی موردانتظار است. در نتیجه، چگالی جریان سیم‌پیچی و توان ویژه بهبود می‌یابند.

مطالعه مقایسه‌ای یک ماشین القایی ولتاژ متوسط با ماده عایقی کلاسیک و ماده نانوکامپوزیت در مرجع [۸۱] ارائه شده است. نشان داده شده است که با افزایش هدایت حرارتی ماده عایقی از 0.25 W/m.K به 0.7 W/m.K، گشتاور و چگالی جریان از ۱۴ درصد تا ۲۶ درصد قابل‌ارتقا است.

در مرجع [۸۲] دو نوع رزین نانوکامپوزیت با سیلیکای آب‌دوست و سیلیکای آب‌گریز[3] بررسی شده‌اند. نشان داده شده است که رزین پایه با سیلیکای آب‌گریز مقاومت بالاتری در برابر تولید درخت داخل عایق[4] و استحکام مکانیکی بیشتر در مقایسه با رزین پایه و اپوکسی رزین با سیلیکای آب‌دوست دارد.

در مرجع [۸۳] ثابت شده است که اندازه بحرانی حفره‌ها داخل پلیمرها برای آغاز تخلیه‌ی جزئی در اندازه میکرون است. در مرجع [۸۴] یک نانوکامپوزیت اپوکسی جدید برای موتورهای رانشی کشتی تولید شده است. نشان داده شده است که طول عمر نانوکامپوزیت جدید بیش از ۷ برابر نسبت به اپوکسی رزین افزایش یافته است. به‌علاوه، عمق و حجم خوردگی نانوکامپوزیت در معرض تخلیه‌ی جزئی کمتر از نصف اپوکسی رزین است.

1- unfilled polymers

2- Nano Fillers

3- hydrophilic or hydrophobic silica

4- Treeing resistance

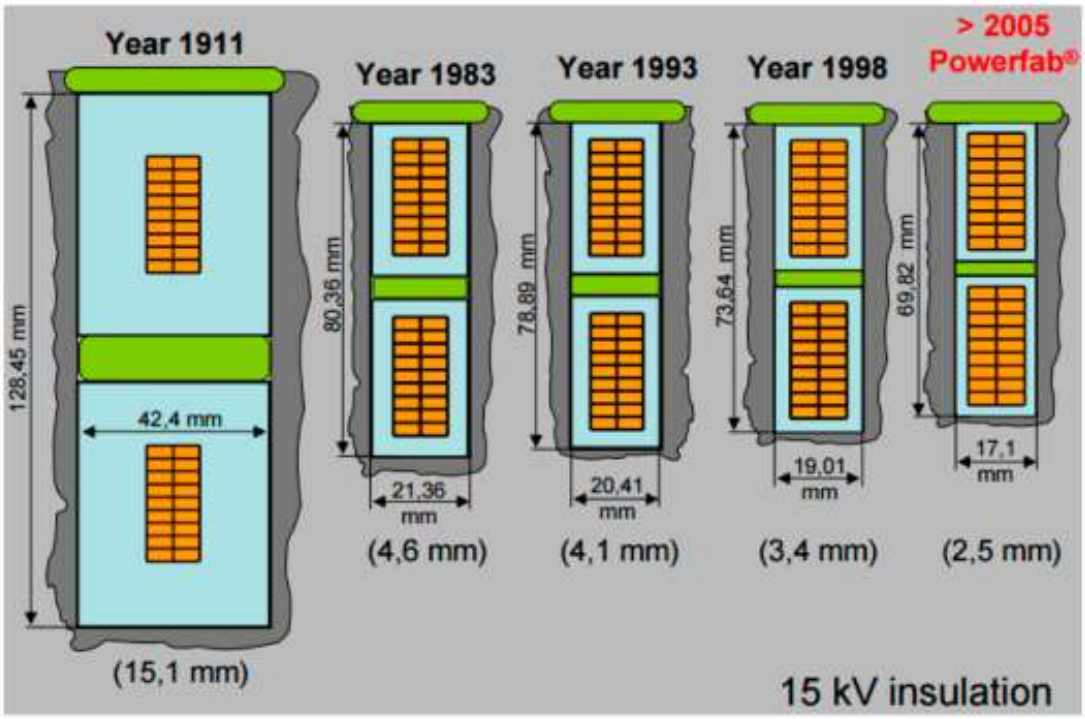
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

نتایج نشان می‌دهند که با تزریق نانوکامپوزیت‌های SiO2 چگالی توان موتور از ۱۰ تا ۱۵ درصد بهبود یافته است. همچنین، طول عمر عایقی افزایش می‌یابد چراکه SiO2 به‌عنوان مانعی برای کانال‌های شکست ناشی از تخلیه‌ی جزئی عمل می‌کند [۸۵].

می‌توان از تکنیک‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی مؤثر توزیع پرکننده‌های نانو و استقامت مکانیکی رزین پایه نانو کامپوزیتی بر روی منحنی تنش–کرنش استفاده کرد [۷۶].

۴ ۳ کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور

روند کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور ۱۵ کیلوولتی یک ماشین الکتریکی، از ۱۵/۱ میلی‌متر در سال ۱۹۱۱ به تنها ۲/۵ میلی‌متر در ۱۰۰ سال بعد از آن، در شکل زیر ارائه شده است [۸۷].

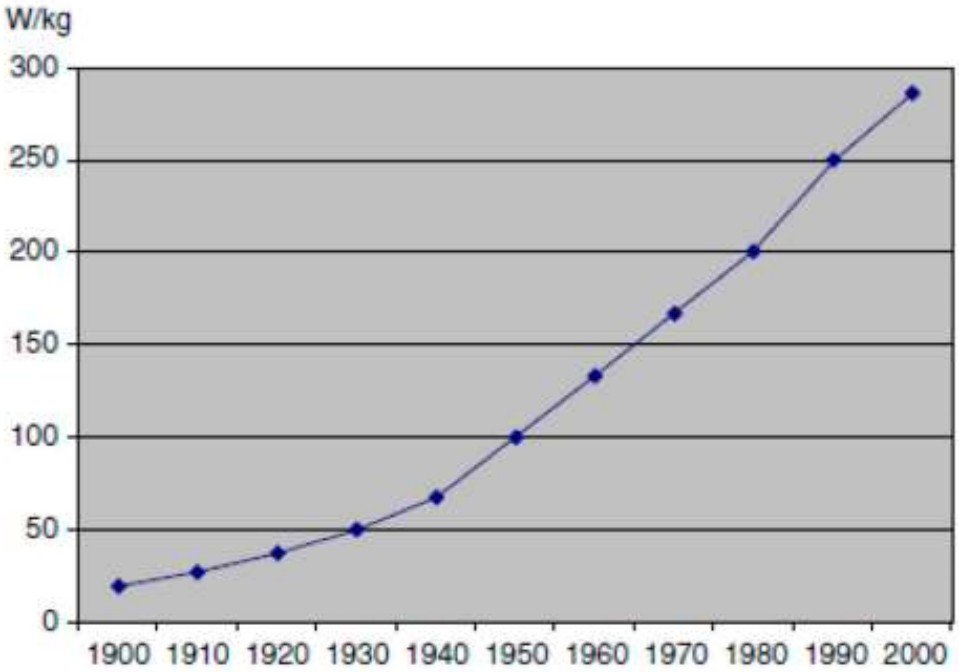


شکل ۴-۱- کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور ۱۵ کیلوولتی یک ماشین الکتریکی [۸۷]

۴ ۳ ۱ افزایش توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی با تغییر ضخامت عایق بدنه

تغییرات (کاهش) ضخامت عایق بدنه در طول زمان، منجر به افزایش توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی دوار شده است [۸۸]–[۸۹]. این افزایش در شکل زیر مشاهده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

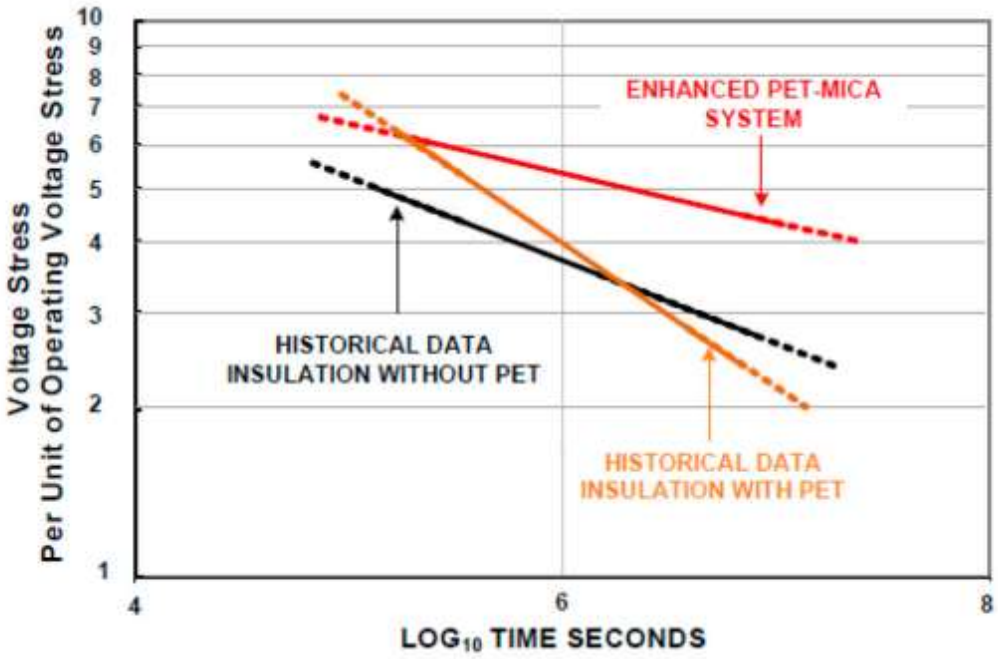


شکل ۴-۲- تاریخچه‌ی تغییرات توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی دوار [۸۸]-[۸۹]

۴ ۴ استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica

در سال ۲۰۱۱، شرکت GE، نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica را از طریق استفاده از نوارهای PET به‌عنوان ماده‌ی پشتیبان برای کاغذ میکا، توسعه داد. این فرایند در یک فشار اشباع بهینه صورت می‌گرفت [۹۰]. PET، یک پلیمر ترموپلاستیک خطی بوده که نقطه‌ی ذوب بالا (۲۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) و پایداری بسیار خوب دارد. مطابق شکل زیر، سیستم PET–میکای تقویت‌شده، مشخصات بسیار برتر از نظر استقامت ولتاژی نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET–میکا دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۴-۳- مقایسه‌ی استقامت ولتاژی سیستم PET-میکای تقویت‌شده، نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET-میکا [۹۰]

۴ ۵ کاهش امپدانس حرارتی عایق بدنه

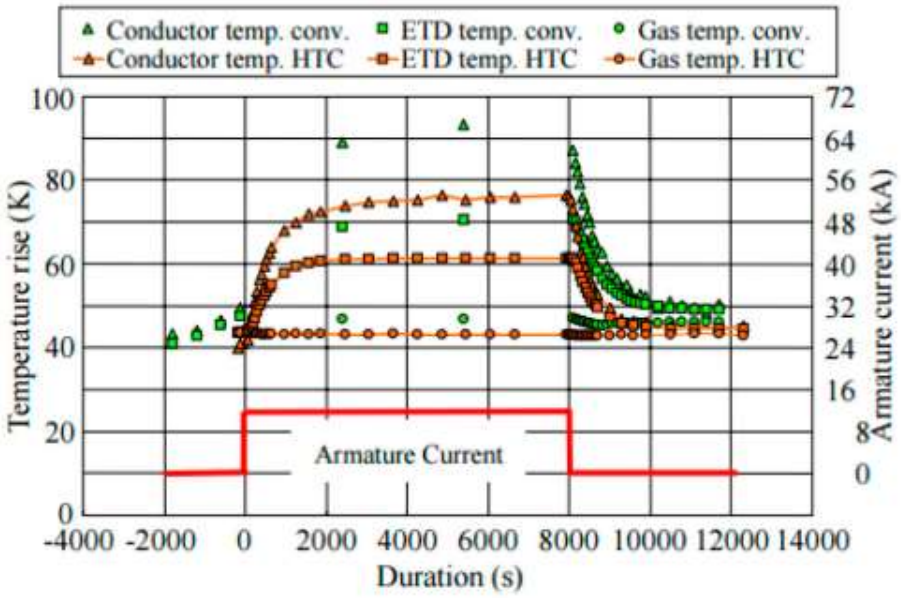
کاهش امپدانس حرارتی عایق بدنه، یک راه قوی برای کاهش دمای سیم‌پیچی استاتور (یا افزایش توان نامی) است. سه راه برای کاهش امپدانس حرارتی وجود دارد [۹۱]:

کاهش ضخامت عایق بدنه

این روش موجب افزایش تنش الکتریکی و نرخ پیری الکتریکی با توجه به وجود حباب‌های کوچک در عایق بدنه و در نتیجه وقوع تخلیه‌ی جزئی خواهد شد.

استفاده از یک عایق بدنه با رسانایی حرارتی ذاتی بالا

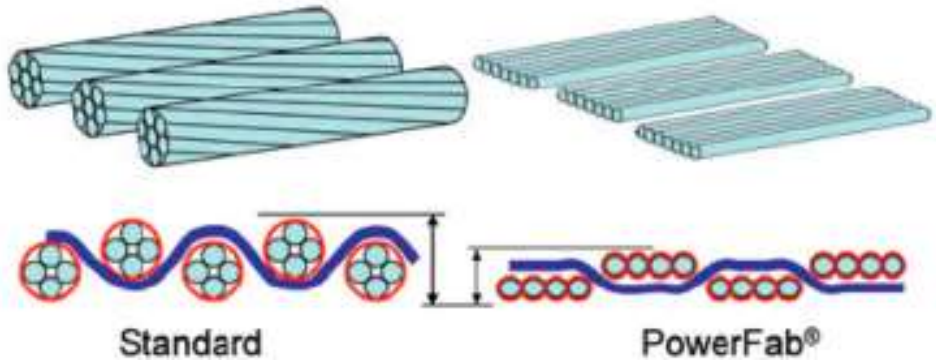
نوارهای رزین پلیمر، کمترین رسانایی حرارتی را در سیستم عایق بدنه دارند. برای توجه به این مسئله، شرکت‌های توشیبا و وان رول، یک سیستم عایقی جدید را معرفی و پیشنهاد کرده‌اند که در آن از نوارهای کاغذی میکا حاوی پرکننده‌های بور-نیترید در نوارهای رزینی استفاده شده است. در نتیجه با افزایش رسانایی حرارتی، شرکت توشیبا توانست ظرفیت نامی ژنراتور را تا ۱۵ ٪ افزایش دهد (ابعاد شیار و دمای کاری مشابه با طراحی‌های مرسوم در نظر گرفته شد) [۹۲]. این عایق تازه توسعه‌یافته که رسانایی حرارتی بالا دارد، می‌تواند رسانایی حرارتی عایق را بهبود بخشد درحالی‌که تنش‌های الکتریکی و دمای سیم‌پیچی-ها در سطوح یکسان با ژنراتورهای با عایق مرسوم قرار دارد [۹۲]. مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا (HTC) و عایق مرسوم در شکل زیر ارائه شده است. در مقایسه با یک ژنراتور با عایق مرسوم با سایز فریم یکسان، ژنراتور با عایق دارای رسانایی حرارتی بالا، کاهش قابل‌توجه در دمای سطح سیم‌پیچی و دمای هادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اختلاف دما بین سطوح داخلی و خارجی عایق با رسانایی حرارتی بالا، کمتر است.



شکل ۴-۴- مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا و عایق مرسوم [۹۲]

◘ استفاده از یک عایق بدنه‌ی نازک‌تر بر اساس طرح "شیشه‌ی تخت" نوار کاغذی میکا از طریق افزایش محتوی میکا

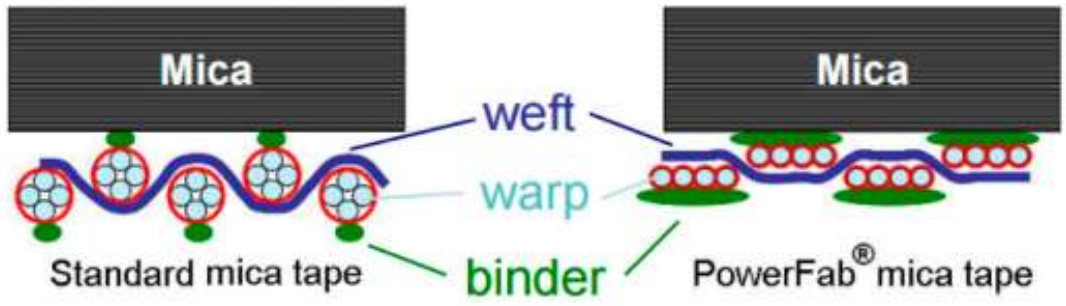
شرکت ایزوولتا، یک نوار کاغذی میکا را معرفی و پیشنهاد کرده است که با استفاده از یک ماده‌ی پشتیبان فیبر شیشه‌ی تخت، به جای ساختار معمول بافته‌شده، در میله‌های فشارقوی استاتور استفاده شود [۹۳]. این روکش شیشه‌ای که powerfab نامیده می‌شود، از روکش‌های شیشه‌ای معمول که هم‌اکنون استفاده می‌شوند، نازک‌تر است و اما وزن کلی مشابه با آنها دارد. دلیل این تفاوت، از روش تولید جدید برای روکش‌های شیشه‌ای ناشی می‌شود. این روش به‌صورتی است که رشته‌های شیشه، پیچیده نمی‌شوند و فقط به‌صورت موازی همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، قرار داده می‌شوند.



شکل ۴-۵- رشته‌های شیشه‌ای در روش استاندارد و روش powerfab [۹۳]

روش powerfab، منجر به ۱۵ ٪ کاهش در نوار میکا می‌شود. در شکل زیر دلیل این کاهش نشان داده شده است. نوار پشتیبان، نازک‌تر است و اجازه‌ی افزایش مقدار میکا به ازای ضخامت نوار کلی یکسان را می‌دهد. درصد بیشتر میکا در نوار،

رسانایی حرارتی و مقاومت در برابر تخلیه‌ی جزئی را نتیجه می‌دهد. استفاده از این نوارها توسط شرکت زیمنس گزارش شده است [۹۳].



شکل ۴-۶- ضخامت نوار استاندارد و نوار powerfab [۹۳]

۴ ۶ پیشرفت‌های اخیر در کاهش ضخامت عایق بدنه

کاهش ضخامت عایق بدنه عموماً منجر به افزایش تنش الکتریکی در عایق و افزایش خطر خرابی عایق به دلیل وقوع تخلیه‌ی جزئی در حباب‌ها و حفره‌ها می‌شود. کاهش ضخامت عایق بدنه در طول دهه‌های گذشته به دلیل پیشرفت‌هایی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، امکان‌پذیر شده است [۹۰].

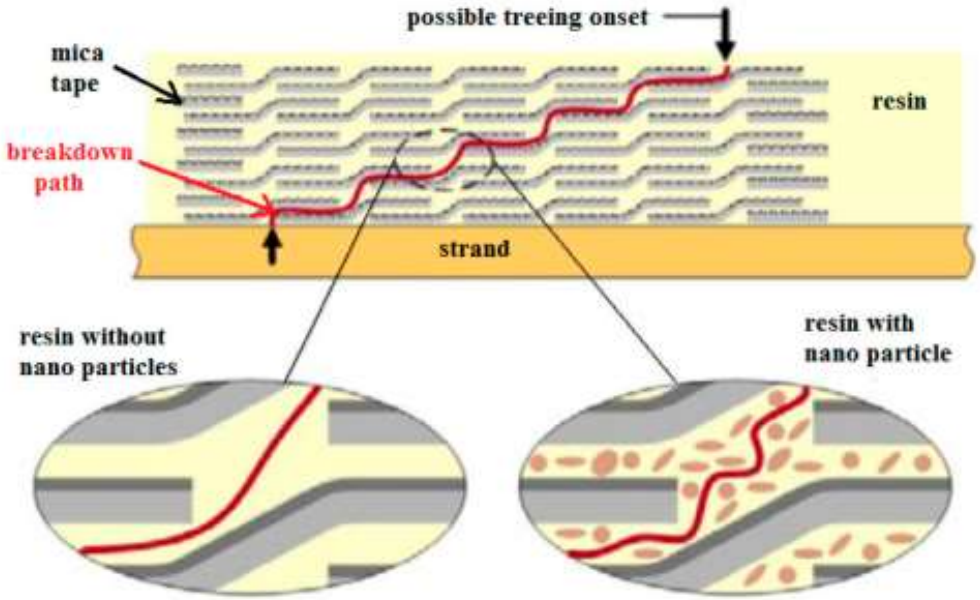
- فرایند ساخت بهتر مواد برای کاهش ابعاد و تعداد حفره‌ها و حباب‌ها در عایق بدنه
- وجود ماشین‌های بهتر برای ساخت نوار که کشش پایدار به نوار و لایه‌های نوار قرارگرفته روی هم، اعمال می‌کنند.
- افزایش درصد میکا در عایق بدنه برای افزایش مقاومت در برابر تخلیه‌ی جزئی
- توسعه‌ی مواد دیگر برای افزایش درصد مقاومت در برابر تخلیه‌ی جزئی در عایق بدنه و بهبود استقامت ولتاژی آن راهی دیگر برای افزایش مقدار میکا در عایق بدنه، علاوه بر استفاده از شیشه‌ی تخت، جایگزین کردن پشتیبان‌های روکش شیشه در نوارهای کاغذی میکا با نوارهای ترموپلاستیک با ضخامت یک چهارم برابر روکش شیشه است (کمتر از ۰/۰۰۶۵ میلی‌متر). برای رسیدن به این هدف، نوارهای PET بسیار مورداستفاده قرار گرفته‌اند [۹۰].

نوارهای پلی‌استری جدید که با استفاده از polyethylene naphtalate ساخته شده‌اند، پایداری حرارتی بهتری دارند و جایگزین نوارهای PET می‌شوند. برای مثال، یک محصول شرکت DuPont به نام KaladexTM ، دمای گذرای شیشه‌ای به اندازه‌ی ۴۲ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشتر از نوارهای PET دارد. این نوار، مدول الاستیسیته‌ی بالا داشته و در نتیجه‌ی آن ۲۵ ٪ سختی بیشتری دارد. همچنین استقامت الکتریکی متوسط آن حدود ۲۵ ٪ بیشتر از نوارهای PET است.

اکسیدهای فلزی، از قبیل اکسید آلومینیوم، نتایج خوبی در ترکیب با اپوکسی رزین و کاغذ میکا داده و می‌تواند به‌منظور بهبود عایق بدنه مورداستفاده قرار بگیرد [۹۴].

کاملاً اثبات و پذیرفته شده است که استفاده از پرکننده‌های نانوذره‌ی مقاوم در برابر خوردگی از قبیل سیلیکا و آلومینا در اپوکسی رزین، باعث جلوگیری از خوردگی، در صورت قرار گرفتن در معرض تخلیه‌ی جزئی، خواهد شد و منجر به بهبود چشمگیر مشخصات طول عمر عایق خواهد شد. دلیل این رخداد طولانی شدن مسیر انتشار درخت الکتریکی در عایق بدنه در صورت استفاده از رزین با نانوذرات نسبت به حالت عدم وجود نانوذرات است، همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود [۹۵]. با طولانی شدن مدت‌زمان خوردگی، یک لایه‌ی چسبنده، به‌صورت تدریجی روی سطح ماده‌ی موردآزمایش که از نانوذرات

پرکننده تشکیل شده است، شکل می‌گیرد. بنابراین، سطح غیر فعال شده و پلیمر زیر پوشش غیر فعال، به‌صورت مؤثر از خوردگی بیشتر در معرض تخلیه‌های جزئی حفظ می‌شود [۹۶].

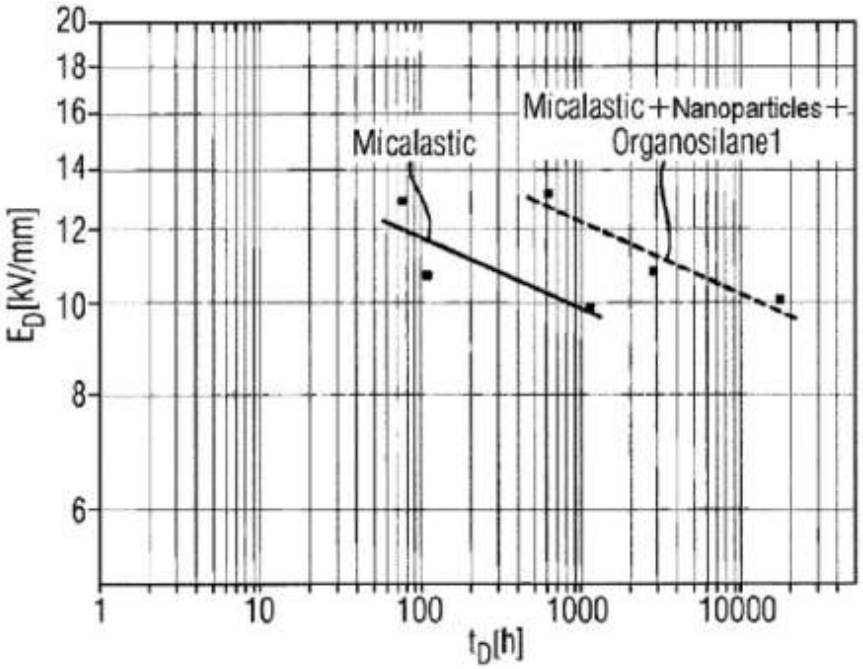


شکل ۴-۷- طولانی شدن مسیر انتشار درخت الکتریکی در عایق بدنه رزین با نانوذرات در مقایسه با حالت عدم وجود نانوذرات [۹۵]

امروزه تنها یک کاربرد اولیه از نانومواد در عایق بدنه در سیم‌پیچی‌های شکل‌یافته گزارش شده که در آن، شرکت زیمنس یک VPI اپوکسی رزین پرشده با نانومواد سیلیکون دی‌اکسید را توسعه داده است و در نوارهای کاغذی اشباع‌شده‌ی میکا استفاده کرده است [۹۵]–[۹۶].

همچنین گزارش شده است که استفاده از ارتقادهنده‌های چسبندگی، در رزین اشباع‌شده، خوردگی را مهار می‌کند. ارتقادهنده های چسبندگی، به سطح نانومواد متصل شده و منجر به اتصال بهتر ذرات به ماتریس پلیمری و مقاومت بهتر در برابر خوردگی خواهند شد [۹۷]. سه ترکیب ارگانیک سیلیکونی شامل 3-glycidyloxy-propyltrimethoxysilane، octamethyltrisiloxane وpolyhedral oligomeric silsesquioxanes در مرجع [۹۶] موردآزمایش قرار گرفتند. شکل زیر منحنی طول عمر برای سیستم‌های عایقی پرنشده و پرشده با نانوذرات را نشان می‌دهد. در این شکل، micalastic، با micalastic با ۱۰ درصد وزنی نانوذرات (قطر حدود ۲۰ نانومتر) به‌علاوه ۵ درصد وزنی 3-glycidyloxy-propyltrimethoxysilane مقایسه شده‌اند [۹۶]. ترکیب وزنی ۵۰ درصد میکا و ۵۰ درصد رزین، micalastic را ساخته است. با اضافه کردن مقادیر بیان‌شده‌ی نانوذرات، به همان اندازه، مقدار رزین کم شده است. در هر دو حالت، مقدار میکا ثابت مانده است. نتایج تست دو ترکیب ارگانیک سیلیکون دیگر نیز در مرجع [۹۶] گزارش شده است و مشاهده می‌شود که بهبود طول عمر با ضریب ۲۰ تا ۳۰ به‌دست آمده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۴-۸- مقایسه طول عمر، micalastic با micalastic با ۱۰ درصد وزنی نانوذرات (قطر حدود ۲۰ نانومتر) به‌علاوه ۵ درصد وزنی 3-glycidyloxy-propyltrimethoxysilane [۹۶]

۴ ۷ نمونه مواد عایقی مدرن مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی امروزی

انواع مواد عایقی با جنبه‌های نوآورانه که امروزه در ماشین‌های الکتریکی مورداستفاده قرار می‌گیرند در قالب محصولات یک شرکت مطرح در این زمینه (شرکت وانرول) در ادامه معرفی و مشخصات آنها بررسی شده است.

۴ ۷ ۱ محصولات شرکت وانرول[1] برای عایق هادی‌ها

نوارهای میکای شرکت وانرول برای عایق هادی‌های ماشین‌های الکتریکی فشارقوی بزرگ با نام samicafilm معروف هستند. این محصول از کاغذ میکای اشباع‌شده با اپوکسی رزین بهبودیافته تشکیل شده و همچنین با یک یا دو لایه نوار پشتیبان پلی‌استر، با یا بدون پوشش چسبنده، تقویت شده است. جدول مشخصات و همچنین تصویر انواع samicafilm در ادامه ارائه شده است. این محصول مقاومت عالی در برابر کرونا داشته و همچنین بسیار نازک است [۹].

1- vonroll

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

شکل ۴-۹- مشخصات انواع samicafilm [۹]

Samicafilm® type	Thickness mm	Weight g/m² Total	Mica	PET Film 1	PET Film 2	Resin	Breakdown voltage kV	Adhesive
315.11-01	0.06	72	30	32		10	≥ 5	No
315.12-01	0.07	93	50	32		11	≥ 5	No
315.70-01	0.075	101	50	42		9	≥ 8	No
315.14	0.09	131	75	42		14	≥ 8	No
315.15-01	0.09	131	75	42		14	≥ 8	No
315.11-11	0.06	76	30	32		14	≥ 5	Yes
315.12-11	0.07	97	50	32		15	≥ 5	Yes
315.15-11	0.09	135	75	42		18	≥ 8	Yes
315.72-01	0.085	124	65	32	17	10	≥ 8	No
315.23-01	0.09	112	50	32	17	13	≥ 8	No
315.25-03	0.1	141	75	42	8	16	≥ 8	No
315.72-21	0.09	133	65	32	17	19	≥ 8	1 side
315.23-11	0.09	126	50	32	17	27	≥ 8	2 sides
315.25-11	0.11	151	75	32	17	27	≥ 8	2 sides



شکل ۴-۱۰- تصویر انواع samicafilm [۹]

۴ ۷ ۳ محصولات شرکت وانرول برای عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی

محصولات با نام تجاری samicapor و samicatherm، از شرکت وانرول و از نوارهای VPI میکا، برای عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی، ارائه شده‌اند. در ادامه جدول مشخصات samicapor و samicatherm و تصویر آنها ارائه شده است.

از مزایای نوارهای samicapor و samicatherm، موارد زیر ذکر شده است [۱۰]:

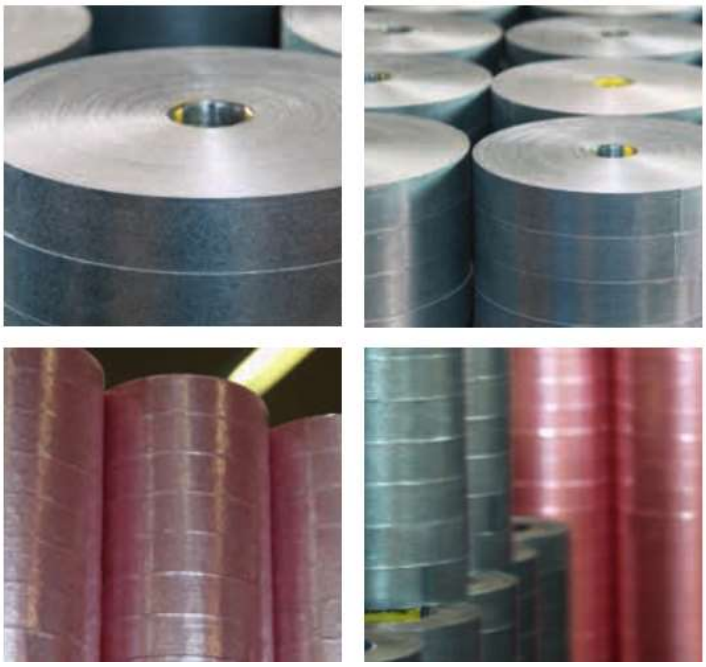
- استقامت عایقی بالا
- مقاوم در برابر تخلیه‌ی کرونا
- اشباع سریع و آسان
- قابل‌کاربرد با ماشین یا به‌صورت دستی
- قابل‌کاربرد با نرمی و بدون چین خوردن

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

- دارای تطابق کامل با یک سیستم از قبل استفاده‌شده
- زمان کوتاه موردنیاز برای برش

شکل ۴-۱۱- جدول مشخصات sami capor [۱۰]

Product name	Rated voltage <6 kV	6 – 13.8 kV	>13.8 kV	Thickness mm	Weight g/m² Total	Mica	Composition	Composition Non-accelerated epoxy/ anhydride	Accelerated epoxy VPI system
Samicapor® 366.55-20	•	•	•	0.15	200	160	Mica/Glass	Yes	No
Samicapor® 366.55-30	•	•	•	0.15	200	160	Mica/Glass	Yes	No
Samicapor® 366.58	•	•	•	0.15	195	160	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® 366.58-18	•	•	•	0.15	213	180	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® 366.58-20	•	•	•	0.17	224	180	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® HTC 381.55-20	•	•	•	0.20	259	160	Mica/Glass	Yes	No



شکل ۴-۱۲- تصویر sami capor [۱۰]

شکل ۴-۱۳- جدول مشخصات samicatherm [۱۰]

Product name	Rated voltage <6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV	Thickness mm	Weight g/m² Total	Mica	Description
Samicatherm® 366.28/366.28-02	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with/without interleaving foil
Samicatherm® 366.28-04/366.28-03	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with/without interleaving foil, slightly dryer
Samicatherm® 366.28-05	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with embossed interleaving foil, slightly dryer
Samicatherm® 366.28-06	•	•		0.20	277	120	Mica/Glass without interleaving foil, slightly higher resin content
Samicatherm® 366.33-62	•	•	•	0.25	350	180	Mica/Glass without interleaving foil
Samicatherm® LR 366.29-24		•	•	0.22	380	240	Mica/Glass without interleaving foil
Samicatherm® P 315.20/315.20-02	•			0.16	252	150	Mica/PET film with/without interleaving foil
Samicatherm® P 315.20-10	•			0.17	270	150	Mica/PET film without interleaving foil
Samicatherm® PI 315.51	•			0.09	117	60	Mica/Polyimide film, class H

Product name	Thickness mm	Weight g/m² Total	Mica	Description
Samicatherm® V 374.29	0.22	368	150	Glass/Mica/Polyester fleece tape
Samicatherm® V 374.30	0.21	173	60	Glass/Mica/Polyester fleece tape



شکل ۴-۱۴-تصویر samicatherm [۱۰]

۴ ۷ ۳ محصولات شرکت وانرول برای حفاظت از کرونا

محصول با نام تجاری coronashield برای حفاظت از کرونا ساخته شده است. این نوارها می‌توانند برای حفاظت از کرونا در داخل شیار یا خارج از شیار مورداستفاده قرار بگیرند. جدول مشخصات و تصویر محصول coronashield در ادامه مشاهده می‌شوند [۱۰].

شکل ۴-۱۵- مشخصات انواع coronashield [۱۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

Product name	Thickness mm	Resistivity Ohm/m²	Description
CoronaShield® 215.51	0.10	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, not compatible with epoxy anhydride, cured
CoronaShield® 215.55	0.085	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 215.63	0.17	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 217.01/217.21	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.02/217.22	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.24	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.04	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.31	0.25	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, cured



شکل ۴-۱۶- تصویر انواع coronashi el d [۱۰]

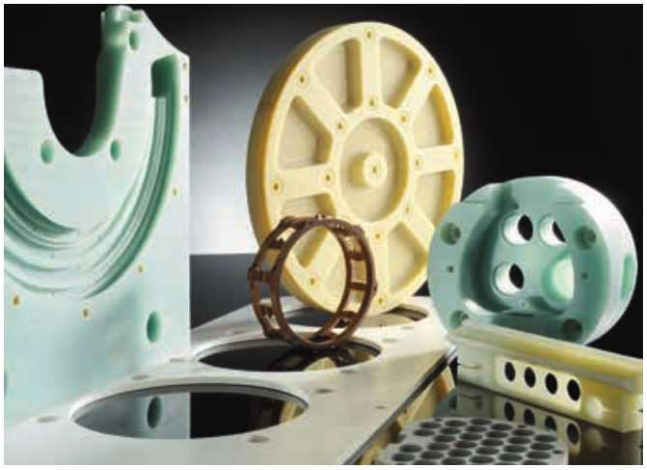
۴ ۷ ۴ محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور

جدول مشخصات و تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور در ادامه ارائه شده‌اند [۱۰].

شکل ۴-۱۷- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۱۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

Product name	Form	Rated voltage			Slot insulation	Pole face packing	End-winding packing	Slot bottom packers	Bottom packers	Slot top packers	Interturn insulation
		<6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV							
Vetronite® 64170/G11	U or L profile, machined components, strips, rolls or full-size sheet	•	•	•	•	•		•		•	•
Vetronite® 69020/64480	Machined parts, rolls or strips	•	•	•					•	•	•
Delmat® 68660	Machined components	•	•	•		•	•				
Delbond® 54000	Machined parts, rolls or strips	•	•	•							•
Polyfibrite® 63020	Machined components and strips	•	•	•			•	•			



شکل ۴-۱۸- تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۱۰]

۴ ۷ ۵ محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور

جدول مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور در ادامه ارائه شده‌اند [۱۰].

شکل ۴-۱۹- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور [۱۰]

Product name	Form	Rated voltage			Top slot wedging	End caps	Slot wedges	Support brackets
		<6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV				
Vetronite® 64170/G11	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Conductive Vetronite® 432.10	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Delmat® 68660	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	•
Delmat® 68420	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Conductive and nonconductive ripple springs	Strips or full size-sheets	•	•	•	•		•	
Vetroferrite® 432.20/432.21	Molded parts	•	•	•		•		

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۴ ۷ ۶ محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده

جدول مشخصات و تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده در ادامه ارائه شده‌اند. استفاده از این نوارها برای حفاظت عایق بدنه‌ی تجهیز در ناحیه‌ی پیشانی انتهایی در برابر موارد زیر به شدت توصیه می‌شود [۹].

- رطوبت
- بار مکانیکی
- صدمه دیدن
- جاری شدن رزین
- آلودگی‌های اتمسفریک

شکل ۴-۲۰- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۹]

Product name	Thickness mm	Description
Epoflex 215.01	0.19	Polyester fleece with epoxy resin, not cured
Epoflex 219.61-10	0.18	Polyester glass fabric with with epoxy resin, not cured
Epoflex 324.03	0.09	Polyester glass fabric with a polyester film and reduced binder quantity, cured



شکل ۴-۲۱- تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۹]

۴ ۸ جمع‌بندی

در این فصل سیستم‌ها و مواد عایقی مدرن برای ماشین‌های الکتریکی بزرگ و کوچک به تفکیک ارائه شد. نانوکامپوزیت‌های پلیمری و کاهش ضخامت عایق بدنه‌ی استاتور به‌عنوان دو رویکرد نوین در سیستم‌های عایقی موردمطالعه قرار گرفت. تأثیر تغییر ضخامت عایق بدنه بر افزایش توان خروجی بر کیلوگرم وزن ماشین الکتریکی، استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica، و کاهش امپدانس حرارتی عایق بدنه از موارد

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

دیگریست که امروزه در سیستم‌های عایقی مدرن موردتوجه است و بدان پرداخته شد. پیشرفت‌های اخیر در کاهش ضخامت عایق بدنه نیز بررسی شده و در نهایت نمونه مواد عایقی مدرن مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی امروزی برای عایق هادی‌ها، عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی، برای حفاظت از کرونا، و برای اجزای روتور و استاتور معرفی شد.

فصل پنجم: تعیین سازندگان و تولیدکنندگان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی در داخل و خارج کشور

۵ ۱ مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع و روزافزون ماشین‌های الکتریکی، بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی رو به بزرگ شدن است [۱]–[۲]. در بخش‌های بعد، تقسیم‌بندی‌های بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس پارامترهای مختلف ارائه شده است.

۵ ۱ ۱ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نوع ماشین

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نوع ماشین به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]–[۲]:

- ماشین‌های AC
- ماشین‌های القایی
- ماشین‌های سنکرون
- ماشین‌های DC
- ماشین‌های DC دارای جاروبک
- ماشین‌های DC بدون جاروبک
- ماشین‌های مخصوص

۵ ۱ ۲ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی توان خروجی

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی توان خروجی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]:

- تا ۰/۵ اسب بخار
- ۱–۵ اسب بخار
- ۵–۱۰ اسب بخار
- ۱۰–۵۰ اسب بخار
- ۵۰–۱۰۰ اسب بخار
- ۱۰۰–۲۵۰ اسب بخار
- ۲۵۰–۵۰۰ اسب بخار
- ۵۰۰ اسب بخار و بالاتر

۵ ۱ ۳ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی ولتاژ

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس محدوده‌ی ولتاژ به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]:

- تا ۹ ولت
- ۱۰–۲۰ ولت
- ۲۰–۶۰ ولت
- ۶۰ ولت و بالاتر

۵ ۱ ۴ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس سرعت ماشین

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس سرعت ماشین به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]:

- ماشین‌های کم‌دور (کمتر از ۱۰۰۰ دور بر دقیقه)

- ماشین‌های دور متوسط (۱۰۰۰–۲۵۰۰ دور بر دقیقه)
- ماشین‌های پرسرعت (۲۵۰۰–۷۵۰۰۰ دور بر دقیقه)
- ماشین‌های فوق پرسرعت (۷۵۰۰۰ دور بر دقیقه و بالاتر)

۵ ۱ ۵ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کلاس عایقی

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کلاس عایقی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]:

- کلاس عایقی B (تحمل دماهای تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)
- کلاس عایقی E (تحمل دماهای تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد)
- کلاس عایقی F (تحمل دماهای تا ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد)
- کلاس عایقی H (تحمل دماهای تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد)

۵ ۱ ۶ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نو ع عایق

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس نوع عایق به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]–[۲]:

- شیشه
- لاک‌ها
- نوار و کاغذ
- لاستیک (Rubber)
- PVC
- لایه‌های سخت
- رزین ها
- تفلون
- نانوکامپوزیت‌ها
- غیره

۵ ۱ ۷ تقسیم‌بندی بازار مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کاربرد

بازار جهانی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی بر اساس کاربرد به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱]:

- الکترونیکی و لوازم خانگی
- معدن و متالورژی
- حمل و نقل
- قدرت
- نفت و گاز
- سایر صنایع تولیدی

۵ ۱ ۸ سازندگان و تولیدکنندگان کلیدی خارجی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی

سازندگان و تولیدکنندگان خارجی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی به‌صورت زیر هستند [۱]:

۵ ۱ ۸ ۱ شرکت Krempel GmbH

- مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک [۳]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

به دلیل اتوماتیک بودن فرایند تولید، سیم‌پیچی‌ها در هنگام قرار گرفتن در شیارها، دچار کشیدگی می‌شوند. مواد سطح عایق‌ها باید مشخصات مکانیکی خوبی داشته باشند و بتوانند، تحمل کنند. مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک ساخت شرکت Krempel علاوه بر داشتن مشخصات الکتریکی عالی، مشخصات بسیار خوب زیر را دارند:

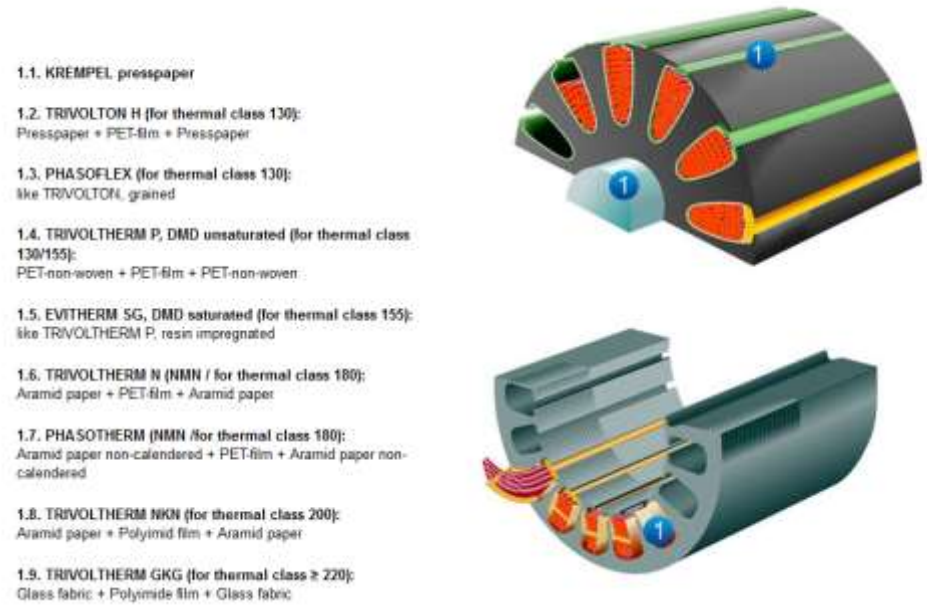
- مقاومت در برابر پارگی
- استقامت موجی
- بازیابی مکانیکی
- قابلیت جمع شدن
- قابلیت سوراخ‌کاری
- انعطاف‌پذیری
- سایش
- مقاومت
- صافی
- همواری سطح
- آمادگی جذب عوامل آغشته‌کننده

مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک ساخت شرکت Krempel به شرح زیر هستند:

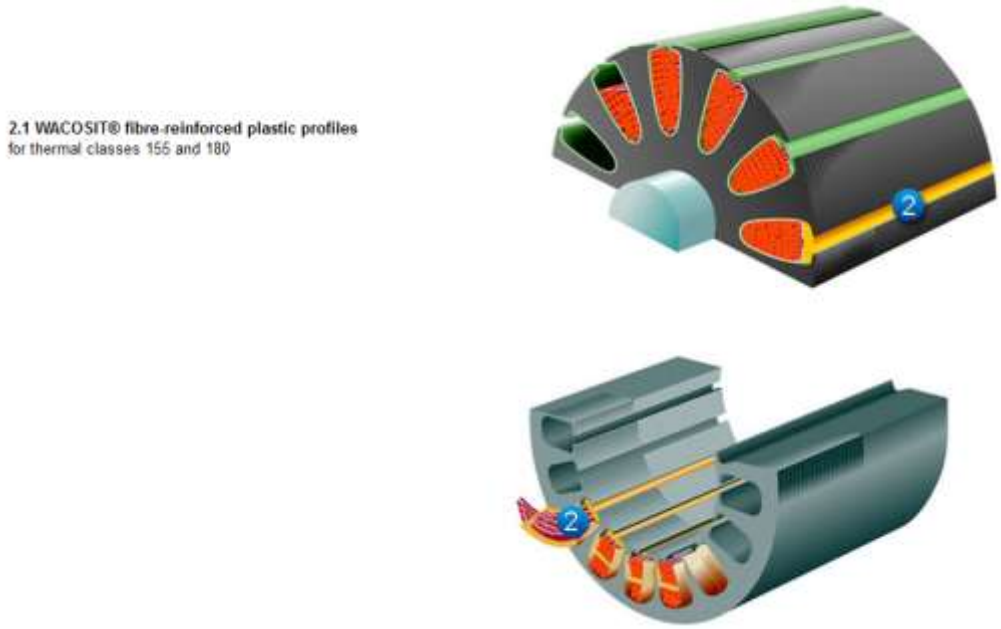
- کاغذ عایقی (Presspaper)
- عایق چند لایه (DMD, NMN, NKN)
- پلاستیک تقویت‌شده با فیبر شیشه (WACOSIT)
- نوارهای بانداژ (HYPERTEN)
- نوارهای بافته‌شده (VIDATAPE)
- روکش‌های عایق (VIDAFLEX)
- طناب‌های بسته‌بندی (VIDACORD)

در شکل‌های زیر، بعضی از محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک، نشان داده شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

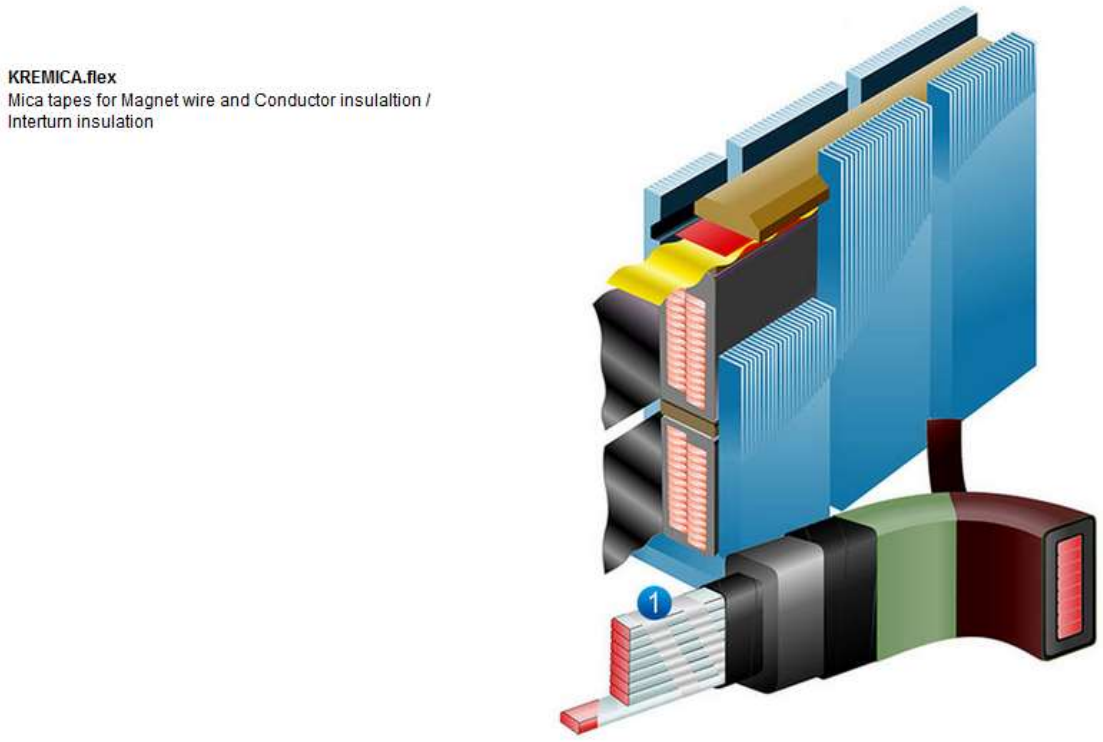


شکل ۵-۱- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک، عایق شیار، عایق فاز و نگهدارنده شیار [۳]



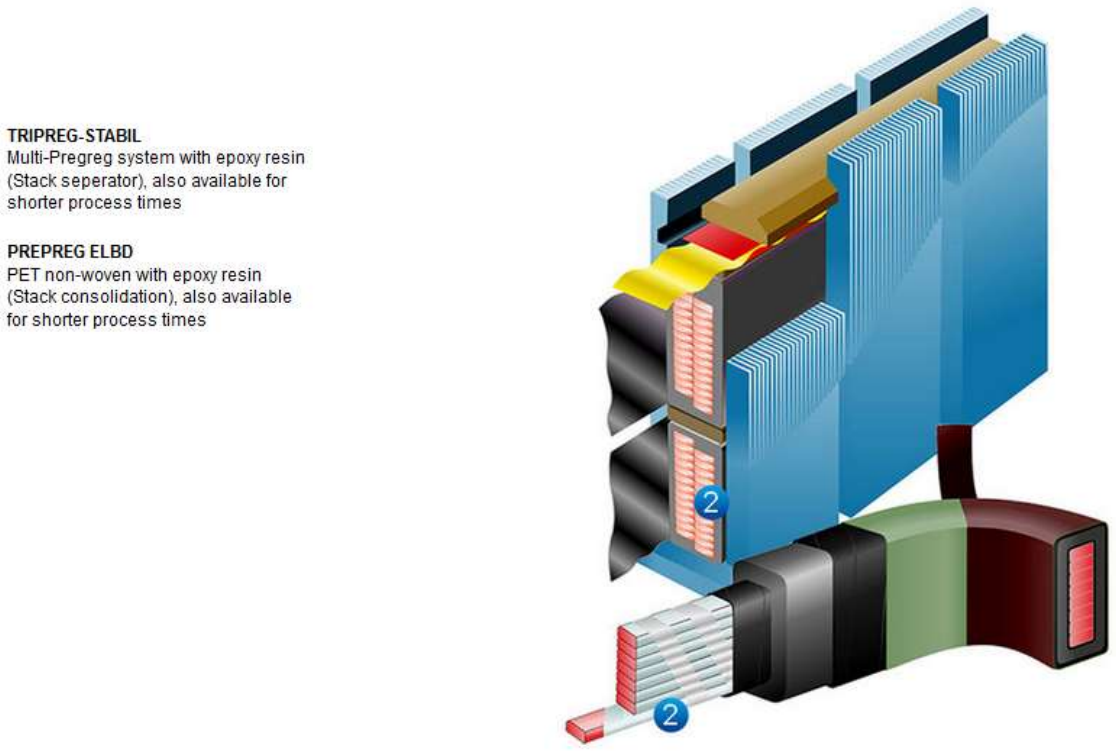
شکل ۵-۲- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی موتورهای الکتریکی کوچک، گوه شیار [۳]

در شکل‌های زیر، محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۳ - محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، عایق هادی یا حلقه [۴]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

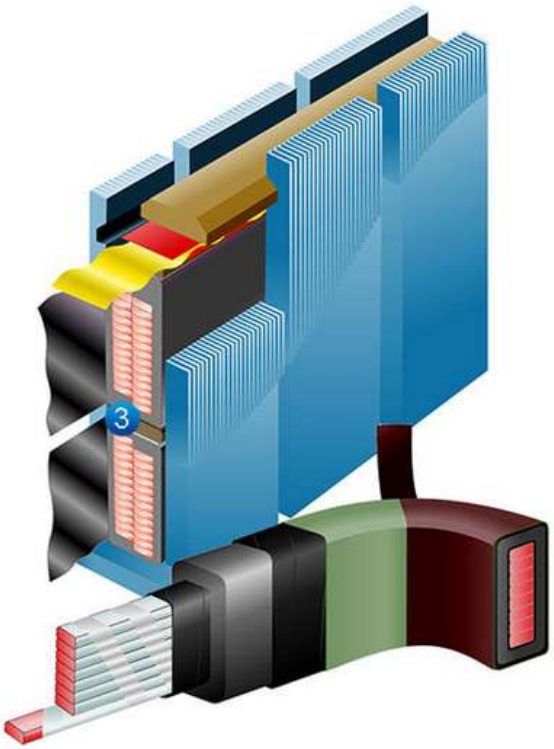


شکل ۵-۴- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، استحکام‌دهنده سیم‌پیچی و میله [۴]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

KREMPEL-ERKITT
Electrically conducting epoxy resin mastic

KREMPEL-ISKIT
Electrically insulation epoxy resin mastic



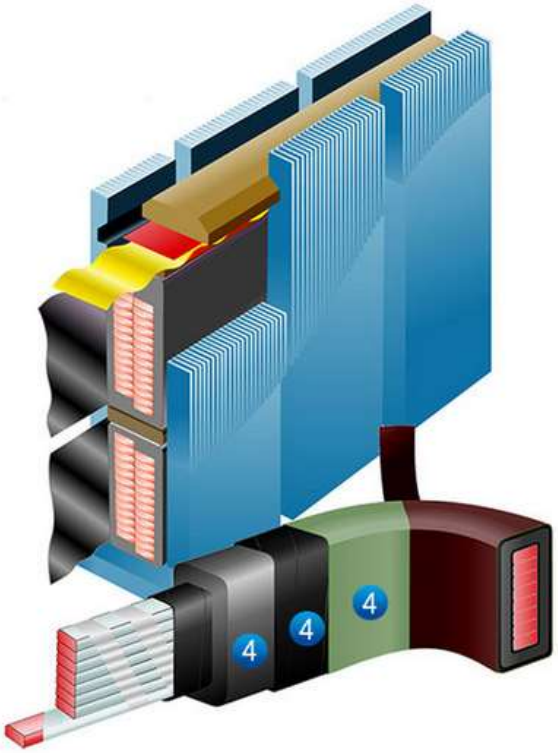
شکل ۵-۵- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، پرکننده شیار [۴]

KREMICA.therm
Mica tapes for Resin-Rich technique (B-stage)

KREMICA.por
Mica tapes for vacuum-pressure impregnation (VPI)

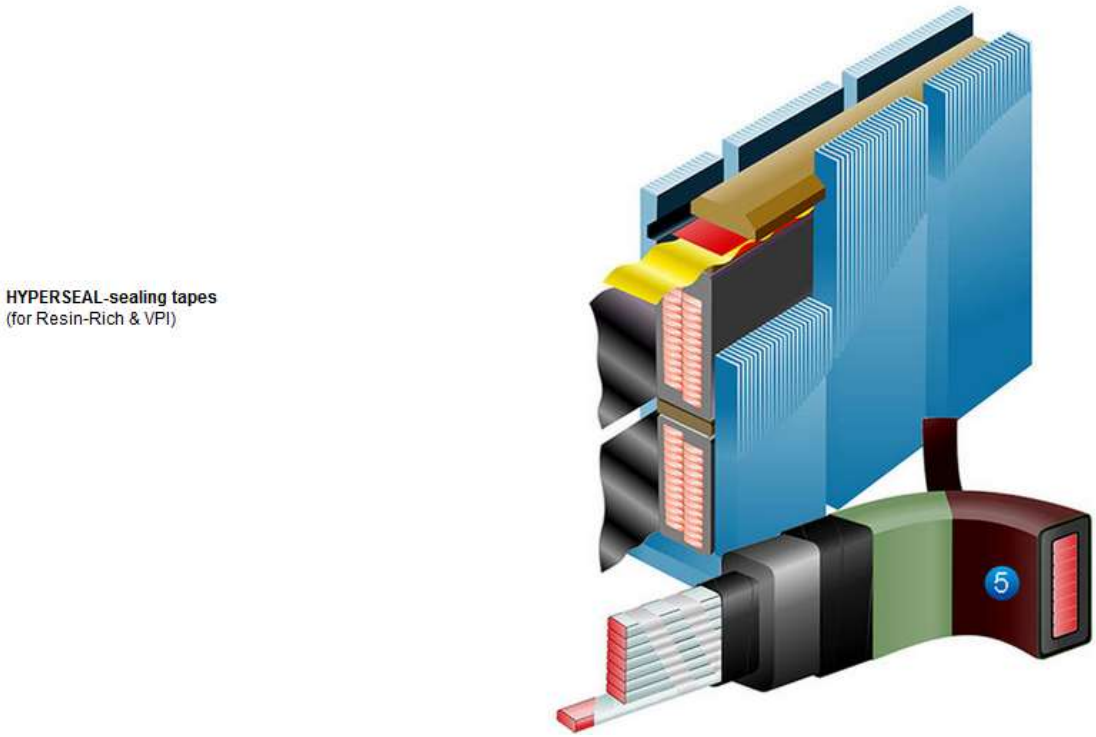
KREMPEL Conductive tapes for corona protection
- Inner corona protection (ICP-tapes)
- Outer corona protection (OCP-tapes)

AKASIC 4b
Semi conductive tape / Stress grading tape (EGS tape)



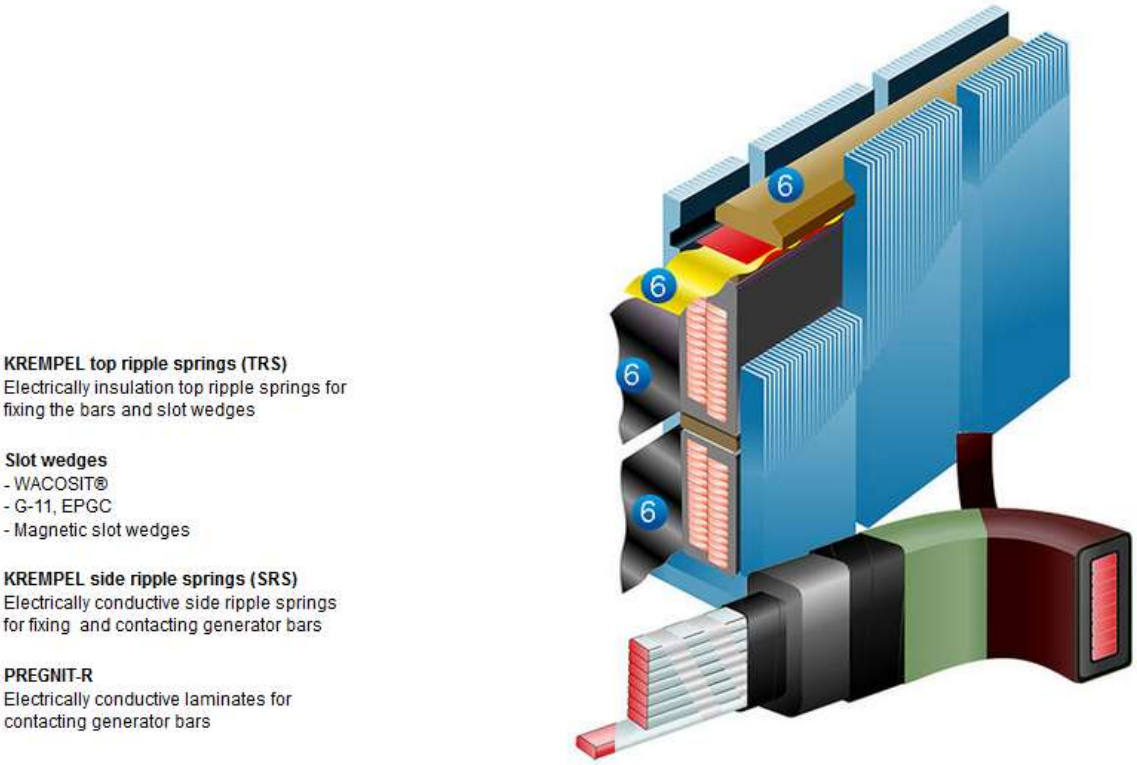
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

شکل ۵-۶- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، عایق اصلی [۴]



شکل ۵-۷- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشارقوی، روکش قسمت انتهایی سیم‌پیچی [۴]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۵-۸- محصولات شرکت Krempel به‌عنوان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی فشار قوی، گوه و بسته‌بندی سیم‌پیچی‌ها [۴]

متناسب با نوع سلولز و شرایط استفاده، این شرکت تولیدی، انواع مختلفی از کاغذ و بردهای پرس‌شده با مشخصات ویژه، تولید می‌کند. کاغذ سیم‌پیچی پرسپان ساخت شرکت کرمپل (KREMPEL) آلمان با خلوص بالای سلولز و تولیدشده با ماشین‌آلات ویژه، این شرکت را به بزرگ‌ترین تولیدکننده این نوع از کاغذها تبدیل کرده است. کاغذ سیم‌پیچی پرسپان (پرسشپان به گویش آلمانی) که در بازار ایران کاغذ پرشمان یا پریشمان نامیده می‌شود، کاغذی به رنگ سبز تیره و یا خاکستری، ساخته‌شده از سلولز طبیعی عاری از مواد شوینده و فاقد از هرگونه مواد چسبنده است.

این نوع از کاغذ در عملیات تولید خود، یعنی پرس مواد خیس در سیستم خشک‌کن هوای‌گرم و در پی آن صیقلی کردن سطوح آن، خواص مکانیکی و الکتریکی خود را به‌دست می‌آورد. این کالا در ضخامت‌های مختلفی از۰/۱ میلی‌متر تا ۱/۰ میلی‌متر تولید می‌شود و عمدتاً برای استفاده در قطعات پانچ‌شده (واشرها) یا قطعات قالب‌شده، سیم‌پیچ‌ها و عایق‌بندی لایه‌ای و غیره مورداستفاده قرار می‌گیرد. به سبب تمایل بالای این محصول به جذب رطوبت، که همیشه تغییر در خواص کاغذ را به دنبال دارد، آغشته‌سازی یا پوشش با رزین، باید همیشه بعد از کار با این نوع کاغذ انجام شود.

شرایط نگهداری: ازآنجاکه این کاغذها همیشه با رطوبت محیط به تعادل می‌رسند، این نوع محصولات باید در بسته‌بندی اصلی خود و در محیطی عاری از گرد و خاک و رطوبت نگهداری شوند تا از دریافت کردن یا از دست دادن رطوبت محصولات جلوگیری کند. نحوه استفاده: کاغذهای کرمپل را می‌توان خم کرد، تا کرد، سوراخ کرد و برش زد. کاغذهای نازک‌تر را می‌توان قالب زد و به شکل دلخواه درآورد. بسیار مهم است که به هنگام عملیات و برش روی کاغذها از بهترین کاترها استفاده کرد و برش با کیفیت زد، چرا که برش نادرست، مقاومت کاغذ در برابر پارگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۵.۱.۸.۲ شرکت Ganapathy Industries

این شرکت در سال ۱۹۶۷ تأسیس شد. این شرکت در بنگلور هندوستان قرار دارد. مواد عایقی تولیدی این شرکت در شکل زیر نشان داده شده‌اند [۵].



شکل ۵-۹- مواد عایقی تولیدی شرکت Ganapathy Industries [۵]

بازار صادرات این شرکت در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۰- بازار صادرات شرکت Ganapathy Industries [۵]

۵.۱.۸.۳ شرکت Dupont

کپتون

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

عایق الکتریکی کپتون (کاپتون) فیلمی از پلی‌آمید است که توسط شرکت DuPont آمریکا در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی تولید و توسعه یافته و در طیف گسترده‌ای از دما (۲۶۹- تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) در سفینه‌های فضایی، ماهواره‌ها، هواپیماها، تولید قطعات الکترونیکی ، چاپ سه‌بعدی و همچنین در محیط خلأ استفاده شده است. کپتون به دلیل خاصیت دی‌الکتریک خوب و در دسترس بودن تبدیل به محصولی موردعلاقه به‌عنوان عایق الکتریکی در شیب حرارتی کم شده است. همچنین به علت سبک‌تر بودن نسبت به سایر عایق‌ها و مقاومت در مقابل اشعه ایکس، به‌طور گسترده در هواپیماهای نظامی و غیر نظامی و نیز در ساخت تلسکوپ فضایی جیمز وب مورداستفاده قرار گرفته است. با توجه به ثبات حرارتی و خاصیت ضد الکتریسیته نوار کپتون، معمولاً در صنایع الکترونیکی به‌عنوان یک عایق و محافظ در قطعات حساس و شکننده الکترواستاتیک استفاده می شود. خاصیت الکتریکی، هدایت حرارتی و چقرمگی مکانیکی ایدئال عایق کپتون برای کنترل و مدیریت حرارت باعث شده تا استفاده از آن در بخش‌های الکترونیکی و خودرو بسیار موردتوجه قرار گیرد [۶]-[۷].

در جدول‌های زیر، مشخصات برخی از انواع کپتون تولیدی در شرکت DuPont ارائه شده است.

جدول ۵-۱- مشخصات Dupont Kapton 100CRC [۶]

Property	Unit	Typical Value	Test Method
Thickness	mil	1	ASTM D374
	µm	25.4	
Tensile Strength	kpsi	33	ASTM D882
	MPa	228	
Elongation	%	70	ASTM D882
Tensile Modulus	kpsi	545	ASTM D882
	GPa	3.8	
Dielectric Strength	V/mil	6400	ASTM D149
	kV/mm	252	
Dielectric Constant @ 1 kHz	–	3.4	ASTM D150
Dissipation Factor @ 1 kHz	–	0.002	ASTM D150
Volume Resistivity	ohm-cm	$>10^{16}$	ASTM D257
Yield	ft^2/lb	125	–
	m^2/kg	25.5	
Density	g/cc	1.55	ASTM D1505
UL Electrical RTI	°C	240	UL 746B
UL Mechanical RTI	°C	200	UL 746B
Flammability	UL-94	V-0	UL Test Method

جدول ۵-۲- مشخصات DuPont Kapton 150FCRC019 [۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

Property	Unit	Typical Value	Test Method
Thickness	mil	1.5	ASTM D374
	µm	38	
Tensile Strength	kpsi	25	ASTM D882
	MPa	172	
Elongation	%	77	ASTM D882
Tensile Modulus	kpsi	380	ASTM D882
	GPa	2.6	
Dielectric Strength	V/mil	4200	ASTM D149
	kV/mm	165	
315 °C Heat Seal Strength	gms/in	1100	DuPont Test Method
	gms/cm	433	
Yield	ft^2/lb	78	-
	m^2/kg	16	
Density	g/cc	1.65	ASTM D1505
Results Below - polyimide film data only			
Dielectric Constant @ 1 kHz	-	3.4	ASTM D150
Dissipation Factor @ 1 kHz	-	0.002	ASTM D150
Volume Resistivity	ohm-cm	$>10^{16}$	ASTM D257
UL Electrical RTI	°C	240	UL 746B
UL Mechanical RTI	°C	200	UL 746B
Flammability	UL-94	V-0	UL Test Method

جدول ۵-۳- مشخصات فیزیکی DuPont Kapton HN در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد [۶]

Property	Unit	05 mil 12.7µm	1 mil 25µm	2 mil 50µm	3 mil 75µm	5 mil 125µm	Test Method
Ultimate Tensile Strength at 23°C, (73°F) at 200°C (392°F)	psi (MPa)	33,500 (231) 20,000 (138)	33,500 (231) 20,000 (138)	33,500 (231) 20,000 (138)	33,500 (231) 20,000 (138)	33,500 (231) 20,000 (138)	ASTM D-882-91, Method A*
Ultimate Elongation at 23°C, (73°F) at 200°C (392°F)	%	65 68	72 83	72 83	78 83	82 83	ASTM D-882-91, Method A
Tensile Modulus at 23°C, (73°F) at 200°C (392°F)	psi (GPa)	400,000 (2.76) 160,000 (1.10)	400,000 (2.76) 290,000 (2.0)	400,000 (2.76) 290,000 (2.0)	400,000 (2.76) 290,000 (2.0)	400,000 (2.76) 290,000 (2.0)	ASTM D-882-91, Method A
Density	g/cc	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	ASTM D-1505-90
MIT Folding Endurance	cycles	>285,000	285,000	55,000	6,000	5,000	ASTM D-2176-89
Tear Strength-propagating (Elmendorf), N (lbf)		NA	0.07 (0.02)	0.21 (0.02)	0.38 (0.02)	0.58 (0.02)	ASTM D-1922-89
Tear Strength, Initial (Graves), N (lbf)		3.5 (1.6)	7.2 (1.6)	16.3 (1.6)	26.3 (1.6)	46.9 (1.6)	ASTM D-1004-90
Yield Point at 3% at 23°C, (73°F) at 200°C (392°F)	MPa (psi)	69 (10,000) 41 (6,000)	69 (10,000) 41 (6,000)	69 (10,000) 41 (6,000)	69 (10,000) 41 (6,000)	69 (10,000) 41 (6,000)	ASTM D-882-91
Stress to produce 5% elong at 23°C, (73°F) at 200°C (392°F)	MPa (psi)	90 (13,000) 62 (9,000)	90 (13,000) 62 (9,000)	90 (13,000) 62 (9,000)	90 (13,000) 62 (9,000)	90 (13,000) 62 (9,000)	ASTM D-882-92
Impact Strength at 23°C, (73°F)	N·cm (ft·lb)	78 (0.58)	78 (0.58)	78 (0.58)	78 (0.58)	78 (0.58)	DuPont Pneumatic Impact Test
Coefficient of Friction, kinetic (film-to-film)		0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	ASTM D-1894-90
Coefficient of Friction, static (film-to-film)		0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	ASTM D-1894-90
Refractive Index (sodium D line)		1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	ASTM D-542-90
Poisson's Ratio		0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	Avg. three samples, elongated at 5, 7, 10%
Low temperature flex life		pass	pass	pass	pass	pass	IPC-TM-650, Method 2.6.18

جدول ۵-۴- مشخصات حرارتی DuPont Kapton HN [۶]

Thermal Property	Typical Value	Test Condition	Test Method
Melting Point	None	None	ASTM E-794-85 (1989)
Thermal Coefficient of Linear Expansion	20 ppm/°C (11 ppm/°F)	-14 to 38°C (7 to 100°F)	ASTM D-696-91
Coefficient of Thermal Conductivity, W/m·K $\frac{cal}{cm \cdot sec \cdot °C}$	0.12 2.87×10^{-3}	296K 23°C	ASTM F-433-77 (1987)
Specific Heat, J/g·K (cal/g·°C)	1.09 (0.261)		Differential calorimetry
Heat Sealability	not heat sealable		
Solder Float	pass		IPC-TM-650 Method 2.4.13A
Smoke Generation	D_m=<1	NBS smoke chamber	NFPA-258
Shrinkage, % 30 min at 150°C 120 min at 400°C	 0.17 1.25		IPC-TM-650 Method 2.2.4A; ASTM D-5214-91
Limiting Oxygen Index, %	37–45		ASTM D-2863-87
Glass Transition Temperature (Tg)	A second order transition occurs in Kapton® between 360°C (680°F) and 410°C (770°F) and is assumed to be the glass transition temperature. Different measurement techniques produce different results within the above temperature range.		

جدول ۵-۵- مشخصات الکتریکی DuPont Kapton HN در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد [۶]

Property Film Gage	Typical Value		Test Condition	Test Method
Dielectric Strength	**V/m kV/mm**	**(V/mil)**		
12.7 µm (0.5 mil)	315	(8000)	60 Hz 1/4 in electrodes 500 V/sec rise	ASTM D-149-91
25 µm (1 mil)	303	(7700)		
50 µm (2 mil)	240	(6100)		
75 µm (3 mil)	201	(5100)		
125 µm (5 mil)	154	(3900)		
Dielectric Constant				
12.7 µm (0.5 mil)	3.4		1 kHz	ASTM D-150-92
25 µm (1 mil)	3.4			
50 µm (2 mil)	3.4			
75 µm (3 mil)	3.5			
125 µm (5 mil)	3.5			
Dissipation Factor				
12.7 µm (0.5 mil)	0.0016		1 kHz	ASTM D-150-92
25 µm (1 mil)	0.0018			
50 µm (2 mil)	0.0020			
75 µm (3 mil)	0.0020			
125 µm (5 mil)	0.0026			
Volume Resistivity	Ω·cm[17]			
12.7 µm (0.5 mil)	1.5×10^{17}			ASTM D-257-91
25 µm (1 mil)	1.5×10^{17}			
50 µm (2 mil)	1.5×10^{17}			
75 µm (3 mil)	1.4×10^{17}			
125 µm (5 mil)	1.0×10^{17}			

جدول ۵-۶- مشخصات DuPont Kapton PV9100 Series [۶]

Properties	PV9101	PV9102
Thickness - microns	50	38
Tensile Strength MD / TD (MPa) @ 25°C ASTM D-882	390 / 470	360 / 380
Elongation MD / TD (%) @ 25°C ASTM D-882	75 / 55	70 / 60
Modulus MD / TD (GPa) @ 25°C ASTM D-882	5.8 / 6.3	5.8 / 7.6
Modulus MD (GPa) @ 450°C DMA (RT-500°C, 5°C/min)	0.4	0.3
CTE (ppm/°C) MD / TD @ 50-350°C (TMA RT-450 1st, RT-500 2nd (2nd heat data) 10°C/min.*	14 / 8	15 / 4
Tg (°C) DMA (RT-500°C, 5°C/min) tan delta peak*	370	370
Isothermal Weight Loss (%) TGA @ 500°C, ~30 minutes*	<1	<1
Moisture Absorption (%) (Immersion 24hrs @ 25°C)	1.7	1.7
DC Dielectric Strength (V/µm) 500 V/sec. rise, 6.3 mm electrode	470	552

نومکس [۷]

نومکس و پلیمرهای آرامیدی مشابه آن، از خانواده نایلون هستند، اما ستون فقرات آنها از نوع آروماتیک است. به همین دلیل سخت‌تر و مقاوم‌تر از نایلون هستند.

نومکس به‌عنوان نوعی پلیمر، از مقاومت حرارتی، شیمیایی و تشعشعی بالایی برخوردار است.

نومکس دارای نقطه ذوب ۳۷۱ درجه سانتی‌گراد بوده (درجه حرارتی که کالا به اتو می‌چسبد ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است) بنابراین مقاومت حرارتی آن فوق‌العاده زیاد است.

مقاومت شیمیایی آن نیز فوق‌العاده خوب است (تفلون تنها الیافی است که در این مورد از نومکس بهتر است).

اسید و قلیایی رقیق هیچ‌گونه اثری روی الیاف نمی‌گذارد اما اسید و قلیایی غلیظ خصوصاً در حرارت بالا مقاومتش را تا حدودی کاهش می‌دهد.

در مقابل حلال‌های آلی نظیر فنول، فرمیک اسید و متانول مقاوم است.

تثبیت حرارتی آن فوق‌العاده خوب است؛ به‌طوری‌که در درجه حرارت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد (نقطه‌ی ذوب نایلون‌های معمولی) این الیاف فقط ۲٪ ایجاد جمع‌شدگی می‌کند. در آب جوش نیز در حدود ۲٪ جمع می‌شود. استحکام الیاف در حدود ۵/۳ گرم بر دنیر(در حالت استاندارد) و در حالت خیس ۴/۱ گرم بر دنیر است. ازدیاد طول تا حد پارگی ۲۲٪ در حالت خشک و ۱۶٪ در حالت خیس است. چگالی نومکس ۱/۳۸ است. فشرده بودن ساختمان ملکولی الیاف باعث پایداری در مقابل حرارت و افزایش وزن مخصوص آن است.

نومکس ورق عایق الکتریکی کلاس F سه لایه با روکش Dupont NOMEX محصول شرکت دوپون (دوپونت) است.

نومکس برای عایق کاری در کلاس F و تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مناسب است.

هر ورق نومکس از سه لایه NMN (نومکس، مایلر، نومکس) تشکیل شده است.

هر ورق این عایق متشکل از فیلم پلی‌استر (مایلرMYLAR) با دولایه کاغذ با سطح صاف ساخته‌شده از فیبرآرامیدی نومکس چسبیده‌شده در دو وجه آن است.

با توجه به قدرت کشسانی، مقاومت برابر پارگی و کلاس حرارتی بالای ورق عایق نومکس، NMN کیفیت خود را در زمینه ساخت ماشین‌های الکتریکی به اثبات رسانده و موقعیت‌های ویژه‌ای برای بهینه‌سازی در تولید موتور های کلاس F به‌وجود آورده است.

خصوصیات استثنایی ورق عایق نومکس (نومکس مایلر نومکس) تنها به مدد مواد اولیه مورداستفاده در آن محقق می‌شود.

نوع چسبی که برای چسباندن لایه‌های مختلف استفاده می‌شود به‌طور اخص اهمیت دارد.

در طول فرایند ساخت این محصول، از دانش ساخت محصولات لایه‌ای استفاده شده که در طول دهه‌های متمادی تجربه به‌دست آمده است و حاصل آن چسبی بوده که ترکیب بهینه‌ای از مواد اولیه مورداستفاده را به‌وجود می‌آورد.

ویژگی‌های مطلوب الکتریکی و مکانیکی فیلم پلی‌استر در این محصول با ویژگی‌های فوق‌العاده‌ی شیمیایی و حرارتی نومکس و کاغذ آرامید تکمیل شده است.

ویژگی‌های فنی نومکس [۷]

ویژگی اختصاصی کاغذ آرامید مقاومت منحصربه‌فرد آن در برابر مواد شیمیایی و حلال‌ها و افزون بر آن پایداری آن برابر حرارت‌های بالا است.

به‌نحوی‌که در مقاومت دیاالکتریک و قدرت دیاالکتریک این کاغذها تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر محسوسی به‌وجود نمی‌آید (در مدت‌زمان کوتاه).

در نتیجه کاغذ آرامید از فیلم پلی‌استر برابر تأثیر مخرب اکسیداسیون و هیدرولیز و همچنین تخریب مکانیکی حتی در دماهای بالا محافظت می‌کند.

افزون‌براین، با وجود سطح صاف و صیقل‌خورده کاغذ آرامید، رزین‌های اشباع‌کننده به‌خوبی به لایه نومکس مایلر نومکس نفوذ کرده و به آنها متصل می‌شوند.

به سبب مکانیزه شدن سیستم‌های تولید، زمانی که کلاف‌های سیم داخل شیارها قرار داده شده و فشرده می‌شوند، عایق استفاده‌شده برای سطح آن نیاز دارد خصوصیاتی داشته باشد که موتور را برای زمان استفاده از کارایی واقعی آن (نه فقط در زمان تست) آماده کند.

برای پاسخ به این نیازها این شرکت عایق‌های الکتریکی‌ای علاوه بر خواص الکتریکی عالی، خواص مکانیکی بسیار خوب مانند مقاومت در برابر پارگی، قدرت انعطاف‌پذیر، تاپذیری، وصول انرژی، انعطاف، پایداری و صاف بودن و نرم بودن سطح را در این محصول فراهم کرده است.

این محصول در بازار ایران به‌صورت رول یک‌تکه با عرض ۹۰ سانتی‌متر به وزن ۲۵ کیلوگرم عرضه می‌شود.

فرایند تولید نومکس [۷]

نومکس از طریق واکنش تراکمی بین مونومرهای ام–فنیلندیامین m-phenylendiamine و ایزوفتالویل کلراید isophthaloyl chloride تولید می‌شود.

نومکس هم به شکل رشته فیبر و هم ورق عرضه می‌شود. از رشته‌های نومکس برای ساخت پارچه‌های مقاوم برابر حرارت و شعله استفاده می‌شود.

ورق نومکس در واقع نوعی کاغذ کلندر است و به روش مشابهی هم تولید می‌شود.

ورق نومکس تیپ ۴۱۰ اولین نوع از کاغذ نومکسی است که تولید شده و از نوع پرحجم این کاغذ به‌شمار می‌آید و بیشتر برای عایق‌سازی الکتریکی به‌کار می‌رود.

رشته فیبر نومکس در ایالات متحده آمریکا تولید می‌شود.

۴۸۱۵ شرکت ELANTAS [۷]

یکی از مهم‌ترین محصولات این شرکت ایتالیایی شار لاک بوده و نام تجاری این محصول، Elantas Elmotherm VA42 است.

شارلاک الانتاس ایتالیا Elantas Elmotherm VA42 وارنیش اشباع‌کننده تک‌کامپوننتی ساخت شرکت Elantas محصول ایتالیا است.

این محصول بر پایه رزین اصلاح آلکیدشده تخصصی ساخته‌شده است.
شارلاک الانتاس در مخزن نگهداری ثبات بالایی دارد و درجه حرارتی آن بین ۱۵۵ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است.
این محصول از پیونددهنده‌ای پلیمری، محتوای جامد و حلال تشکیل شده است.
شارلاک الانتاس ایتالیا با قابلیت پوششی بسیار عالی، ضد رطوبت، اسید و با درجه حرارتی بسیار بالا برای مصارف صنعتی ایدئال است.
شارلاک‌های مخصوص کمپرسورها غیر قابل‌حل شدن در روغن و گاز سیستم هستند.
این محصول برای شرایطی که چسبندگی با قدرت بالا و / یا مقاومت بالا برابر رطوبت و مواد شیمیایی موردنیاز است، کاربرد دارد.
این محصول با استاندارد UE e2002/95/CE RoHS/۶۵/۲۰۱۱ مطابقت دارد.
سیم اشباع‌شده با شارلاک الانتاس ویژگی‌های مکانیکی و دی‌الکتریکی فوق‌العاده‌ای حتی در دمای بالا نشان می‌دهد.
سیم‌پیچ‌هایی که با رزین الانتاس الموترم VA42 پوشانده می‌شوند قدرت پیوستگی بالایی پیدا می‌کنند.
افزون‌براین، مواد با پوشش رزین الانتاس به مقاومت خوبی در برابر مواد شیمیایی مایع و بخارات آن دست می‌یابند.
از رزین الموترم الانتاس می‌توان در ماشین‌های الکتریکی در دمای بین ۱۳۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کرد.
این رزین قابلیت خشک‌شوندگی سریع و به‌صورت هواخشک و کوره‌ای را داراست.
شارلاک الانتاس VA42 با ویسکوزیته نسبتاً پایین تولید می‌شود. ویسکوزیته این رزین در درمای ۲۵ درجه ۱۶۰ تا ۲۰۰ ثانیه است (محاسبه‌شده با ظرف ویسکوزیته فورد 4-cup).

شرکت Von Roll Holding AG

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای عایق هادی‌ها

نوارهای میکای شرکت وانرول برای عایق هادی‌های ماشین‌های الکتریکی فشارقوی بزرگ با نام samicafilm معروف هستند. این محصول از کاغذ میکای اشباع‌شده با اپوکسی رزین بهبودیافته تشکیل شده و همچنین با یک یا دو لایه نوار پشتیبان پلی‌استر، با یا بدون پوشش چسبنده، تقویت شده است. جدول مشخصات و همچنین تصویر انواع samicafilm در ادامه ارائه شده است. این محصول مقاومت عالی در برابر کرونا داشته و همچنین بسیار نازک است [۸].

جدول ۵-۷- مشخصات انواع samicafilm [۸]

Samicafilm® type	Thickness mm	Weight g/m² Total	Mica	PET Film 1	PET Film 2	Resin	Breakdown voltage kV	Adhesive
315.11-01	0.06	72	30	32		10	≥ 5	No
315.12-01	0.07	93	50	32		11	≥ 5	No
315.70-01	0.075	101	50	42		9	≥ 8	No
315.14	0.09	131	75	42		14	≥ 8	No
315.15-01	0.09	131	75	42		14	≥ 8	No
315.11-11	0.06	76	30	32		14	≥ 5	Yes
315.12-11	0.07	97	50	32		15	≥ 5	Yes
315.15-11	0.09	135	75	42		18	≥ 8	Yes
315.72-01	0.085	124	65	32	17	10	≥ 8	No
315.23-01	0.09	112	50	32	17	13	≥ 8	No
315.25-03	0.1	141	75	42	8	16	≥ 8	No
315.72-21	0.09	133	65	32	17	19	≥ 8	1 side
315.23-11	0.09	126	50	32	17	27	≥ 8	2 sides
315.25-11	0.11	151	75	32	17	27	≥ 8	2 sides

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۵-۱۱ -تصویر انواع **samicafilm** [۸]

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی

محصولات با نام تجاری samicapor و samicatherm، از شرکت وانرول که از نوارهای VPI میکا برای عایق بدنه و عایق انتهایی سیم‌پیچی ارائه شده‌اند. در ادامه جدول مشخصات samicapor و samicatherm و تصویر آنها ارائه شده است.

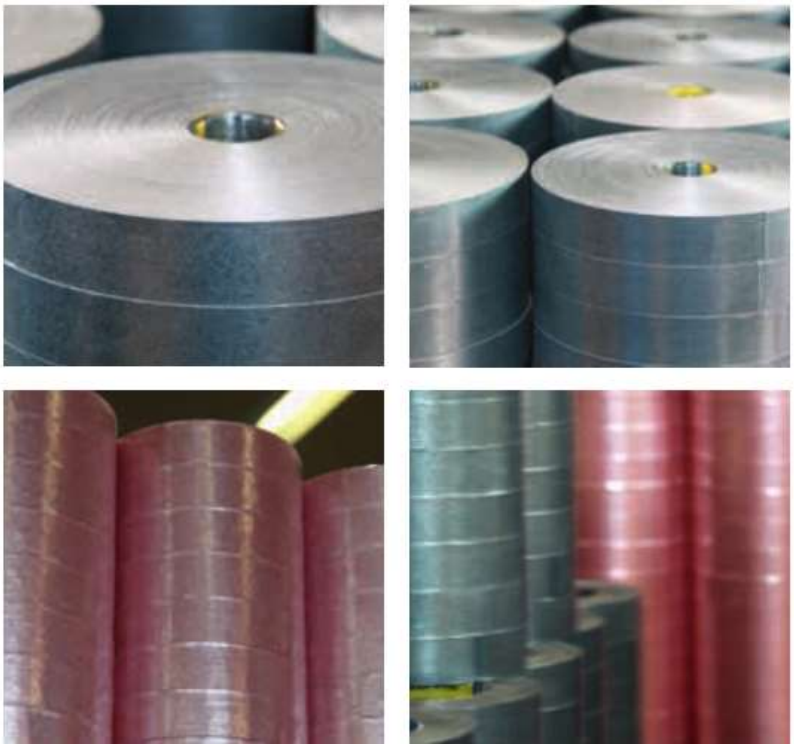
از مزایای نوارهای samicapor و samicatherm، موارد زیر ذکر شده است [۹]:

استقامت عایقی بالا
مقاوم در برابر تخلیه‌ی کرونا
اشباع سریع و آسان
قابل‌کاربرد با ماشین یا به‌صورت دستی
قابل‌کاربرد با نرمی و بدون چین خوردن
دارای تطابق کامل با یک سیستم از قبل استفاده‌شده
زمان کوتاه موردنیاز برای برش

جدول ۵-۸ مشخصات **samicapor** [۹]

Product name	Rated voltage <6 kV	Rated voltage 6 – 13.8 kV	Rated voltage >13.8 kV	Thickness mm	Weight g/m² Total	Weight g/m² Mica	Composition	Composition Non-accelerated epoxy/ anhydride	Accelerated epoxy VPI system
Samicapor® 366.55-20	•	•	•	0.15	200	160	Mica/Glass	Yes	No
Samicapor® 366.55-30	•	•	•	0.15	200	160	Mica/Glass	Yes	No
Samicapor® 366.58	•	•	•	0.15	195	160	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® 366.58-18	•	•	•	0.15	213	180	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® 366.58-20	•	•	•	0.17	224	180	Mica/Glass	No	Yes
Samicapor® HTC 381.55-20	•	•	•	0.20	259	160	Mica/Glass	Yes	No

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۵-۱۲- تصویر samicapor [۹]

جدول ۵-۹- جدول مشخصات samicatherm [۹]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

Product name	Rated voltage			Thickness mm	Weight g/m²		Description
	<6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV		Total	Mica	
Samicatherm® 366.28/366.28-02	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with/without interleaving foil
Samicatherm® 366.28-04/366.28-03	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with/without interleaving foil, slightly dryer
Samicatherm® 366.28-05	•	•		0.19	265	120	Mica/Glass with embossed interleaving foil, slightly dryer
Samicatherm® 366.28-06	•	•		0.20	277	120	Mica/Glass without interleaving foil, slightly higher resin content
Samicatherm® 366.33-62	•	•	•	0.25	350	180	Mica/Glass without interleaving foil
Samicatherm® LR 366.29-24		•	•	0.22	380	240	Mica/Glass without interleaving foil
Samicatherm® P 315.20/315.20-02	•			0.16	252	150	Mica/PET film with/without interleaving foil
Samicatherm® P 315.20-10	•			0.17	270	150	Mica/PET film without interleaving foil
Samicatherm® PI 315.51	•			0.09	117	60	Mica/Polyimide film, class H

Product name	Thickness mm	Weight g/m²		Description
		Total	Mica	
Samicatherm® V 374.29	0.22	368	150	Glass/Mica/Polyester fleece tape
Samicatherm® V 374.30	0.21	173	60	Glass/Mica/Polyester fleece tape



شکل ۵-۱۳-تصویر samicatherm [۱۰]

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای حفاظت از کرونا

محصول با نام تجاری coronashield برای حفاظت از کرونا ساخته شده است. این نوارها می‌توانند از برای حفاظت از کرونا در داخل شیار یا خارج از شیار مورداستفاده قرار بگیرند. جدول مشخصات و تصویر محصول coronashield در ادامه ارائه شده‌اند [۹].

جدول ۵-۱۰- مشخصات انواع coronashield [۹]

Product name	Thickness mm	Resistivity Ohm/m²	Description
CoronaShield® 215.51	0.10	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, not compatible with epoxy anhydride, cured
CoronaShield® 215.55	0.085	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 215.63	0.17	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 217.01/217.21	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.02/217.22	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.24	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.04	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.31	0.25	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, cured



شکل ۵-۱۴- تصویر انواع coronashield [۱۰]

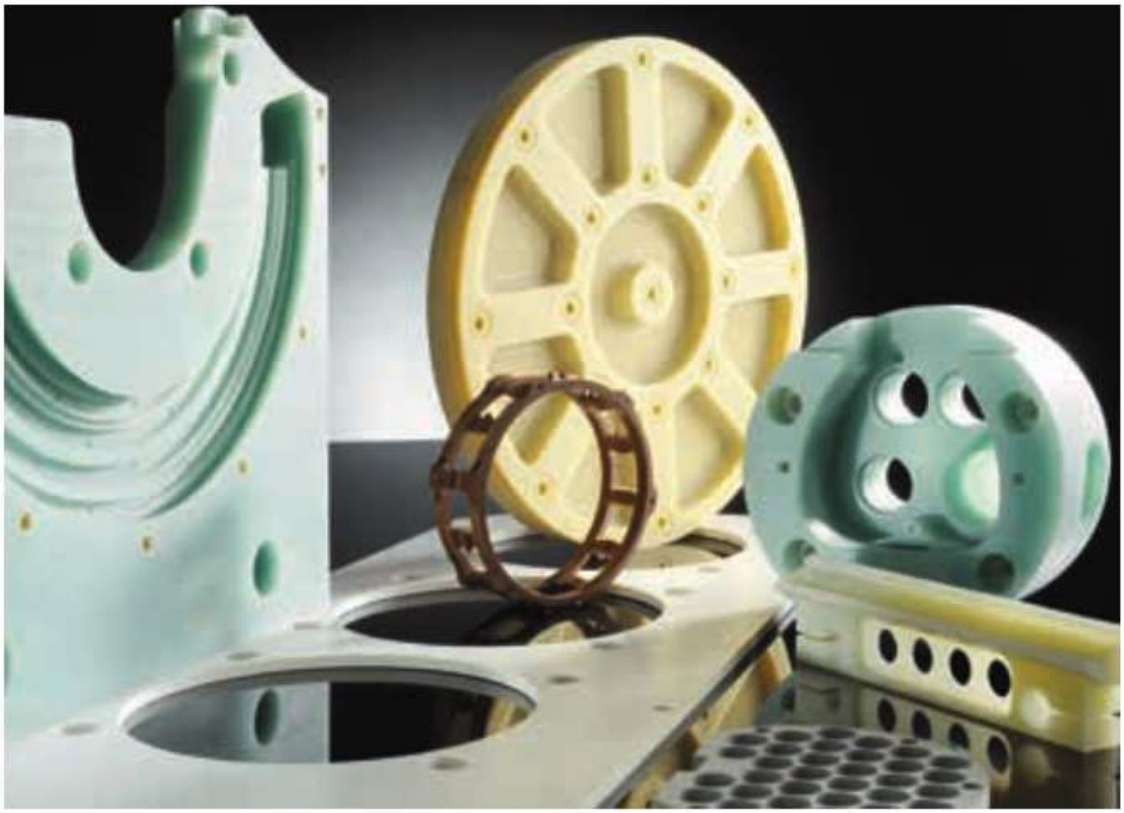
DOI: 10.30503/nripress.2020.164

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای اجزای روتور

جدول مشخصات و تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور در ادامه ارائه شده‌اند [۹].

جدول ۵-۱۱- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۹]

Product name	Form	Rated voltage			Slot insulation	Pole face packing	End-winding packing	Slot bottom packers	Bottom packers	Slot top packers	Interturn insulation
		< 6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV							
Vetronite® 64170/G11	U or L profile, machined components, strips, rolls or full-size sheet	•	•	•	•	•		•		•	•
Vetronite® 69020/64480	Machined parts, rolls or strips	•	•	•					•	•	•
Delmat® 68660	Machined components	•	•	•		•	•				
Delbond® 54000	Machined parts, rolls or strips	•	•	•							•
Polyfibrite® 63020	Machined components and strips	•	•	•			•	•			



شکل ۵-۱۵- تصویر محصولات شرکت وانرول برای اجزای روتور [۹]

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای اجزای استاتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

جدول مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور در ادامه ارائه شده‌اند [۹].

جدول ۵-۱۲- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای اجزای استاتور [۹]

Product name	Form	Rated voltage			Top slot wedging	End caps	Slot wedges	Support brackets
		<6 kV	6–13.8 kV	>13.8 kV				
Vetronite® 64170/G11	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Conductive Vetronite® 432.10	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Delmat® 68660	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	•
Delmat® 68420	Machined parts or full-size sheet	•	•	•			•	
Conductive and nonconductive ripple springs	Strips or full size-sheets	•	•	•	•		•	
Vetroferrite® 432.20/432.21	Molded parts	•	•	•		•		

محصولات شرکت وانرول (vonroll) برای نوارهای تمام‌کننده

جدول مشخصات و تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده در ادامه ارائه شده‌اند. استفاده از این نوارها برای حفاظت عایق بدنه‌ی تجهیز در ناحیه‌ی پیشانی انتهایی در برابر موارد زیر به شدت توصیه می‌شود [۸].

جدول ۵-۱۳- مشخصات محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۸]

Product name	Thickness mm	Description
Epoflex 215.01	0.19	Polyester fleece with epoxy resin, not cured
Epoflex 219.61-10	0.18	Polyester glass fabric with with epoxy resin, not cured
Epoflex 324.03	0.09	Polyester glass fabric with a polyester film and reduced binder quantity, cured



شکل ۵-۱۶ - تصویر محصولات شرکت وانرول برای نوارهای تمام‌کننده [۸]

۵.۱.۶.۸ شرکت ELINAR [۱۰]

شرکت الینار در سال ۱۸۷۹ میلادی توسط وزارت برق اتحادیه جماهیر شوروی با نام تجاری Novaya Zhizn (زندگی تازه) تأسیس و فعالیت خود را با تولید انبوه کاغذ سلولز آغاز کرد. این شرکت در سال ۱۹۵۹ ساخت عایق‌های الکتریکی بر پایه میکا را آغاز و هم‌اکنون با گذشت بیش از ۵۳ سال سابقه تولید عایق‌های الکتریکی، بزرگ‌ترین سازنده در کشورهای CIS و یکی از معتبرترین تولیدکنندگان در سطح جهان به‌شمار می‌آید.

شرکت الینار به همراه هفت شرکت تابعه خود و با برخورداری از حدود ۳۰۰۰ نیروی کار علاوه بر تولید عایق‌های الکتریکی، مواد دیگری از قبیل مواد ضد حریق، مواد پلاستیکی، فیلم‌های پلیمری، و ... نیز تولید می‌کند. هم‌اکنون گروه الینار با تولید بیش از صد نوع عایق الکتریکی موردمصرف در تجهیزاتی از جمله انواع موتورها، ژنراتورها و کابل‌ها دارای بیش از ۲۰۰۰ مشتری تنها در میان کشورهای CIS است.

گروه الینار با برخورداری از تأییدیه‌های کیفیت بین‌المللی، یکی از اعضای اصلی مؤسسه‌های معتبر و شناخته‌شده جهانی از جمله EEIM (گروه سازندگان عایق‌های الکتریکی اروپا) و Interelectromash (گروه بین‌الملل سازندگان تجهیزات ماشین‌های الکتریکی) است.

۵.۱.۷.۸ شرکت COGEBI [۱۱]

کارخانه کوجبی در سال ۱۹۲۹ به‌منظور تولید عایق ماشین‌های الکتریکی در کشور بلژیک تأسیس شد. نام تجاری COGEBI از حروف اول عنوان «شرکت عایق بلژیک» برگرفته شده است. درحال‌حاضر شرکت کوجبی علاوه بر کارخانه اصلی در کشور بلژیک، دارای پنج شعبه اصلی در کشورهای جمهوری چک، آمریکا، مالزی و چین (شانگهای و هنگ کنگ) است. گروه کوجبی با برخورداری از شبکه فروش گسترده در سطح جهان و حدود ۳۷۵ نفر نیروی کار مجرب، یکی از معتبرترین و بزرگ‌ترین سازندگان عایق‌های الکتریکی، مکانیکی و حرارتی بر پایه میکا شناخته شده است.

محصولات اصلی گروه کوجبی، نوارهای عایق الکتریکی مبتنی بر میکا موردمصرف در صنعت برق از جمله در موتورها، ژنراتورها و کابل و همچنین عایق‌های حرارتی موردمصرف در لوازم خانگی و عایق‌های مکانیکی- حرارتی مورداستفاده در صنایع خودروسازی است.

تقریباً تمام محصولات شرکت کوجبی به کشورهای اروپایی، آسیایی و آمریکایی صادر می‌شود. سهم کشورهای اروپایی حدود ۷۵٪ از کل محصولات و ۲۵٪ مابقی نیز عمدتاً به کشورهای آسیایی و آمریکایی صادر می‌شود که در میان مشتریان بزرگ کوجبی در صنعت برق می‌توان به سازندگان معتبری از جمله Nexans، ABB، Siemens و Areva اشاره کرد.

شرکت کوجبی از سال ۲۰۰۷ به عضویت گروه بزرگ الینار درآمد و هم‌اکنون با توسعه فعالیت‌ها به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های اصلی الینار قادر به ارائه محصولات و خدمات گسترده‌تری است.

۵ ۱ ۹ سازندگان و تولیدکنندگان داخلی مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی

سیم لاکی، به نوعی سیم مسی گفته می‌شود که پوششی از جنس رزین‌های مخصوص (لاک) با مقاومت حرارتی نسبتاً بالا روی آن اعمال شده است و با قطرهای مختلف ساخته می‌شود. از این سیم‌ها در ساخت سیم‌پیچ‌های القایی ترانسفورمرها، الکتروموتورها، ژنراتورها و موارد دیگر استفاده می‌کنند. اگر بگوییم شریان حیاتی صنایع امروز را سیم لاکی تشکیل می‌دهد، سخنی گزاف نگفته‌ایم؛ چرا که امروزه کمتر محصول صنعتی را می‌توان یافت که در آن از سیم لاکی اثری نباشد. بدین‌ترتیب از کوچک‌ترین لوازم خانگی گرفته تا پیچیده‌ترین ابزار و ادوات صنعتی، وابستگی اجتناب‌ناپذیر و گسترده‌ای به سیم لاکی دارند.

درحال‌حاضر فضای کسب و کار در عرصه این صنعت به‌شدت رقابتی است و محاسبات صورت‌گرفته، حداقل توان تولیدی کشور را ۳۵۰۰۰ تن نشان می‌دهد [۱۲].

هم‌اکنون این تعداد به ۱۷ واحد تولیدی می‌رسد، که همگی دارای مالکیت خصوصی بوده و مجموعاً دارای ظرفیت اسمی حدود ۴۱۳۰۰ تن در سال هستند و به‌طور متوسط با ظرفیت عملی حدود ۴/۶۷ درصد ظرفیت اسمی خود کار می‌کنند. البته شایان ذکر است که با همین میزان تولید نیز نیاز بازار داخلی کاملاً مرتفع می‌شود [۱۲].

مایه‌ی خوشحالی است که امروزه شرکت‌های تولیدی متعددی در ایران توانایی تولید انواع سیم لاکی را با کیفیت های بالا و مرغوب دارند که این ظرفیت موجب شده است با وجود تولیدات کشورهای دیگر، بخش وسیعی از نیاز داخلی به این نوع سیم توسط تولیدکنندگان خودمان در کشور تأمین شود.

در ادامه چند نمونه از شرکت‌های بزرگ تولیدکننده‌ی سیم لاکی معرفی شده‌اند.

۵ ۱ ۹ ۱ پایش [۱۲]

کارخانه پایش در سال ۱۳۴۷ به‌عنوان اولین کارخانه تولید سیم لاکی در ایران توسط برادران تهرانچی تأسیس شد. با توجه به سابقه هیئت مؤسس در تجارت ابزار صنعتی و سیم لاکی، خط تولید سیم لاکی برای اولین بار در ایران و با کمک فنی شرکت فیلیپس هلند راه‌اندازی شد.

کیفیت پایش همواره در رده ممتاز و قابل‌رقابت با برترین محصولات اروپایی تا به امروز قرار داشته است.

امروزه نیز، شرکت پایش، با داشتن بهترین فاکتورها از جمله نیم قرن تجربه، بهره‌گیری از بهترین مواد اولیه و ممارست در بهبود فرایند تولید، ضمن افزایش تنوع محصولات خود، افتخار دارد که همچنان به کیفیت برتر در صنعت سیم لاکی ایران شناخته می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۵-۱۷- سیم‌لاکی پایش

سیم‌لاکی مرکزی [۱۲]

شرکت سیم لاکی مرکزی در سال ۱۳۶۸ واقع در شهرستان بروجرد از توابع استان لرستان تأسیس شد. فاز اول شرکت سیم لاکی مرکزی در سال ۱۳۷۴ با ظرفیت اسمی ۲ هزار تن در سال به بهره‌برداری رسید که با اجرای طرح توسعه فاز دوم آن با ظرفیت اسمی سالانه ۱۵۰۰ تن در اواسط سال ۱۳۷۸، ظرفیت تولید کارخانه به ۳۵۰۰ تن در سال افزایش یافت.

شرکت سیم لاکی مرکزی با به‌کارگیری ماشین‌آلات مدرن کامپیوتری اروپایی و با استفاده از سیستم PLC و دستگاه‌های تست و اندازه‌گیری و کنترل کیفی در طول خطوط تولید، امکان کنترل کیفی محصولات را به‌طور مستمر فراهم می‌کند. به‌کارگیری مواد اولیه مرغوب شامل (مفتول مس سرچشمه کرمان)، لاک‌های اروپایی، کادر مجرب و ماهر امکان تولید محصولات را مطابق با استانداردهای بین‌المللی فراهم آورده است.

سیم‌لاکی کویر یزد [۱۲]

شرکت سیم لاکی کویر در سال ۱۳۷۲ در شهرک صنعتی نیکو اشکذر استان یزد احداث و در سال ۱۳۷۳ موفق به کسب پروانه بهره‌برداری با ظرفیت ۲۰۰۰ تن در سال شد. نخستین گام‌های موفقیت را توانست در سال ۱۳۷۶ آن هم با افزایش ظرفیت تولید به ۲۵۰۰ تن در سال، بردارد. و اکنون با ظرفیت تولیدی ۴۵۰۰ تن در سال، همگام با سایر تولیدکنندگان در این صنعت، سهم کوچکی در تولید سیم لاکی موردنیاز صنایع مصرفی ایران را دارد.

این شرکت تنها تولیدکننده انواع سیم‌های لاکی با گستره سایزی از ۰/۰۴۰ میلی‌متر الی ۴/۰۰ میلی‌متر است و با تأمین انواع سیم لاکی با گرید LI) تک لاک) LII)، دو لاک) تنوع محصول مورددرخواست مصرف‌کننده را فراهم آورده است. تولید سایزهای ریز خصوصاً سایزهای زیر ۰/۱۰ میلی‌متر با لاک پلی‌اورتان، از جمله چالش‌های پیش روی این صنعت تولیدی است که شرکت سیم لاکی کویر با بهره‌گیری از به روزترین ماشین‌آلات تمام‌اتوماتیک موفق به کسب جایگاهی مهم در این صنعت شده است. این شرکت سیاست‌های تولیدی خود را مطابق با نیاز بازار و سفارش مشتریان گرامی قرار داده و تولیدات خود را مطابق با استانداردهای داخلی ایران و بین‌المللی انجام می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۵-۱۸- شرکت سیم‌لاکی کویر

۵.۱.۴.۹ شرکت لاک سیم [۱۲]

شرکت تولیدی و صنعتی لاک سیم در راستای ایفای نقشی هر چند کوچک در رشد و شکوفایی صنعت کشور در دوران سازندگی، از بدو تأسیس در سال ۱۳۶۵ تاکنون، افزایش بهره‌وری صنعت ایران و قطع وابستگی صنایع داخلی به محصولات خارجی درزمینه‌ی سیم لاکی را هدف کار خود قرار داده است.

این شرکت با بهره‌مندی از پیشرفته‌ترین ماشین‌آلات تولید سیم لاکی، کامل‌ترین تجهیزات آزمایشگاهی، سیستم‌های مجهز کنترل در خط تولید و فناوری‌های جدید و همچنین با برخورداری از کادری متخصص و مجرب توانسته است با عرضه تولیداتی با کیفیت مرغوب، همواره در خدمت مصرف‌کنندگان سیم لاکی باشد. همواره مهم‌ترین اصل در تولید محصولات این شرکت، داشتن کیفیت مواد تولیدی است.



شکل ۵-۱۹- شرکت لاک سیم

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

راما سیم [۱۲]

تولیدات «راما سیم» از سال ۱۳۷۲ در ارومیه آغاز شده و متعاقباً از سال ۱۳۷۸ با توسعه شرکت صنایع راما پارسیان در شهرک صنعتی اشتهارد در زمینی به مساحت ۴۰۰۰۰ متر مربع ادامه یافت. شرکت صنایع راما پارسیان پیوسته با توسعه امکانات و ماشین‌آلات جدید و مدرن مطابق با آخرین تکنولوژی روز دنیا در راستای تأمین نیازمندی‌های مشتریان و تحویل به موقع سفارشات با بهترین کیفیت ممکن در جهت جلب رضایت روزافزون مشتریان محترم کوشا است.

محصولات شرکت راما پارسیان با نام تجارتی «راما سیم» شامل انواع سیم‌های سیم‌پیچی با سطح مقطع گرد و تخت، از جمله سیم‌های لاکی و سیم‌های ایزوله‌پیچی کاغذی در محدوده وسیعی که بخش اعظم نیازهای داخلی کشور را برآورده می‌سازد، تولید می‌گردد و دستیابی به استانداردهای محصول مطابق استانداردهای ملی و بین‌المللی، در اولویت برنامه‌های آن قرار گرفته و در این زمینه به موفقیت دست یافته است.

صنایع سیم‌لاکی کاشان [۱۲]

سرلوحه اهداف مجموعه صنایع سیم لاکی کاشان، ارائه محصولی با کیفیت فراتر از استانداردهای موجود و در جهت تأمین نیازهای مشتری است. بنابراین این مجموعه سعی کرده با بهره‌گیری از تجربه کارشناسان کارآمد، محصولی به بازار عرضه کند که کیفیت بالای آن، تبلیغ آن محصول و گویای ارزش‌های خویش باشد.

از مشخصات ویژه‌ی محصولات سیم لاکی کاشان می توان به مقاوم بودن در برابر سایش، بسیار مقاوم در برابر حلال، مقاوم در برابر رطوبت و مقاومت بالا در برابر روغن ترانسفورمرها نام برد.



شکل ۵-۲۰- شرکت صنایع سیم‌لاکی کاشان

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۵ ۹ ۱ ۷ سیم لاکی فارس [۱۲]

سیم لاکی فارس که در بخش‌های مختلف صنعت و تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی مورداستفاده قرار می‌گیرد، از سیم‌های مهم و کاربردی در صنعت به‌شمار می‌رود. سیم‌های لاکی را با مشخصه‌هایی از جمله قطر سیم، نوع لاک، کلاس حرارتی و درجه لاک می‌شناسند.

کارخانه سیم لاکی فارس از برترین کارخانجات ایرانی درزمینه‌ی تولید انواع سیم لاکی به‌شمار می‌رود. و سیم لاکی تولیدشده در کارخانه‌ی سیم لاکی فارس از کیفیت بالایی برخوردار است.



شکل ۵-۲۱- سیم‌لاکی فارس

۵ ۹ ۱ ۸ زاگرس‌سیم [۱۲]

زاگرس‌سیم، یکی از برندهای معروف در عرصه تولید سیم لاکی است که با توجه به کیفیت و تنوع محصول توانسته در بازار ایران نام خوبی بر سر زبان‌ها بیاورد. انواع سیم لاکی گرد از سایز ۰/۰۵ الی ۵/۲۰ میلی‌متر طبق جداول استاندارد و زیر نظر سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی و استاندارد جهانی IEC و DIN در این شرکت بزرگ تولید می‌شود.

۵ ۹ ۱ ۹ الکتروسیم [۱۲]

شرکت الکتروسیم فعالیت تولیدی خود را از سال ۱۳۷۰ هجری خورشیدی آغاز کرده است، که واحد تولیدی این شرکت در میبد استان یزد قرار دارد.

شرکت الکتروسیم تولیدکننده سیم لاکی گرد مسی در قطرهای متنوع است. همچنین تولیدکننده سیم لاکی در رنج ۵/۲، ۱۵/۰ میلی‌متر است. محصولات این شرکت دارای مهر استاندارد بوده و علاوه بر آن دارای گواهینامه بین‌المللی ISO 9001: 2000 و دارای نشان کیفیت IQNet نیز هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

فصل ششم: شناسایی کاربران عمده مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی در کارخانجات داخلی و شناسایی حجم بازار داخلی

۱۶ شرکت موتوژن [۱۳]-[۱۴]

شرکت موتوژن برای تولید موتورهای کولری تحت لیسانس وستینگهاوس در سال ۱۳۵۲ کار خود را شروع کرده است و درحال‌حاضر ۹۰٪ نیاز موتورهای مورداستفاده در کولرها را در داخل کشور تأمین می‌کند.

محمد موسمی مدیر مهندسی شرکت موتوژن، طی گفت‌وگو با نگارنده، با بیان اینکه رقابت با چین برای تولیدکنندگان داخلی سخت است، اظهار داشت: توسعه چرخه تولید الکتروموتور و افزایش تولید انواع این موتورها با توجه به قیمت پایین‌تر الکتروموتورهای واردتی چینی به‌صرفه به‌نظر نمی‌رسد، قیمت این محصولات وارداتی نسبت به هزینه ساخت همان موتور در داخل کشور بسیار کم‌تر است.

وی افزود: با توجه به مشکلات کلی که در بحث واردات وجود دارد که گریبان‌گیر واردات الکتروموتورهای خارجی نیز هست، ممکن است که در آینده الکتروموتورسازان ایرانی به فکر توسعه محصولات خود باشند، به‌عنوان مثال به سمت تولید موتور با راندمان بالا بروند، یعنی موتورهایی تولید کنند که گرید انرژی بالاتری دارند و انرژی کمتری مصرف می‌کنند اما با توجه به شرایط اقتصادی، معضلات و بحران‌هایی که در بخش صنعت به‌وجود آمده است و همچنین نوساناتی که در بازار ارز وجود دارد، آینده‌ی صنعت الکتروموتورسازی به دلایل گفته‌شده و مشکلات به‌وجودآمده در بحث وارادات قطعات صنعتی، روشن نیست.

مدیر مهندسی شرکت موتوژن با بیان اینکه این شرکت تولیدکننده موتورهای کولری و صنعتی است بیان کرد: موتورهای کولری همان موتورهای استفاده‌شده در ساخت کولر آبی است. از موتورهای صنعتی نیز در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در شرکت موتوژن، موتورهای صنعتی با قدرت ۰/۱ تا ۶۳۰ کیلووات تولید می‌شوند. در ایران تکنولوژی ساخت موتورهای با ولتاژ مختلف وجود دارد، موتوژن موتورهای LV تولید می‌کند، یعنی موتورهای با ولتاژ کم، البته تکنولوژی ساخت موتورهای MV و HV یعنی موتورهای با ولتاژ متوسط و بالا نیز در کشور وجود دارد اما شرکت‌های دیگری در این زمینه فعالیت می‌کنند.

ایشان بیان داشتند: موتورهای الکتریکی انواع مخلتفی دارند، وقتی می‌گوییم موتور الکتریکی این واژه ظریف‌ترین موتور مصرفی در دستگاه‌های کوچک تا موتورهای بزرگ صنعتی را شامل می‌شود. تولیدکنندگان داخلی نزدیک به ۱۰ درصد الکتروموتورهای موردنیاز کشور را تولید می‌کنند. چون الکتروموتورها بسیار متنوع هستند، باقی الکتروموتورهای مصرفی کشور از طریق واردات تأمین می‌شوند.

بزرگ‌ترین موتوری که در شرکت موتوژن تولید می‌شود موتور با توان ۶۳۰ کیلوولت است که در صنایع سنگینی همچون صنایع پتروشیمی مصرف می‌شود.

مدیر مهندسی شرکت موتوژن با بیان اینکه الکتروموتور در همه جا مصرف می‌شود، گفت: عمده تولید الکتروموتور در کشور را سه شرکت تولید می‌کنند، البته شرکت‌های کوچکی نیز هستند که تولیدات محدود دارند. اما تأثیر آنچنانی بر میزان تولید ندارند و تقریباً می‌توان گفت چرخه تولید الکتروموتور توسط سه شرکت می‌چرخد.

در ساخت الکتروموتور از عایق مایلر و نومکس یا به اصطلاح همان عایق کاغذی سه‌لایه استفاده می‌شود. در کشور این عایق‌ها تولید نمی‌شود و تمامی عایق‌های کاغذی مصرفی الکتروموتور در کشور وارداتی است، این لایه‌ها فاصله بین سیم و فلز را عایق می‌کند. اما شار لاک در گونه‌های مختلف تولید داخلی دارد.

مدیر مهندسی شرکت موتوژن تأکید کردند: در موتورهای LV از سیم‌لاکی با سطح مقطع گرد استفاده می‌شود، هادی این سیم‌ها نیز مس است، البته اخیراً به دلیل ارزان‌تر بودن قیمت آلومینیوم، از سیم‌لاکی آلومینیوم نیز در ساخت این موتورها استفاده می‌شود. سیم‌لاکی‌هایی با سطح مقطع تخت در ساخت موتورهای MV و HV مورداستفاده قرار می‌گیرد. موتورهای بزرگ حتماً باید با هادی مس ساخته شوند.

۱۰۰درصد سیم‌لاکی مصرفی در ساخت الکتروموتور از منابع داخلی تأمین می‌شود، شرکت موتوژن، جز هسته سیلیکونی، بلبرینگ و عایق، باقی اجزای تشکیل‌دهنده موتور را از منابع داخل کشور تأمین می‌کند.

ایشان با بیان اینکه تمامی صنایع بر یکدیگر تأثیرگذار هستند، عنوان کردند: افزایش قیمت سیم‌لاکی تأثیر مستقیم بر قیمت الکتروموتور می‌گذارد. یا زمانی که تأمین مواد اولیه برای تولیدکنندگان سیم‌لاکی مشکل می‌شود آنها نمی‌توانند محصول نهایی خود را با قیمت مناسب عرضه کنند. باتوجه به اینکه خرید سیم‌لاکی از داخل کشور به‌صرفه است نیازی به وارد کردن این محصول نیست.

۶ ۲ شرکت جمکو [۱۵]-[۱۶]

شرکت ماشین‌های الکتریکی جوین (جمکو) از شرکت‌های تحت پوشش سازمان اقتصادی کوثر است که درزمینه‌ی تولید انواع ماشین‌های الکتریکی فعالیت می‌کند.

اسماعیل فرجام فر مدیر برنامه‌ریزی و تولید شرکت جمکو در گفت‌وگو با نگارنده، اظهار داشت: این شرکت توان ساخت الکتروموتورهای LV (ولتاژپایین)، MV (ولتاژمتوسط) و HV (ولتاژبالا) را دارد. شرکت جمکو درحال‌حاضر قادر به ساخت الکتروموتورهای ۵/۵ تا ۴۵۰ کیلووات در دو تیپ YU و YD با پوسته چدنی است. همچنین با داشتن واحد تحقیق و توسعه و واحد مهندسی کاردان، فناوری لازم جهت تولید الکتروموتورهای خاص را دارد.

وی با عنوان اینکه الکتروموتور در صنایع مختلفی مانند نفت و گاز، فولاد، پتروشیمی سیمان و انتقال آب استفاده می‌شود، بیان کرد: به‌طورکلی از الکتروموتور در صنایع مادر استفاده می‌شود.

ایشان عنوان کردند: ما توان ساخت هرگونه الکتروموتوری را داریم، مجموعه ما تا امروز هر الکتروموتوری را که مشتری سفارش داده، تولید کرده است. مجموعه ما درحال‌حاضر موتور ۶/۶ مگاواتی را تولید کرده است، همچنین دانش و توان ساخت الکتروموتور تا توان ۱۰ مگاوات در دو حالت روتور سیم‌پیچی و روتور قفس‌سنجابی را با آی‌پی‌های مختلف داریم و با توجه به راه‌اندازی آزمایشگاه تست الکتروموتوهای ضدانفجار به تولیدکنندگان این صنعت در دنیا نیز اضافه شدیم.

ایشان با بیان اینکه هنوز مشتری‌های ایرانی به الکتروموتورهای ساخت داخلی اعتماد ندارند، عنوان کردند: بازار مصرف الکتروموتورها در ایران بسیار مناسب است، اما تولیدکنندگان داخلی سهمی کمتر از ۲۰ درصد از این بازار را به خود اختصاص داده‌اند و مابقی الکتروموتورها از برخی کشورهای اروپایی (آلمان– فرانسه و..) وارد بازار ایران می‌شود. اما بیشترین سهم از بازار الکتروموتور ایران را کشور چین به دلیل قیمت پایین محصولات در اختیار دارد.

مدیر برنامه‌ریزی و تولید شرکت جمکو با بیان اینکه تقاضای الکتروموتور در ایران زیاد است، گفت: در ایران عمده الکتروموتورهای مصرفی در صنایع مختلف را سه شرکت بزرگ و صاحب نام می‌سازند، اگر نیاز کشور بخواهد تماماً از منابع داخلی تأمین شود، باید دولت به این صنعت کمک و شرایط مناسبی را برای آنها فراهم کند.

مدیر برنامه‌ریزی و تولید شرکت جمکو با بیان اینکه این شرکت با داشتن دو واحد تست فشارقوی و فشارضعیف منحصربه‌فرد در منطقه توانسته الکتروموتور با کیفیت و استاندارد جهانی تولید کند و تأیید استاندارد کشورهای اروپایی را اخذ کند. گفت: عمده مواد اولیه برای ساخت الکتروموتور ورق سیلیکون، فولاد، بلبرینگ، مواد عایقی، سیم و شمش مسی است که فولاد، سیم لاکی و شمش مسی از داخل کشور و مابقی وارداتی هستند.

ایشان عنوان داشتند که در الکتروموتورهای ۵/۵ تا ۴۵۰ کیلووات از سیم‌لاکی مسی ساخته می‌شوند، و در الکتروموتورهای فشارقوی از شمش مسی استفاده می‌شود.

و در پایان گفتگو اضافه نمودند: استاندارد سیم‌لاکی در کیفیت الکتروموتور بسیار مهم است، ما با یکی از شرکت‌های داخلی که سیم‌لاکی تولید می‌کند، همکاری می‌کنیم. این واحد تولیدی بر اساس استاندارد موردنظر ما خط تولید خود را تغییر داد. با توجه به کیفیت سیم‌لاکی‌های تولیدشده در کشور ما هیچ مشکلی برای تأمین سیم مسی نداریم.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۶ ۳ الکتروژن [۱۷]

مجموعه صنعتی الکتروژن ازجمله بزرگ‌ترین تولیدکنندگان الکتروموتور در خاورمیانه است که با داشتن کادری مجرب و باتجربه و خط‌های تولید اتوماتیک و نیمه‌اتوماتیک دارای ظرفیت کافی برای تأمین و تولید انواع الکتروموتور و انواع پمپ آب موردنیاز صنایع مختلف است.

این مجموعه در سال ۱۳۶۷ دایر شد و در سال ۱۳۸۰ با تغییر کارخانه به محل جدید به فعالیت خود ادامه داد، شرکت الکتروژن با دارا بودن خطوط تولید اتوماتیک و همچنین داشتن واحدهای قالب‌سازی منحصربه‌فرد در ایران قادر به تولید دقیق‌ترین و پیچیده‌ترین قالب و ابزارهای خط تولید است.

این مجموعه با دریافت لیسانس از شرکت Hanning آلمان، Sole و Sisme ایتالیا در سال ۲۰۰۹ و ۱۹۹۶ میلادی به موفقیت‌های روزافزون دست پیدا کرد و این امر موجب شد تا الکتروموتور ماشین لباسشویی، فن‌کوئل و مشعل خود را تحت لیسانس این شرکت‌ها تولید کند.

همچنین توانسته به جایگاه خوبی در بازارهای داخلی و خارجی دست پیدا کند. شرکت الکتروژن با تولید اولین تولیدکننده الکتروموتورهای راندمان بالا، فصلی نو در فناوری صنعت الکتروموتورسازی کشور به‌وجود آورد.

شرکت الکتروژن با دریافت گواهینامه ISO9001-2008 موفق شد تا همه فرایندهای خود را به شکل مؤثر پالایش و کنترل کند. این نکته شایسته یادآوری هست که همه محصولات شرکت الکتروژن دارای نشان استاندارد CE از اتحادیه اروپا است. این استاندارد برای ایجاد هماهنگی اجباری در بسیاری از محصولات تجاری و صنعتی در سطح اروپا تولید با ارائه‌شده است. نمی‌توان گفت که حروف C و E به‌اختصار کلمه خاصی هستند اما می‌توان آنها را به‌طورکلی به‌اختصار کلمات فرانسوی Communauté Européenne و یا Conformité Européenne به معنی موردقبول اروپا دانست. محصولاتی که این استاندارد را دریافت می‌کنند باید ازنظر امنیت، مضر نبودن برای جسم انسان، سلامت و طبیعت موردبررسی قرار گیرند و اگر این شرایط را دارا نباشند قادر به دریافت این استاندارد نخواهند بود.

محصولات شرکت الکتروژن:

- الکتروموتور کولری
- پمپ آب کولری
- الکتروموتور فن
- موتور فن کوئل
- الکتروموتور کولری پرتابل
- الکتروموتور هود
- الکتروموتور آسانسور
- الکتروموتور دربازکن
- الکتروموتور مشعل
- پمپ آب خانگی
- الکتروموتور
- پمپ کف‌کش

۴ ۶ جایگزینی الکتروموتور زیمنس توسط شرکت‌های داخلی [۱۸]

استفاده از الکتروموتور کامپکت زیمنس برای جاهایی که فضای کم بسیار مهم است استفاده می‌شود. در حقیقت با فریم کوچک‌تر، توان بالاتری را خواهید داشت. الکتروموتور کامپکت زیمنس علاوه بر فریم سایز کوچک‌تر، می‌تواند در راندمان‌های IE1, IE2 و IE3 هم تولید شود که هزینه بهره‌برداری کاهش یابد.

الکتروموتور زیمنس در بازار ایران بسیار مشهور است و بسیاری از کارخانجات از این الکتروموتور به‌عنوان یک برند مطمئن یاد می‌کنند. در ایران نیز انواع الکتروموتور ایرانی وجود دارد. الکتروموتور الکتروژن با پوسته‌ی مشابه با دینام زیمنس امروزه جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. الکتروموتور الکتروژن با توان‌های ۲,۲ کیلووات به بالا IP55 است و بسیار شبیه به الکتروموتور زیمنس ساخته شده است.

در ایران دو نشان تجاری الکتروموتور موتوژن تبریز و الکتروموتور الکتروژن در توان‌های پایین و الکتروموتور جمکو در توان‌های بالا با پوسته چدن، اقدام به تولید الکتروموتور باکیفیت کرده‌اند. در بازار الکتروموتور موتوژن بسیار شناخته شده است و بعضی از مشتریان آن به هیچ قیمتی حاضر به تغییر نشان تجاری خود نیستند؛ اما در سال‌های اخیر با توجه به کیفیت بالای الکتروموتور الکتروژن، از این نشان تجاری استفاده می‌شود.

با توجه به شرایط موجود و قیمت ارز و همچنین بالا رفتن قیمت الکتروموتور زیمنس، الکتروموتور الکتروژن و موتوژن می‌تواند به‌عنوان بهترین جایگزین به‌کار گرفته شود. البته الکتروموتور الکتروژن تا توان ۴۵ کیلووات برای الکتروموتور ۱۵۰۰ دور و با پوسته آلومینیوم تولید می‌شود. علاوه بر این در ماه‌های اخیر کارخانه الکتروژن اقدام به تولید الکتروموتور با پوسته چدن نیز کرده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

فصل هفتم: آثار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۷ ۱ مقدمه

از جمله آثار استفاده از تکنولوژی‌های عایقی جدید، با قابلیت اطمینان بالا، دارای عمر طولانی، با تحمل درجه حرات بالا، با سطح تخلیه جزئی پایین، با تلفات عایقی پایین، با استحکام مکانیکی بالا، دارای تحمل تنش الکتریکی بالاتر و در نتیجه با ضخامت کمتر در ماشین‌های الکتریکی می‌توان به کاهش قیمت خرید، کاهش هزینه طول عمر ماشین، به تعویق انداختن تعمیر و نگهداری و یا تعویض ماشین الکتریکی، به تعویق انداختن زمان احداث واحدهای تولید در نیروگاه‌ها، حجم و وزن کوچک‌تر ماشین، اشاره کرد. ازاین‌رو توسعه فناوری‌های عایقی ماشین‌های الکتریکی، اقدامی استراتژیک در راستای افزایش بهره‌وری در صنعت برق خواهد بود.

اولین سیستم‌های عایقی به‌کار گرفته‌شده در صنعت و تجهیزات برق بر پایه‌ی مواد عایقی طبیعی بوده‌اند که بعدها با توسعه مواد مصنوعی، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در سیستم‌های عایقی حاصل شد و این پیشرفت‌ها به سرعت در حال تغییر خصوصیات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی عایق‌ها هستند که لزوم بررسی جدیدترین تحولات در این زمینه و مقایسه با عایق‌های مرسوم را مشخص می‌سازد [۱]-[۳]. اولین سیستم‌های عایقی از مواد طبیعی بهره می‌بردند که در صنعت برای سایر کاربردها، بسیار استفاده می‌شدند. این مواد شامل،الیاف کاغذی، ابریشم، پنبه، کتان، پشم، پنبه‌ی نسوز (آزبست) بودند. این الیاف برای استفاده به‌عنوان عایق هادی‌ها بعد از ترکیب با رزین‌های طبیعی گرفته‌شده از درختان، گیاهان و حشرات و نفت خام، مورداستفاده قرار می‌گرفتند. رزین‌های طبیعی گرفته‌شده از نفت خام شامل واکس‌ها، آسفالت‌ها و قیر و لاک هستند. مواد جامد از قبیل شن، میکا، پنبه‌ی نسوز، کوارتز و سایر مواد معدنی اغلب به‌عنوان پرکننده در کنار این مواد استفاده می‌شدند.

در سال ۱۹۰۸، دکتر باکلند، به‌عنوان اولین ماده‌ی عایق مصنوعی، ترکیب phenol-formaldehyde resins را توسعه داد. Alkyd resins در سال ۱۹۲۶ و در همین سال aniline-formaldehyde به‌عنوان عایق‌های مصنوعی جدید معرفی شدند. در ادامه نیز volatile organic chemiclas (VOC) و سپس مواد دیگری با نام‌هایpolyvinyl chloride و urea-formaldehyde و acrylic و polystyrene و nylon و melamine-formaldehyde نیز پیش از جنگ جهانی دوم استفاده شدند [۳]. از آن پس مواد عایقی و رزین‌های مصنوعی متعدد دیگری ارائه شدند که می‌توان به پلی‌اورتان، پلی‌پروپیلن، پلی‌کربنات و پلی‌اتیلن و گروه دیگری از الیاف‌ها و نوارها از گلیکول پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) اشاره کرد [۳].

عوامل حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی، چهار شاخص اصلی در تقسیم‌بندی و طبقه‌بندی مواد عایق‌های الکتریکی به‌شمار می‌آیند که از جمله آنها می‌توان به محدوده قابلیت حرارتی، سطح ولتاژ کار، استحکام در برابر خم‌شدگی و پارگی، مقاوم بودن در برابر واکنش‌های شیمیایی، قابلیت پذیرش مواد آغشته‌کننده، مقاومت در برابر سایش و خراشیدگی و سطح ولتاژ ماده عایقی اشاره کرد. طبقه‌بندی مواد عایق‌های الکتریکی بر اساس هر یک از شاخص‌های یادشده کاری دشوار و پیچیده است.

شاخص محدوده مجاز حرارتی و تحمل حرارتی عایق به‌عنوان مهم‌ترین عامل در میزان بازدهی و طول عمر تجهیزات به‌عنوان شاخص اصلی طبقه‌بندی مواد عایقی موردتوجه قرار گرفته است.

درصورتی‌که جنس نامناسب برای عایق استفاده‌شده در ساختار ماشین‌های الکتریکی انتخاب شود، درنتیجه امکان انتقال حرارت کافی وجود نداشته باشد و یا آن جنس تحمل دمای کاری ماشین را نداشته باشد، افت بازدهی ماشین و کاهش عمر آن حتمی خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

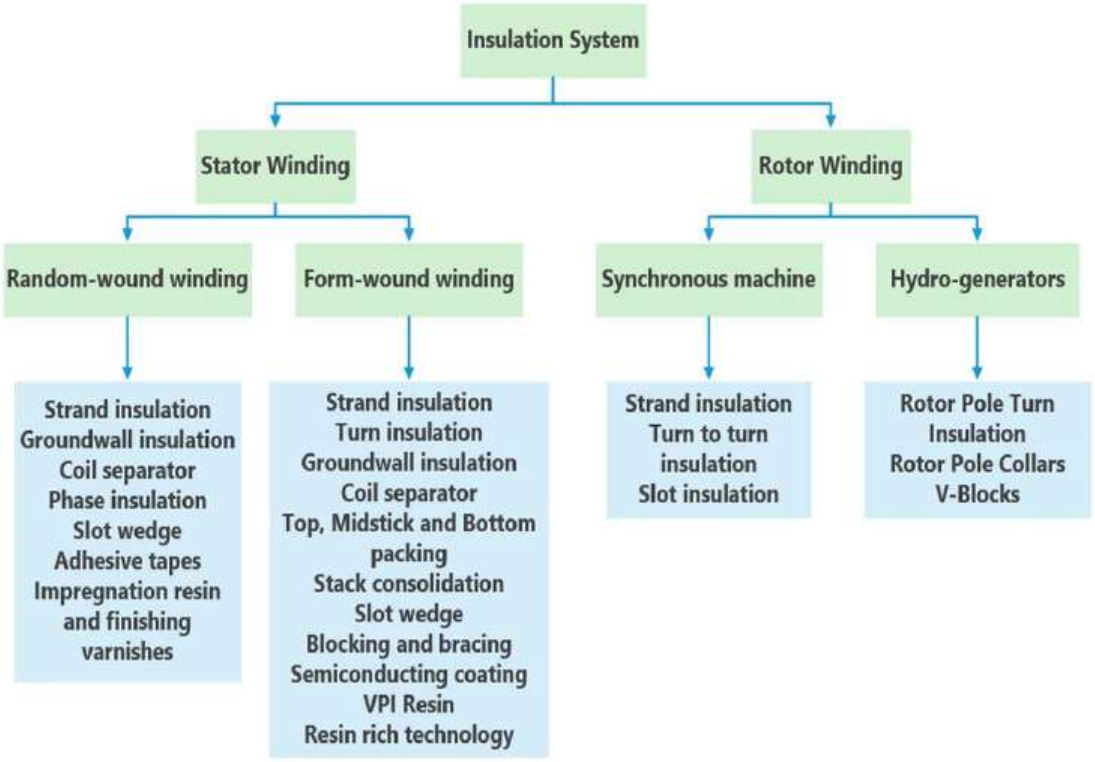
با کمک تکنولوژی‌های مدرن از قبیل نانو در ساخت مواد عایقی، چشم‌انداز جدیدی برای افزایش راندمان، افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های اورهال ماشین‌های الکتریکی گشوده شده است. ازاین‌رو امکان‌سنجی به‌کارگیری استفاده از این تکنولوژی‌ها در ساختار عایق‌های ماشین‌های الکتریکی استفاده شده در داخل کشور باید موردتوجه قرار بگیرد. از مهم‌ترین دستاوردهای توسعه فناوری فوق، بهبود قابلیت اطمینان و افزایش عمر تجهیز و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و در نتیجه صرفه اقتصادی برای بهره‌بردار است.

سیستم عایقی سیم‌پیچ‌های جریان متناوب به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که در یک ولتاژ و دمای مشخص حداقل برای طول عمر تعریف‌شده تجهیز، استقامت و پایداری الکتریکی و مکانیکی و ابعادی خود را حفظ کند.

در استانداردهای بین‌المللی کلاس‌های مختلف سیستم‌های عایقی الکتریکی توصیف شده است. این توصیف بر پایه ماکزیمم دمایی که این سیستم می‌تواند به‌صورت مداوم کار کند و نیز تحمل ولتاژ نامی سیستم را داشته باشد، انجام شده است.

هم‌اکنون بر طبق استانداردهای بین‌المللی مواد عایقی بر اساس حداکثر دمای مجاز به هفت کلاس حرارتی Y، A، E، B، F، H و C تقسیم‌بندی شده‌اند [۱]-[۳]

مؤلفه‌های سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار در شکل (۸-۱) ارائه شده‌اند.



شکل ۷-۱- مؤلفه‌های سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی دوار [۳]

فناوری‌های عایقی شناسایی‌شده و معرفی‌شده در این پروژه عبارت‌اند از (در گزارش فازهای قبلی و در فصل بعد از این گزارش شرح داده شده‌اند):

- ساخت عایق اپوکسی رزین پرشده با مواد نانوکامپوزیت عایقی به‌منظور بهبود طول عمر، ولتاژ شکست و هدایت حرارتی عایق در ماشین‌های الکتریکی فشارقوی و فشارضعیف

- استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica
- استفاده از یک عایق بدنه با رسانایی حرارتی ذاتی بالا
- استفاده از یک عایق بدنه‌ی نازک‌تر بر اساس طرح «شیشه‌ی تخت» نوار کاغذی میکا از طریق افزایش محتوی میکا
- استفاده از رزین‌های مصنوعی مایع
- استفاده از مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه
- استفاده از مواد عایقی سیم‌پیچی مناسب برای کاربردهای مختلف هوافضا و ژنراتور بادی و ...
- استفاده از رزین‌های پلی اورتان
- استفاده از گازهای فومینگ
- راه‌اندازی خط تولید عایق کپتون در کشور
- راه‌اندازی خط تولید عایق نومکس در کشور
- ...

در ادامه این فصل آثار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده، ارائه و بررسی شده است.

۲ ۷ آثار اقتصادی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده

تولید و تأمین انرژی از جمله انرژی برق همواره یکی از بخش‌های پرهزینه در کشورها به‌شمار می‌رود. ایجاد زیرساخت‌های لازم و استفاده از فناوری مناسب و قطعات با کیفیت در این بخش، هزینه‌های قابل‌توجهی را بر اقتصاد کشورها وارد می‌کند. بنابراین بهبود روند سرمایه‌گذاری، ایجاد زیر ساخت و به‌کارگیری فناوری در این صنعت از جمله مواردی است که همواره موردتوجه دولت‌ها قرار می‌گیرد. عایق با کیفیت و ساختار مناسب می‌تواند در مقابل ولتاژهای بالا مقاوم بوده و بالعکس کیفیت نامطلوب عایق‌های یادشده منجر به پدیده‌هایی از قبیل شکست عایقی شده که در نهایت منجر به تخریب عایق و اتصال کوتاه و از کار افتادن ماشین الکتریکی خواهد شد.

از آثار اقتصادی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده می‌توان موارد زیر را عنوان کرد:

- کاهش هزینه‌های تمام‌شده در ماشین‌های الکتریکی اعم از حالت‌های موتوری و ژنراتوری
- افزایش بهره‌وری از ماشین‌های الکتریکی
- قابلیت اطمینان بالاتر ماشین‌های الکتریکی موجب می‌شود که هزینه‌ی انرژی تأمین‌نشده کمتر شود. زیرا با تأمین نشدن انرژی الکتریکی (خرابی ژنراتورها)، شرکت‌های تولید و توزیع باید هزینه‌های عدم تأمین برق را به شرکت‌ها بپردازند. همچنین در زمان خرابی موتورهای الکتریکی، کارخانه‌ها نمی‌توانند به‌کار خود بپردازند و در نتیجه موجب می‌شود که کارشان را با تأخیر انجام دهند و با توجه به نوع قراردادشان به خریداران محصولات خود، جریمه بپردازند. همچنین شرکت‌ها مجبور می‌شوند در بازه‌ای که کار نمی‌کنند، هزینه‌ی کارگران را بپردازند بدون اینکه تولیدی داشته باشند.
- عمر طولانی سیستم عایقی موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر بوده و زمان بیشتری تا تعویض آن طول بکشد.
- سیستم عایقی با تحمل درجه حرات بالا موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و هزینه مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد. در موارد خاص همچون موتورهای مورداستفاده در مته‌ها و دریل‌ها، راه آهن

و ژنراتورهای هواپیما ممکن است، ماشین الکتریکی در دمای بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و حتی۳۰۰ درجه کار کند. تنش‌های حرارتی- مکانیکی در سیستم‌های عایقی در اثر اختلاف دما در نواحی مختلف و یا متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی مواد مختلف در سیستم عایقی حادث می‌شود. بنابراین باید در طراحی سیستم عایقی، ترکیب مواد به‌کار گرفته‌شده با توجه به ضرایب انبساط حرارتی در نظر گرفته شود.

- سیستم عایقی با سطح تخلیه‌جزئی پایین موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر بوده و زمان بیشتری تا تعمیر و نگهداری و همچنین تا تعویض آن طول بکشد. تخلیه‌ی جزئی (PD) یکی از فاکتورهای مهمی است که می‌تواند خرابی عایقی را به‌وجود آورد. ازآنجاکه کلاف‌ها و میله‌ها، خارج از هسته استاتور تهیه و عایق‌بندی می‌شوند، هنگام جانمایی در هسته باید نازک‌تر از شیارهای هسته باشند و به همین منظور ایجاد فاصله‌های هوایی بین شیارها و سطح کلاف‌ها یا میله‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی در طول پروسه ساخت کلاف‌ها و میله‌های ماشین‌های الکتریکی در سطوح ولتاژ بالای چهار کیلوولت ممکن است فضاهای خالی در سطح آنها ایجاد شده باشد. فواصل هوایی زمینه پدیده تخلیه جزئی در اثر اضافه‌ولتاژها را در سطح کلاف‌ها و یا میان کلاف‌ها و دیواره شیارها فراهم می‌سازد. این پدیده در ماشین‌های الکتریکی، در محاوره به‌طور نادرست، پدیده کرونا تلقی می‌شود. تنش‌های الکتریکی می‌توانند هوای موجود در فواصل هوایی را شکسته و منجر به تولید جرقه شوند. جرقه‌ها سرانجام موجب ساییده شدن و حتی ایجاد حفره در عایق و یا دیواره هسته می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از این پدیده، عایقی نیاز است تا فاصله‌های هوایی میان کلاف‌ها و دیواره‌های هسته را حذف و مانع از پدیده تخلیه جزئی و در نتیجه ایجاد خطا در سیستم ماشین الکتریکی شود. برای حذف پدیده تخلیه جزئی در سطح کلاف‌ها و میله‌ها از روکش‌های عایق اضافی استفاده می‌شود. همچنین سازندگان از پوشش‌های نیمه‌هادی در فاصله بین کلاف‌ها و دیواره شیارها استفاده می‌کنند. این پوشش معمولاً از جنس کربن سیاه است که با مقاومت اهمی کافی در تماس با شیار و هسته پتانسیل زمین را خواهد داشت. به این ترتیب ولتاژ دو سر فواصل هوایی صفر بوده و تخلیه جزئی نخواهیم داشت. پدیده تخلیه جزئی در فواصل هوایی بین شیار و کلاف‌ها در ماشین‌های الکتریکی بالاتر از شش کیلوولت رخ می‌دهد.
- پوشش نیمه‌هادی میان کلاف‌ها و شیارها، معمولاً حدود چند سانتی‌متر از دو لبه انتهایی شیارها را نیز پوشش می‌دهند. همچنین روکش سطح کلاف‌ها و میله‌ها نیز تا حدود زیادی، نزدیکی اتصالات انتهایی را پوشش می‌دهند. اما به هر ترتیب حفاظت نقاط اتصال سرسیم‌پیچ‌ها را فراهم نمی‌سازند. ازآنجاکه عایق‌های این نقاط نیز در معرض فواصل هوایی قرار دارند و همچنین از طرفی یکنواخت نمودن میدان الکتریکی در خارج از فضای هسته و شیارها از دیگر مسائل ماشین‌های الکتریکی است، باید پوششی را برای حذف فواصل هوایی و یکنواخت نمودن میدان در سرسیم‌پیچ‌ها در نظر گرفت. این نیازمندی‌ها با به‌کارگیری نوار کاربید سیلیکون در اتصال سرسیم‌پیچ‌ها برآورده شده است. کاربید سیلیکون دارای مشخصه‌ای است که با افزایش تنش‌های الکتریکی مقاومت آن کاهش می‌یابد، بدین‌معنا که اهمیک نیست. این خاصیت مقاومت متغیر موجب هادی شدن آن هنگام اضافه ولتاژ و هدایت آن به هسته زمین‌شده استاتور و همچنین عدم انتقال سایر شرایط نامی به هسته و عایق‌های آن در حالت کار عادی ماشین می‌شود. با حذف اضافه ولتاژها، امکان آسیب سیستم عایقی در سرسیم پیچ‌ها در اثر تخلیه جزئی نیز حداقل می‌شود.
- سیستم عایقی با تلفات عایقی پایین موجب می‌شود که تلفات ماشین الکتریکی کاهش یابد و از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر خواهد بود.

- سیستم عایقی با استحکام مکانیکی بالا موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و هزینه مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد. ارتعاشات، شوک‌های مکانیکی ناشی از جریان‌های اتصال کوتاه و نیروهای گریز از مرکز در روتور از جمله تنش‌های مکانیکی ماشین‌های الکتریکی گردان هستند. اتصالات پیشانی و سرسیم‌پیچی‌ها نیز در معرض تنش‌های مختلف مکانیکی قرار دارند که با استفاده از بستن اتصال پیشانی سیم‌پیچ‌های استاتور به رینگ نگهدارنده و تزریق رزین به این ناحیه از اثرات نامطلوب تنش‌های مکانیکی جلوگیری می‌شود. قطعات عایقی در روتور باید دارای استحکام مکانیکی بالا و سیستم نگهدارنده‌های مناسب برای مهار هادی‌ها در برابر فشارهای مکانیکی ناشی از میدان‌های مغناطیسی و به‌ویژه نیروهای چرخشی گریز از مرکز باشند. از دیگر تنش‌هایی که سیستم عایقی روتورها در معرض آن قرار دارند، فشارهای مکانیکی یا به عبارت بهتر ترمومکانیکی در هنگام راه‌اندازی و خاموش کردن ماشین‌های الکتریکی است. با تحریک سیم‌پیچ روتور، جاری شدن جریان الکتریکی در هادی‌ها منجر به ایجاد حرارت و حرکت محوری آنها شده که امکان آسیب به قطعات عایقی را فراهم می‌سازد. برای این منظور معمولاً از پوشش‌های لغزنده در عایق‌های شیار روتور استفاده می‌شود تا در مقابل خراشیدگی ناشی از تنش مذکور مقاوم باشند.
- سیستم عایقی دارای تحمل تنش الکتریکی بالاتر و در نتیجه با ضخامت کمتر در ماشین‌های الکتریکی موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و هزینه مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد. شکست عایقی می‌تواند به خرابی‌هایی منجر شود که نهایتاً منجر به خروج از سرویس پیش‌بینی‌نشده و تأثیرات منفی مالی و بعضاً خطرات ایمنی خواهد شد. برای برخی صنایع خاص که عملکرد بی‌وقفه موردنیاز است، خروج از سرویس ناخواسته موردپذیرش نیست. هزینه‌ی خروج از سرویس پیش‌بینی‌نشده برای یک سکوی استخراج نفت در دریا حدود ۲۵۰۰۰ دلار در ساعت است [۱]. استقامت عایقی مواد عایقی مدام در حال افزایش و بهبود است. به‌عنوان مثال با معرفی مواد جدید در ۲۰ سال اخیر، استقامت عایقی عایق‌های بدنه تقریباً دو برابر شده است [۲].

۳ ۷ آثار اجتماعی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده

از آثار اجتماعی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده می‌توان موارد زیر را عنوان کرد:

- استفاده از سیستم عایقی کارآمد در ماشین‌های الکتریکی می‌تواند به افزایش ظرفیت عرضه انرژی و به تبع آن کاهش قطعی برق و پایداری بیشتر آن کمک کند. این پیامدها باعث افزایش اطمینان کسب و کارها نسبت به وجود برق پایدارتر می‌شوند و زمینه تداوم فعالیت بنگاه‌های نیازمند انرژی برق را فراهم می‌کند. همچنین، این آثار غیر مستقیم موجب افزایش سرمایه اجتماعی (اعتماد) مردم نسبت به دولت خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به امکان افزایش عرضه انرژی، توان مقابله با تحریم‌ها درزمینه‌ی تأمین انرژی بیشتر خواهد بود. افزون‌براین، امکان کاهش واردات برق از کشورهای همسایه و افزایش ظرفیت صادرات فراهم می‌شود. در مجموع، استفاده از سیستم عایقی کارآمد در ماشین‌های الکتریکی می‌تواند دارای آثار غیر مستقیم سیاسی و اجتماعی باشد.
- قابلیت اطمینان بالاتر ماشین‌های الکتریکی موجب می‌شود که قطعی برق کمتر شود.
- عمر طولانی سیستم عایقی موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر رفته و مردم اعتماد بیشتر داشته باشند؛ زیرا ماشین الکتریکی با مدت‌زمان ماندگاری بالاتری به آنها تحویل داده شده است.
- سیستم عایقی با تحمل درجه حرات بالا موجب می‌شود که در شرایط آب و هوایی خیلی گرم که در چند روز از سال رخ می‌دهد، ماشین بتواند کار کند و اعتماد مردم بیشتر شود.

- سیستم عایقی با سطح تخلیه‌جزئی پایین موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر بوده و زمان بیشتری تا تعمیر و نگهداری و همچنین تا تعویض آن طول بکشد و اعتماد مردم بیشتر می‌شود.

۴ ۷ آثار زیست‌محیطی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده

از آثار زیست‌محیطی تکنولوژی‌های عایقی شناسایی و معرفی‌شده می‌توان موارد زیر را عنوان کرد:

- عمر طولانی سیستم عایقی موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر بوده و زمان بیشتری تا تعویض آن طول بکشد و در نتیجه مواد اولیه مورداستفاده در طول زمان در ماشین‌های الکتریکی کمتر می‌شود و همچنین آلودگی‌های ناشی از تولید ماشین الکتریکی کاهش می‌یابد.
- سیستم عایقی با تحمل درجه حرات بالا موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد و آلودگی ناشی از استخراج و فرآوری مواد اولیه کاهش خواهد یافت.
- سیستم عایقی با سطح تخلیه‌جزئی پایین موجب می‌شود که عمر ماشین الکتریکی بالاتر بوده و زمان بیشتری تا تعمیر و نگهداری و همچنین تا تعویض آن طول بکشد و در نتیجه مواد مورداستفاده کاهش می‌یابد و آلودگی ناشی از استخراج و فرآوری مواد اولیه کاهش خواهد یافت.
- سیستم عایقی با تلفات عایقی پایین موجب می‌شود که تلفات ماشین الکتریکی کاهش یافته و در نتیجه تلفات و تولید آلودگی برای تولید برق، کاهش یابد.
- سیستم عایقی با استحکام مکانیکی بالا موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و هزینه مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد و آلودگی ناشی از استخراج و فرآوری مواد اولیه کاهش خواهد یافت.
- سیستم عایقی دارای تحمل تنش الکتریکی بالاتر و در نتیجه با ضخامت کمتر در ماشین‌های الکتریکی موجب می‌شود که ماشین الکتریکی سبک‌تر و کوچک‌تر شود و هزینه مواد مورداستفاده در آن کاهش یابد و آلودگی ناشی از استخراج و فرآوری مواد اولیه کاهش خواهد یافت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

فصل هشتم: پیشنهاد برای ورود تکنولوژی‌های نوین عایقی به کشور و توسعه کاربرد آنها و بهبود ساختارهای عایقی ماشین‌های الکتریکی موجود در صنعت برق کشور

۱ ۸ ساخت عایق اپوکسی رزین پرشده با مواد نانوکامپوزیت عایقی به‌منظور بهبود طول عمر، ولتاژ شکست و هدایت حرارتی عایق در ماشین‌های الکتریکی فشارقوی و فشارضعیف

نانوکامپوزیت‌های پلیمری اخیراً در سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی موردتوجه قرار گرفته‌اند. اپوکسی رزین‌ها که به‌طور گسترده در ماشین‌های الکتریکی فشارقوی و فشارضعیف استفاده می‌شوند دارای هدایت حرارتی ذاتی خیلی کم (بین ۰,۱ تا ۰,۳ W/m.K) بوده که این مقدار کم، از انتقال حرارت جلوگیری کرده و به تنزل عایقی منجر می‌شود [۴]. اما پرکننده‌های نانو و میکرو هدایت حرارتی بسیار بالاتری دارند و می‌توانند به اپوکسی رزین اضافه شده و هدایت حرارتی آن را بهبود دهند که منجر به کاهش دما در سیم‌پیچی استاتور خواهد شد و بازده ماشین بهبود خواهد یافت [۵]. با استفاده از مواد نانوکامپوزیتی عایقی بهبود در طول عمر، ولتاژ شکست و هدایت حرارتی موردانتظار است. در نتیجه، چگالی جریان سیم‌پیچی و چگالی توان ماشین بهبود می‌یابند.

پرکننده‌های نانو و میکرو مختلفی مانند Al2O3, SiO2, AlN, Si3N4, BN وجود دارند.

یک مطالعه مقایسه‌ای یک ماشین القایی ولتاژمتوسط با ماده اپوکسی رزین بدون و با ماده نانوکامپوزیت در [۶] ارائه شده و نشان داده شده است که با افزایش هدایت حرارتی عایق از ۰,۲۵ W/m.K به ۰,۷ W/m.K، گشتاور و چگالی جریان از ۱۴ درصد تا ۲۶ درصد قابل‌ارتقا است.

در [۷] دو نوع رزین نانوکامپوزیت با سیلیکای آب‌دوست و سیلیکای آب‌گریز بررسی شده‌اند. مشاهده می‌شود که رزین پایه با سیلیکای آب‌گریز مقاومت بالاتری در برابر تولید درخت داخل عایق و استحکام مکانیکی بیشتر در مقایسه با رزین پایه و اپوکسی رزین با سیلیکای آب‌دوست دارد.

در [۸] یک نانوکامپوزیت اپوکسی جدید برای موتورهای رانشی کشتی ایجاد شده است. مشاهده می‌شود که طول عمر نانوکامپوزیت جدید بیش از ۷ برابر نسبت به اپوکسی رزین افزایش یافته است. به‌علاوه، عمق و حجم خوردگی نانوکامپوزیت در معرض تخلیه‌ی جزئی کمتر از نصف اپوکسی رزین است.

نتایج نشان می‌دهند که با تزریق نانوکامپوزیت‌های SiO2 چگالی توان موتور از ۱۰ تا ۱۵ درصد بهبود یافته است. همچنین، طول عمر عایقی افزایش می‌یابد چراکه SiO2 به‌عنوان مانعی برای کانال‌های شکست ناشی از تخلیه‌ی جزئی عمل می‌کند [۹].

اساساً نانوکامپوزیت پلیمری ترکیبی از تعداد دو یا بیشتر ماده است که خواص فیزیکی و شیمیایی دارد.

نانوکامپوزیت پلیمری در کاربردهای بسیاری مانند هوافضا، حوزه سلامت قابل‌استفاده است.

همچنین نانوکامپوزیت‌های پلیمری اخیراً در سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی موردتوجه صنعت خودرو و.. قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال اپوکسی‌رزین‌ها به‌طور گسترده در ماشین‌های الکتریکی ولتاژپایین و ولتاژبالا استفاده شده‌اند. هدایت حرارتی اپوکسی رزین خیلی کم است که از انتقال حرارت جلوگیری کرده و به تنزل عایقی منجر می‌شود.

نانوکامپوزیت‌های پلیمری نسل جدیدی از مواد بوده که شامل یک ماتریس پلیمری و کمتر از ۱۰ درصد وزنی از یک تقویت‌کننده نانومتری هستند. تقویت‌کننده‌های نانومتری به علت داشتن نسبت طول به قطر (L/D) زیاد، ابعاد بسیار کوچک و میزان سطح بسیار بالا در مقایسه با تقویت‌کننده‌های معمولی همچون الیاف شیشه و تالک، در سطح بارگذاری (loading) کمتری باعث بهبود خواص موردنظر شده و مسائل مربوط به تقویت‌کننده‌های رایج مانند افزایش وزن، نقایص سطحی و مشکلات فرایندی در آنها کمتر دیده می‌شود.

مزایای استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری عبارت‌اند از:

- وزن کمتر قطعه نهایی در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی
- استحکام مکانیکی بالاتر در میزان بارگذاری کمتر
- مقاومت بالا در برابر نفوذ گازها و بخارات

- سطح ظاهری بهتر
- فرایندپذیری راحت‌تر
- تحمل حرارتی بالاتر
- خواص عایقی بالا

۸ ۱ ۱ خواص نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها در مقادیر ۵-۲ درصد وزنی، خواص پلیمرهای خالص را به‌طرز قابل‌توجهی بهبود می‌دهند. این ارتقای خواص عبارت‌اند از:

- خواص عبورپذیری مانند نفوذپذیری و مقاومت در برابر حلال‌ها؛
- خواص نوری
- هدایت یونی

پودرهای نانوکامپوزیت نسبت سطح به حجم بالایی دارند. این نسبت در حالت بی‌شکل نسبت به حالت بلوری، بیشتر است. کسر زیادی از اتم‌ها در سطح ذرات پودرهای نانوکامپوزیت و یا در مرز دانه‌های ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها قرار دارند.

خواص دیگر حاصل از ساختار لایه‌ای نانوسیلیکات‌ها در نانوکامپوزیت‌های پلیمری عبارت‌اند از:

- افزایش پایداری حرارتی و مقاومت در برابر شعله (آتش) در مقادیر بسیار کم پرکننده.
- قیمت پایین نانوکلی (clay) نسبت به سایر پرکننده‌های نانو و امکان استفاده از روش اختلاط مذاب در پلاستیک‌ها (نانوکامپوزیت‌های مورداستفاده در صنعت پلاستیک)

۸ ۱ ۲ مشکلات نانوکامپوزیت‌ها

عدم توزیع یکنواخت فاز دوم در فاز زمینه در نانوکامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد. تجمع ذرات پودر بسیار ریز در نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش انرژی سطحی آنها شده، کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را به دنبال دارد.

همچنین استفاده از مواد شیمیایی گران‌قیمت برای توزیع یکنواخت فاز دوم در داخل فاز زمینه و جلوگیری از به‌هم چسبیدن ذرات پودر نانوکامپوزیتی و ساخت نانوکامپوزیت‌هایی با ریزساختاری همگن و خواص مکانیکی بالا، باعث غیراقتصادی شدن و همچنین پیچیده‌تر شدن فرایند می‌شود.

۸ ۱ ۳ کاربردهای نانوکامپوزیت‌ها

کاربردهای نانوکامپوزیت‌ها شامل موارد زیر می‌شود:

- عایق ماشین الکتریکی
- قطعات داخلی و خارجی خودرو
- بسته‌بندی‌های مقاوم در برابر نفوذ گازها و بخارات
- الیاف مستحکم برای صنعت نساجی
- ابزارآلات صنعتی و لوازم خانگی

۸ ۱ ۴ روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌ها

روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری عبارت‌اند از:

الف- مخلوط‌سازی مستقیم

ب- فرآوری محلول

ج- پلیمریزاسیون درجا

در ادامه به توضیح هر یک از روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری یادشده پرداخته می‌شود.

- مخلوط‌سازی مستقیم

در این روش نخست نانوذرات تهیه‌شده به‌صورت سوسپانسیون در یک حلال حل شده و سپس به محلول پلیمری اضافه می‌شود و مخلوط حاصله توسط یک پرس هیدرولیک در یک قالب اکسترود می‌شود و در نهایت صفحات نازک به‌دست می‌آیند. در این روش انتخاب بستر پلیمری، انتخاب نوع ذارت و سازگاری این دو گونه با یکدیگر و نحوه‌ی توزیع ذرات از نکات حائز اهمیتی است که باید بر آن فائق آییم.

معمولاً برای تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری حاوی نانوالیاف کربنی از این روش استفاده می‌شود. محدودیت این روش میزان فاز تقویت‌کننده یا همان مواد پرکننده است. به‌عنوان مثال برای تولید نانوکامپوزیت سیلیکا/پلی‌پروپیلن حداکثر میزان نانوذرات سیلیکا ۲۰ درصد وزنی می‌تواند باشد. البته به نظر می‌رسد آگلومره شدن (به هم چسبیدن) ذرات نیز از دیگر محدودیت‌های این روش باشد.

- فرآوری محلول

با استفاده از این روش می‌توان بر بعضی از محدودیت‌های روش مخلوط‌سازی مستقیم غلبه کرد، ضمن آنکه می‌توان میزان آگلومراسیون و کلوخه‌ای شدن نانوذرات در ماده پلیمری را کاهش داد. در این روش به دو صورت می‌توان نانوکامپوزیت‌های پلیمری را تولید کرد. اگر ماده زمینه پلیمری و نانوذرات تقویت‌کننده آن در یکدیگر قابل‌حل شدن باشند، محلول حاصل را می‌توان در یک قالب؛ ریخته‌گری کرده و نانوکامپوزیت تولید کرد. در غیر این صورت مخلوط مواد نانوکامپوزیت در یک حلال حل شده و در نهایت با تبخیر حلال، نانوکامپوزیت موردنظر به‌دست می‌آید.

- پلیمریزاسیون درجا

در این روش پلیمریزاسیون بستر پلیمری در حضور نانوذرات انجام می‌شود و منومر در حین رشد، ذرات پرکننده را دربر می‌گیرد. نکته کلیدی در این روش نحوه توزیع ذرات نانو در منومر است. با کنترل پیوند بین ذرات نانو و ماده زمینه، می‌توان توزیع موردنظر را به‌دست آورد. بسیاری از نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری را می‌توان با این روش تولید کرد.

به‌طور مثال نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولایه‌های گرافیت که دارای هدایت الکتریکی بالا و نفوذپذیری کمی هستند، با این روش تولید می‌شوند. برای تولید این نانوکامپوزیت‌ها ابتدا با امواج مافوق صوت لایه‌های گرافیت در منومر به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شوند و در نهایت با پلیمریزاسیون درجا نانوکامپوزیت به‌دست می‌آید.

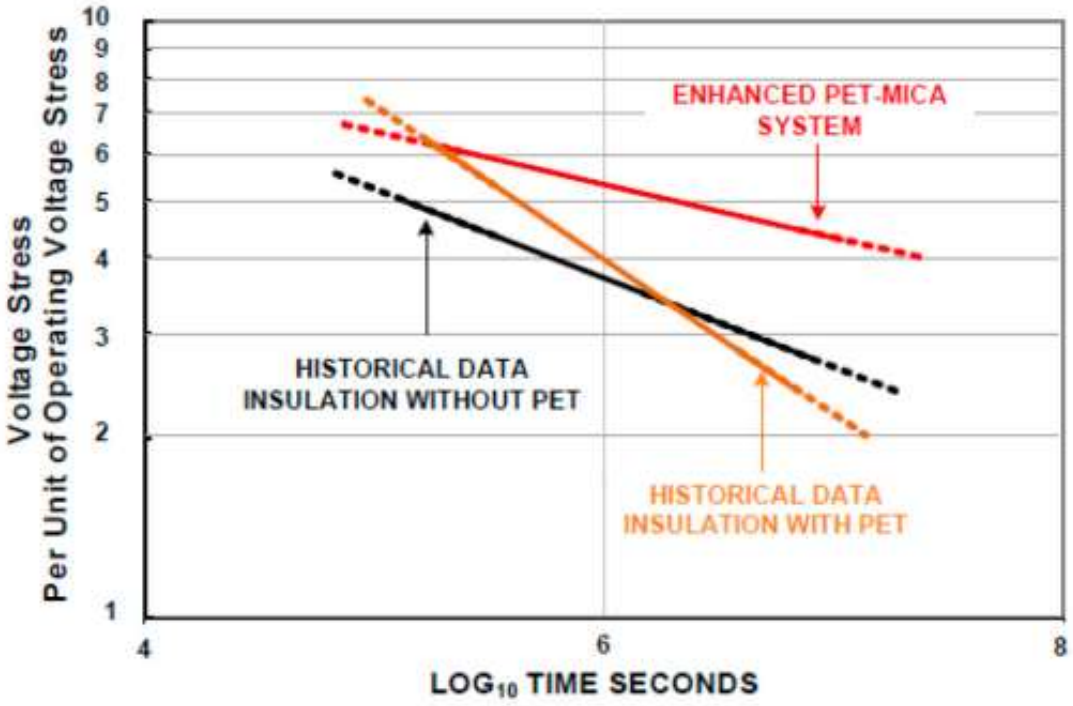
نکته‌ای که در روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری اهمیت دارد و آن را از یکدیگر متمایز می‌کند، توزیع مناسب ماده پرکننده است. با اصلاح سطحی می‌توان این توزیع را به شکل یکنواخت به‌گونه‌ای انجام داد که از آگلومراسیون اجزای نانومتری ماده پرکننده جلوگیری شود و توزیع مناسب فاز تقویت‌کننده فراهم گردد. در واقع نکته مهم در تمام این فرایندها، اصلاح فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره است. استفاده از فرایندهای سطحی سبب توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده در بستر پلیمری شده، افزایش مدول و استحکام نانوکامپوزیت را به‌دنبال خواهد داشت.

۲ ۸ استفاده از نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephthalate (PET) mica

در سال ۲۰۱۱، شرکت GE، نوار تقویت‌شده‌ی polyethylene glycol terephtalate (PET)- mica را از طریق استفاده از نوارهای PET به‌عنوان ماده‌ی پشتیبان برای کاغذ میکا، توسعه داد. این فرایند در یک فشار اشباع بهینه صورت می‌گرفت [۱۰]. PET، یک پلیمر ترموپلاستیک خطی بوده که نقطه‌ی ذوب بالا (۲۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) و پایداری

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

بسیار خوب دارد. مطابق شکل زیر، سیستم PET–میکای تقویت‌شده، مشخصات بسیار برتر از نظر استقامت ولتاژی نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET–میکا دارد.

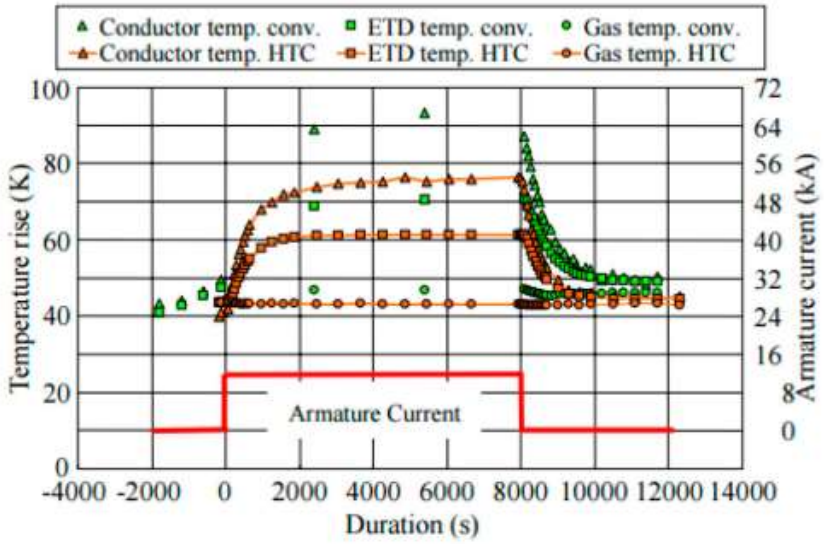


شکل ۸-۱- مقایسه‌ی استقامت ولتاژی سیستم PET–میکای تقویت‌شده، نسبت به سیستم‌های عایقی مرسوم با یا بدون PET–میکا [۱۰]

۸ ۳ استفاده از یک عایق بدنه با رسانایی حرارتی ذاتی بالا

نوارهای رزین پلیمر، کمترین رسانایی حرارتی را در سیستم عایق بدنه دارند. برای توجه به این مسئله، شرکت‌های توشیبا و وان رول، یک سیستم عایقی جدید را معرفی و پیشنهاد کرده‌اند که در آن از نوارهای کاغذی میکا حاوی پرکننده‌های بور–نیترید در نوارهای رزینی استفاده شده است. در نتیجه با افزایش رسانایی حرارتی، شرکت توشیبا توانست ظرفیت نامی ژنراتور را تا ۱۵ ٪ افزایش دهد (ابعاد شیار و دمای کاری مشابه با طراحی‌های مرسوم در نظر گرفته شد) [۱۱]. این عایق تازه توسعه‌یافته که رسانایی حرارتی بالا دارد، می‌تواند رسانایی حرارتی عایق را بهبود بخشد درحالی‌که تنش‌های الکتریکی و دمای سیم‌پیچی‌ها در سطوح یکسان با ژنراتورهای با عایق مرسوم قرار دارد [۱۱]. مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا (HTC) و عایق مرسوم در شکل زیر ارائه شده است. در مقایسه با یک ژنراتور با عایق مرسوم با سایز فریم یکسان، ژنراتور با عایق دارای رسانایی حرارتی بالا، کاهش قابل‌توجه در دمای سطح سیم‌پیچی و دمای هادی را نشان می‌دهد. افزون‌براین، اختلاف دما بین سطوح داخلی و خارجی عایق با رسانایی حرارتی بالا، کوچک‌تر است.

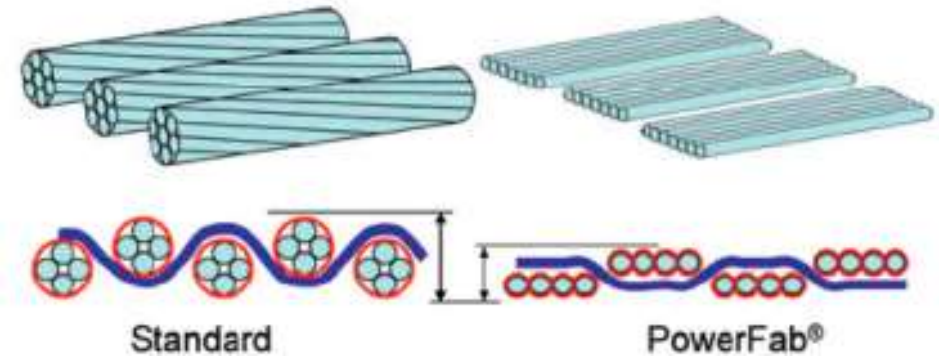
DOI: 10.30503/nripress.2020.164



شکل ۸-۲- مقایسه‌ی نتایج تست دما در حالت استفاده از عایق با رسانایی حرارتی بالا و عایق مرسوم [۱۱]

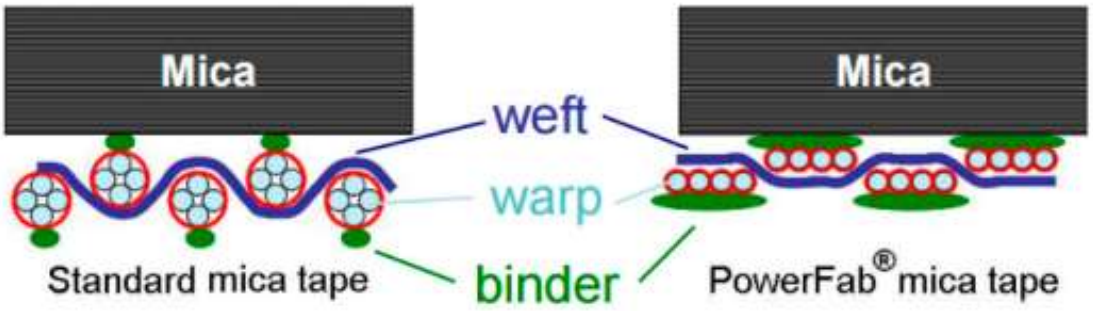
۸ ۴ استفاده از یک عایق بدنه‌ی نازک‌تر بر اساس طرح «شیشه‌ی تخت» نوار کاغذی میکا از طریق افزایش محتوی میکا

شرکت ایزوولتا، یک نوار کاغذی میکا را معرفی و پیشنهاد کرده است که با استفاده از یک ماده‌ی پشتیبان فیبر شیشه‌ی تخت، به جای ساختار معمول بافته‌شده، در میله‌های فشارقوی استاتور استفاده شود [۱۲]. این روکش شیشه‌ای که powerfab نامیده می‌شود، از روکش‌های شیشه‌ای معمول که هم‌اکنون استفاده می‌شوند، نازک‌تر بوده و اما وزن کلی مشابه با آنها دارد. دلیل این تفاوت، از روش تولید جدید برای روکش‌های شیشه‌ای می‌آید، این روش به‌صورتی است که رشته‌های شیشه، پیچیده نمی‌شوند و فقط به‌صورت موازی همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، قرار داده می‌شوند.



شکل ۸-۳- رشته‌های شیشه‌ای در روش استاندارد و روش powerfab [۱۲]

روش powerfab، منجر به ۱۵ ٪ کاهش نوار میکا می‌شود، در شکل زیر دلیل این کاهش نشان داده شده است. نوار پشتیبان، نازک‌تر بوده و اجازه‌ی افزایش مقدار میکا به ازای ضخامت نوار کلی یکسان را می‌دهد. درصد بیشتر میکا در نوار، رسانایی حرارتی و مقاومت در برابر تخلیه‌ی جزئی را نتیجه می‌دهد. استفاده از این نوارها توسط شرکت زیمنس گزارش شده است [۱۲].



شکل ۸-۴- ضخامت نوار استاندارد و نوار powerfab [۱۲]

۸ ۵ استفاده از رزین‌های مصنوعی مایع

این مواد را به‌عنوان دوست‌دار طبیعت معرفی کرده و احتمال ایجاد حفره یا حباب در عایق بدنه نیز کاهش یافته است. به‌منظور عایق بدنه‌ی استاتورهای با سیم‌پیچی شکل‌یافته، دو خانواده از رزین‌ها بسیار مهم هستند که پلی‌استرها و اپوکسی‌ها هستند. دیگر رزین‌های نامحلول، که گاهی وقت‌ها برای کاربردهای خاص استفاده می‌شوند، سیلیکون‌ها، آکریلیت‌ها، ایمیدها و ترکیبات فنولیک‌ها با سایر رزین‌ها هستند.

۸ ۶ استفاده از مواد عایقی انعطاف‌پذیر برای عایق شیار و بدنه

این کاربرد شامل موارد ذیل است:

- کاغذ کرافت که از فیبرهای چوب با قیمت پایین ساخته شده است.
- کاغذ rag که ۱۰۰ درصد کتان بوده و بنابراین نسبت به کاغذ کرافت محکم‌تر است.
- کاغذ fish که کاغذ تا حدی بازسازی‌شده سلولز–پلاستیک است.
- کاغذ چرمی عموماً پایه pvc
- کاغذ آرامید

۸ ۷ استفاده از مواد عایقی سیم‌پیچی مناسب برای کاربردهای مختلف هوافضا و ژنراتور بادی

اساس سیستم‌های هوایی الکتریکی (More Electric Aircraft و ALL Electric Aircraft) بر جایگزینی سیستم‌های پنوماتیکی و هیدرولیکی با سیستم‌های الکتریکی است. مانند سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی، نسل بعدی MEA می‌تواند بهبود کارایی سیستم و کاهش مصرف سوخت به‌دنبال داشته باشد. توان نامی یک ژنراتور برای هواپیمای بزرگ مسافربر معمولاً بیش از۱ مگاوات است. برای کاهش سایز کابل تلاش‌هایی برای افزایش ولتاژ سیستم ماشین‌های الکتریکی انجام پذیرفته است. اما سطح ولتاژ توسط پدیده تخلیه‌ی جزئی محدود می‌شود چراکه ولتاژ آغاز تخلیه‌ی جزئی در ارتفاعات بالاتر و فشار هوای کمتر کاهش پیدا می‌کند.

طی سال‌های اخیر، کمپانی بوئینگ B787 را ساخته است که در سیستم ولتاژ ترکیبی VAC, 360-800 Hz۲۳۵ و VDC۲۷۰± کار می‌کند [۱۳]–[۱۵] با افزایش ولتاژها، احتمال وقوع PD بیشتر می‌شود و شکست عایقی در سیستم‌های HVDC هواپیماهای تجاری به یک نگرانی اساسی برای امنیت و قابلیت اطمینان تبدیل شده است [۱۶]. اخیراً با افزایش تمایل به سیستم‌های رانشی الکتریکی/هایبریدی سیستم‌های عایقی با ولتاژهای بالای ۱ کیلوولت استفاده می‌شوند که چالش تخلیه‌ی جزئی را افزایش می‌دهد.

تخلیه‌ی جزئی یکی از عوامل اصلی خرابی عایق‌های آلی یا معدنی/آلی است. سیم با لعاب معدنی تکنولوژی بالغی در صنعت برای کلاس عایقی H(180C) و کلاس N(200C) است. دمای کارکرد بیشینه برای مواد معدنی ۲۰۰ درجه است

اما در برخی ماشین‌های بخصوص می‌توانند در دماهای بالاتر هم برای مدت کوتاه عملکرد داشته باشند مانند موتور فن برای دمیدن دود ناشی از حریق یا موتور الکتریکی برای اژدر الکتریکی [۱۷].

نتایج تجربی نشان می‌دهد که خرابی عایقی با افزایش دامنه و فرکانس ولتاژ به‌شدت افزایش می‌یابد [۱۸]. سیستم عایقی یک ژنراتور هواپیما می‌تواند فرکانس‌ها و فشار هوای مختلفی طی یک سیکل پروازی تجربه کند که انجام یک ارزیابی کامل را پیچیده می‌سازد. عوامل افزایش احتمال تخلیه‌ی جزئی و کاهش عمر سیستم عایقی عبارت‌اند از: فشار هوای کم، ارتفاع بالا [۱۹]، پالس‌های dv/dt بالا در ترمینال‌های ماشین (که ترکیبی از پالس‌های PWM و موج‌های برگشتی به دلیل عدم تطابق امپدانسی کابل و ترمینال موتور است) [۲۰]–[۲۲] و دمای عملکردی بالا [۲۳].

در استاندارد IEC 600034-27-1، انواع مختلف تخلیه‌ی جزئی مانند تخلیه شیار، تخلیه سطحی و ... دسته‌بندی شده و بر اساس سطح تنزل عایقی‌شان در یک جدول مرتب شده‌اند [۲۴].

در کاربرد هوایی، باید تخلیه‌ی جزئی در طرح سیستم عایقی در نظر گرفته شود [۲۵]. در [۲۶] ابزاری برای طراحان ماشین و سازندگان کویل برای در نظر گرفتن تخلیه‌ی جزئی در ماشین‌های فشارضعیف ارائه شده است. در [۲۷]، [۲۸] و [۲۹]–[۵۷] مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... ارائه شده است. جدول ۸-۱- خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست را نشان می‌دهد. متداول‌ترین ماده عایقی polyester-imide است.

جدول ۸-۲- مواد عایقی سیم برای کاربردهای مختلف هوافضا، ژنراتور بادی، و ... خلاصه‌ای از مواد عایقی سیم، ابعاد، و شرایط تست

Test condition	*Wire insulation/size*
Excitation: 540 VDC	Ceramic: D*= 1 mm, T*= 5 µm; Mica film: D= 1 mm; Mix of organic and inorganic material: D= 1.2 mm
Excitation: 60 Hz, Thermal: 660°C	Class200 and Silox magnet wire, AWG 20
-	Litz wire: Heavy polyimide, AWG 27
Excitation: 500 Vdc, 5 to 15 kHz, Thermal: -55 to 180 °C	Polyester-imide
Excitation: 5 to 200 kHz and 20 to 100 kPa	D = 625 µm ± 4 µm, T = 28 µm ± 2 µm
Excitation: 280 and 400 Vdc, 5 kHz sinusoidal and square voltage waveforms, altitude= 2.5, 5, 10, 20 and 30 km	Polyamide-imide
Excitation: 800, 900 and 1000 V @ 10, 100 kHz, Thermal: 120 °C	Polyester-imide
Excitation: 4.5kV @ 10 kHz, rise rate= 2000 V/µs, Thermal: -30 to 120 °C, RH= 20%-80%, Vibration: 100 Hz, 0.2mm	Stator insulation thickness= 0.8 mm
Excitation: 4-6 kV@5-20kHz, Thermal: -70 to 150 °C, RH= 20%-98%	Magnetic wire: polyimide film, T= 0.5 mm Main insulation: lapped glass-mica tapes impregnated with unsaturated Polyester-imide, T= 0.8 mm
Excitation: 50 Hz	Polyimide film (100HN), T= 25 µm; Polyimide film (100CR), T= 25 µm
Excitation:12kV, Thermal: 25 and 80 °C, RH= 30, 60 and 70%	Epoxy-mica, groundwall thickness= 3.04 mm
Excitation: 2 to 10 kV peak-to-peak @3kHz	Kapton HN: T= 25.4, 50.8, 76.2 and 127 µm
-	Polyamide-imide, D= 1.5 mm, T= 40 µm; Mica (bar), D= 2mm×5mm, T= 0.2 mm
Excitation: 600V square wave @ 10 kHz, Thermal: 240 °C, RH= 85%, Vibration: 50 Hz, 1.5 mm	Polyester inner coating and polyamide-imide overcoat
Excitation:1 kV@ 0.5-2 kHz, PWM duty cycles= 0.85	Polyamide-imide, T= 40 µm, D= 1.5 mm
Excitation:10 kHz, Thermal: 20 °C	Ceramic coated wire: D= 0.8 mm, T= 10 µm; PEI-PAI coated wire: D= 0.8 mm, T= 28 µm
Thermal: 20-25 °C, RH= 30-40%	Polyamide-imide: D= 0.822 mm, T= 21.5, 34.5 and 41 µm Inner coating polyester-imide and outer coating polyamide-imide: D=0.75, T=20 µm
Excitation: 50/60 Hz	Polyamide-imide, D= 0.67 and 2.24 mm, T=40 µm
Excitation: PWM duty cycles=10, 50 and 90%, 100 and 1000 Hz, Thermal: 20 °C, 1 atm, RH= 40%,	D= 1.25 mm
Excitation: 500 Hz, rise time= 0.2 µs, fall time= 20 µs	Polyamide-imide, D= 1.4 mm, T= 45 µm
Excitation: sine, triangular and square waveforms with 10, 20 and 30 kHz	Modified Polyester, A16 gauge, T= 40 µm
Excitation: 50/60 Hz, Thermal: 220-260 °C	with and without nano-modified polyester glass fiber, D= 0.5 and 1 mm
Excitation: 50 Hz sinusoidal, 500 Hz square wave, 25 kHz surge wave	Polyamide-imide, D= 0.71 mm, T= 26.5 µm; Polyamide-imide with ceramic nanoparticles: D= 0.38 mm, T= 20 µm; polyamide-imide with unspecified nanoparticles, D= 1 mm, T= 42.5 µm
Excitation: 500 Hz	Polyamide-imide cellular coating, D= 1 mm, T= 0.37 µm
Excitation: 3kV@1kHz, rise time= 10,30,80 and 100 ns	Polyamide-imide, D= 1.5, T= 0.37 µm
Thermal: 25°C, RH= 40%	Polyamide-imide, D= 1.7, T= 50 µm

۸ ۸ استفاده از رزین‌های پلی‌اورتان

پلی‌اورتان‌ها از طریق مسیرهای مختلف از جمله اجازه دادن به بازیافت منابع زباله، حفظ و افزایش دوام مواد، حفظ کیفیت غذا یا تنوع زیستی و کاهش مصرف انرژی، نقش مهمی در حفظ منابع طبیعی زمین دارند.

با توجه به طول عمر و دوام بالای عایق‌های پلی‌اورتانی، نیاز به تعویض بسیار پایین است که همین مسئله به نوبه‌ی خود نقش مهمی را در کاهش مصرف انرژی و صرفه‌جویی در منابع ایفا می‌کند. نکته‌ی مثبت دیگر استفاده از عایق‌های پلی‌یورتان صرفه‌جویی در حمل و نقل است؛ زیرا آنها در مقایسه با سایر مواد عایق دارای وزن و حجم کمتری هستند.

تغییرات آب و هوایی به‌عنوان یک تهدید عمده و بلندمدت برای کره زمین شناخته شده و توافقات بین‌المللی برای اقدام مؤثر برای حل این مسئله صورت گرفته است.

اگرچه فرایند تهیه‌ی عایق‌های پلی‌اورتان مشابه بسیاری از فرایندهای ساخت سایر مواد عایق یا هر ماده‌ای که در ساختمان‌سازی، کارخانه‌ها یا تولید کالا استفاده می‌شود، کربن دی‌اکسید تولید می‌کند، برای تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی واقعی یک محصول، باید رد پای کربن را در کل عمر مفید آن بررسی کرد.

با نگاهی دقیق‌تر به آلایندگی‌های تولیدشده در مقابل صرفه‌جویی در میزان انتشار کربن دی‌اکسید در اثر استفاده از پلی‌اورتان می‌توان به نقش پلی‌اورتان پی برد:

- در تولید ۱ مترمربع پلی‌اورتان، معادل ۱۴ کیلوگرم کربن دی‌اکسید منتشر می‌شود.
- با نصب ۱ مترمربع عایق پلی‌اورتان، حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم کربن دی‌اکسید صرفه‌جویی می‌شود بنابراین، انتشار کربن دی‌اکسید ۱۳۰ برابر کاهش می‌یابد.

پلی‌اورتان کمترین میزان رسانایی گرمایی را در بین عایق‌های با حجم زیاد دارد، که با استفاده از ضخامت عایق کمتر ضمن دستیابی به بازده عایق‌بندی مشابه سایر مواد، باعث صرفه‌جویی در فضا نیز می‌شود. استفاده گسترده‌تر از فناوری موجود مبتنی بر فوم سخت پلی‌اورتان در سراسر اتحادیه اروپا، انتشار کل کربن دی‌اکسید را ۱۰٪ کاهش می‌دهد.

پلی‌یورتان‌ها از پلیمرهای پایه پتروشیمی هستند و مهم است که در صورت امکان از بازیابی آنها اطمینان حاصل شود تا مواد اولیه گران‌بها هدر نروند. بسته به نوع پلی‌یورتان، طیف وسیعی از روش‌های مختلف برای بازیافت وجود دارد.

هم پلی‌یورتان و هم فوم پلی‌یورتان قابل‌بازیافت هستند و در واقع، از طریق بازیافت شیمیایی زباله‌های پلی‌یورتان، مواد اولیه جدید برای تولید دوباره پلی‌یورتان به‌دست می‌آید. نتیجه را می‌توان در پانل‌های عایق یا پروفیل‌های جایگزین چوب یافت. این ماده اولیه همچنین می‌تواند در بخش‌های دیگر به‌عنوان مثال، برای ساخت نما، مبلمان، قاب پنجره‌ها، وسایل نقلیه و غیره مورداستفاده مجدد قرار گیرد.

هنگامی که پلی‌یورتان برای بازیافت مناسب نیست، بازیابی انرژی گزینه بعدی است. پلی‌یورتان حاوی همان میزان انرژی زغال‌سنگ است که آن را به یک خوراک بسیار کارآمد برای زباله‌سوزهای شهری تبدیل می‌کند. از انرژی به‌دست‌آمده می‌توان برای گرم کردن ساختمان‌های عمومی استفاده کرد.

۸ ۸ ۱ مزایا و ویژگی‌های پلی‌اورتان

طیف گسترده‌ای از سختی: طبقه‌بندی سختی پلی‌یورتان به ساختار مولکولی پروپلیمری متکی است.

ظرفیت تحمل بار و فشار بالا: پلی‌یورتان از نظر بار و فشار نیز از ظرفیت بالایی برخوردار است. پلی‌یورتان ممکن است تحت فشار سنگین دچار تغییر شکل شود اما پس از برداشته شدن فشار به شکل اصلی خود برمی‌گردد.

انعطاف‌پذیری: پلی‌اورتان‌ها هنگام استفاده در برنامه‌های با کشش بالا، عملکرد بسیار خوبی دارند. این ماده خواص خمشی، کشیدگی و بازیابی بسیار خوبی دارد.

مقاومت در برابر ضربه و سایش: برای مواردی که با فرسایش شدیدی روبه‌رو هستیم پلی‌یورتان‌ها حتی در دماهای بسیار پایین نیز راه حل ایدئالی هستند.

مقاومت در برابر پارگی: پلی‌یورتان‌ها دارای مقاومت بالایی در برابر پارگی و ضربه هستند، چرا که خاصیت کششی بالا دارند.

مقاومت در برابر آب، روغن و گریس: خواص مواد پلی‌اورتانی در آب، روغن و گریس پایدار می‌ماند (با حداقل تورم). ترکیبات پلی‌اتیتر پتانسیل ماندگاری چندین ساله در کاربردهای زیر آبی دارند.

خصوصیات الکتریکی: پلی‌اورتان‌ها عایق الکتریکی خوبی هستند.

دامنه انعطاف‌پذیری گسترده: انعطاف‌پذیری معمولاً تابعی از سختی است. برای کاربردهای الاستومری جذب شوک و ضربه، معمولاً از ترکیبات با انعطاف برگشتی کم، استفاده می‌شود (یعنی دامنه تاب‌آوری ۱۰–۴۰٪). برای ارتعاشات و لرزش‌های فرکانس‌بالا یا در جایی که بازیابی سریع لازم است، از ترکیباتی با انعطاف‌پذیری ۴۰–۶۵٪ استفاده می‌شود. به‌طورکلی، استحکام با مقاومت و انعطاف‌پذیری بالا، افزایش می‌یابد.

خواص پیونددهنده قوی: پلی‌اورتان در طی فرایند تولید با طیف گسترده‌ای از مواد پیوند می‌زند. این مواد شامل سایر پلاستیک‌ها، فلزات و چوب نیز هستند. این خاصیت باعث می‌شود پلی‌اورتان یک ماده ایدئال برای چرخ‌ها و غلطک‌ها باشد.

عملکرد در محیط‌های پرتنش: پلی‌اورتان در برابر تغییر دماهای شدید بسیار مقاوم است به این معنی که در شرایط سخت محیطی که سایر مواد شیمیایی کارایی خود را از دست می‌دهند، این ماده عملکرد بسیار مناسب دارد.

مقاومت در برابر کپک و قارچ: اکثر پلی‌اورتان‌های پایه پلی‌اتری، از رشد قارچ و کپک جلوگیری می‌کنند و برای محیط‌های گرمسیری و مرطوب بسیار مناسب هستند.

زمان تولید کوتاه و صرفه اقتصادی: در مقایسه با مواد ترموپلاستیک معمولی، پلی‌اورتان‌ها در زمان کمتر و با هزینه کمتری تولید می‌شوند.

۸ ۹ استفاده از گازهای فومینگ

از گازهای حاوی فلورین (HFC) به‌عنوان جایگزینی برای محصولات دیگر که بسیار تخریب‌کننده‌ی ازن هستند استفاده می‌شده است. از این محصولات به‌عنوان عامل فوم‌زا برای برخی از فوم‌های پلی‌یورتانی استفاده می‌شود و فوم‌های دیگر از انواع دیگر مواد کمک‌کننده‌ی ایجاد فوم استفاده می‌کنند.

بااین‌حال، HFC ها هنوز هم دارای پتانسیل گرمایش جهانی زیاد (GWP) هستند و برای مدت طولانی در جو باقی می‌مانند. اتحادیه‌ی اروپا مقرراتی را برای کنترل و محدود کردن استفاده از این محصولات و جایگزینی آنها با سایر محصولات که برای محیط زیست آسیب کمتری دارند، تصویب کرده است. بنابراین تکنولوژی تولید سیستم‌هایی مانند اسپری پلی‌یورتان در حال توسعه است که این سیستم‌ها پتانسیل گرمایش جهانی بسیار کم (۹۹/۹٪ کمتر) دارند و به لایه ازن آسیب نمی‌رسانند. افزون‌براین، آنها نه تنها با مقررات آینده مطابقت دارند، بلکه عملکرد عایق‌بندی عالی نیز دارند.

۸ ۱۰ راه‌اندازی خط تولید میکا

میکا یک ماده معدنی طبیعی که از مجموعه‌ای از کانی‌های سیلیکات تشکیل شده و در ساختار خود دارای مقادیر مختلفی از پتاسیم، آهن، آلومینیوم، منیزیم و آب است. از ویژگی‌های مهم میکا این است که دارای مقاومت الکتریکی و حرارتی بسیار بالایی دارد. بنابراین می‌تواند در صنایع مختلف کاربرد فراوانی داشته باشد. استفاده از میکا به‌عنوان یک عایق مناسب بسیار رواج دارد و محصولات مختلفی با استفاده از این ماده معدنی تولید شده است.

این ماده معدنی را می‌توان به‌صورت ورق‌ها و صفحه‌هایی با ضخامت مختلف در آورد. به دلیل مقاومت عالی در برابر الکتریکی، ضریب افت انرژی کم، خاصیت عایق‌بندی و مقاومت در برابر ولتاژ بالا، میکا یکی از مهم‌ترین مواد معدنی

مورداستفاده در صنایع برق و الکترونیکی است. میکای طبیعی کریستال‌های شش‌ضلعی با اندازه‌های مختلف را تشکیل می‌دهد. میکا معدنی در اصل به شکل کریستالی و به‌صورت لایه‌هایی روی هم تشکیل‌شده وجود دارد که می‌توان به راحتی آنها را لایه‌برداری کرده و به صفحات نازک با قطرهای خیلی کم تقسیم کرد.

۸ ۱۰ ۱ مزایای میکا

فواید میکا بسیار زیاد است. میکا یک ماده معدنی طبیعی است و در بیش از ۳۰ نوع مختلف وجود دارد، اما دو عضو متداول این خانواده معدنی عبارت‌اند از موسکویت (میکا سفید) و فلوگوپیت (میکا سبز). هر دو خواص ویژه‌ای دارند که می‌تواند آنها را برای کاربردهای مختلف مناسب کند. این دو نوع از میکا دارای خواص منحصربه‌فردی هستند که سبب می‌شود در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و تولیدی بتوان از آنها استفاده کرد.

در اصل میکا یک ماده عایق مقاوم است و به دلیل ساختار ویژه‌ای که دارد می‌تواند به ورق‌های نازک تقسیم شود با توجه به اینکه خصوصیات عایق‌بندی خود را حفظ کند. میکا هنگام قرار گرفتن در معرض گرمای شدید، در معرض نور، آب و برق، پایداری خود را حفظ می‌کند. در نتیجه از میکا در کوره‌های انفجار و مخازن استفاده گسترده‌ای می‌شود. همچنین در کابل‌های برق، در سیستم‌های اعلام حریق و سیستم امنیتی، و در بخاری و دیگ‌های بخار استفاده از میکا رواج دارد. به‌طور خلاصه، تطبیق‌پذیری میکا سبب شده است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع و بخش‌های مختلف داشته باشد.

میکا به شکل سنگی میکا از دل زین استخراج می‌شود. میکا یک نوع مواد معدنی است که به‌عنوان کانی‌های سیلیکات شناخته می‌شود. نام میکا ممکن است از کلمه لاتین micare گرفته شده باشد، که به معنی درخشش است. این ماده معدنی در هنگام قرار گرفتن در معرض نور، جلوه‌ای درخشان از خود بروز می‌دهد.

ورق‌های میکا یا انعطاف‌پذیر یا سفت هستند. از ورق‌های انعطاف‌پذیر به‌عنوان فویل عایق یا به‌عنوان جداکننده استفاده می‌شود. فرم سفت و سخت آن بیشتر در ساخت و ساز کوره مناسب است.

این ماده معدنی از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگون به‌دست می‌آید. میکا به‌صورت‌های مختلفی از جمله ورق میکای نرم و سخت، ورق میکا رولی و طلق میکا در بازار موجود است. محصولات میکا به‌صورت ورق میکا، لمینت، میکا رولی و بسیاری از محصولات میکا دیگر تولید می‌شود.

نوار نسوز میکا ترکیبی از پارچه فیبرشیشه‌ای، کاغذ میکا و فیلم پلی‌اتیلن ترفتالات آغشته شده با اپوکسی پلی‌استر است. نوار میکا هیچ‌گونه گاز سمی، هالوژن و آزبستی ندارد.

این ماده معدنی از گروه کانی‌های آلومینوسیلیکات است که در صنایع مختلف برای عایق‌بندی حرارتی و الکتریکی کاربرد فراوانی دارد. این عایق به دلیل مقاومت بالایی که در برابر حرارت و الکتریسیته دارد باعث شده که این ماده معدنی را در زمره مهم‌ترین عایق‌های حرارتی و الکتریکی قرار دهند.

میکا از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگون به‌دست می‌آید و آن را برای استفاده در صنایع به شکل ورق ورق شده در اندازه و ضخامت‌های مختلف در می‌آورند که این محصول به ورق میکا mica sheet مشهور است.

میکا به‌صورت‌های مختلفی از جمله ورق میکای نرم و سخت، ورق میکا رولی و طلق میکا موجود است. ورق میکا به علت تحمل بسیار بالایی که در حرارت و الکتریسیته دارند و تا ۸۵۰ الی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کند کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف به‌عنوان ماده نسوز و عایق الکتریکی دارد. خواص الکتریکی و مکانیکی بالای میکا همراه با چسبندگی کم و همچنین توانایی دور کردن گرما از خود باعث شده است که از آن در ساختن ترانزیستور استفاده شود و از میکاهای با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر برای ساختن پوشش برای سیم‌ها استفاده می‌شود. کاربرد این سیم‌ها بیشتر در مبدل‌های الکتریکی است، که باعث کوچک‌تر شدن و سبک‌تر شدن آنها می‌شود.

مقاومت بالای میکا درمقابل گرما، چگالی کم و مقاومت مکانیکی بالای آن باعث شده است که از آن در ساختن مقاومت‌های الکتریکی استفاده شود. همچنین میکا، به دلیل بالا بودن کیفیت در تولید لیزرهای هلیوم نئون فیلترهای اپتیکی مخصوص، آسترها و پوشش برای شیشه‌هایی که باید فشار بالای بخار را تحمل کنند، ساخت دیافراگم برای وسایل تنفس اکسیژن، وسایلی برای ردیابی و همچنین وسایلی برای سنجش گرما استفاده می‌شود.

۸ ۱۰ ۲ فرایند استخراج

میکا مانند یک کانی سیلیکات، که به‌صورت طبیعی تشکیل می‌شود، در سنگ‌های آذرین، که شامل چند لایه از مادهٔ آتش‌فشانی است، یافت می‌شود. در این مرحله، میکا به شکل کریستالی است و در معادن استخراج می‌شود. میکا هم به‌صورت زیرزمینی و هم به‌صورت روباز استخراج می‌گردد.

۸ ۱۰ ۲ ۱ استخراج زیرزمینی

استخراج زیرزمینی با حفر یک چاه در داخل پگماتیت با عمق و زاویه مناسب انجام می‌گیرد. این کار توسط ماشین‌های حفاری که با هوا کار می‌کنند یا به وسیله آتشباری انجام می‌شود. هنگامی که میکا یافت شد آن را با دقت تمام و بدون اینکه آسیبی به آن برسد به سطح منتقل می‌کنند. استخراج این نوع میکا بیشتر در هند در جایی که هزینه کارگر کمتر است و قوانین محیط زیستی از انعطاف بیشتری برخوردار هستند، انجام می‌گیرد.

۸ ۱۰ ۲ ۲ استخراج روباز

درحال‌حاضر میکاهای نوع یک در آمریکا از پگماتیت‌ها و میکاشیست‌های هوازده به‌دست می‌آیند. در این مورد معدن‌کاری به‌صورت روباز انجام می‌گیرد. در مورد مواد نرم از شاول، اسکراپر و لودر برای انتقال مواد استفاده می‌شود. در اغلب موارد کائولن، کوارتز و فلدسپار همراه میکا بازیابی می‌شوند.

در مورد استخراج میکا از سنگ‌های سخت احتیاج به عملیات حفاری و آتشباری است. بعد از عملیات آتشباری مواد به‌دست‌آمده توسط آسیا خرد می‌شوند و سپس توسط کامیون به کارخانه فرآوری برای بازیابی میکا، کوارتز و فلدسپار فرستاده می‌شود.

۸ ۱۰ ۳ روش‌های متداول فرآوری میکا

میکا را می‌توان با بازدهی بالا توسط روش‌های تغلیظ ثقلی بازیابی کرد، این در حالی است که کنسانتره نهایی بیشتر در اثر اختلاف در شکل ذرات به‌دست می‌آید تا اختلاف در وزن مخصوص کنسانتره میکا را می توان به دو صورت تر و خشک فرآوری کرد. فرآوری میکا در حالت تر به‌وسیله اسپیرال و توسط روشی به نام زیگزاگ انجام می‌گیرد. در حالتی که کنسانتره خشک باشد، کانی در دو مرحله توسط سنگ‌شکن فکی خرد می‌شود. بعد از سنگ شکن اول ذرات خردشده توسط سرند به پنج بخش ابعادی مختلف تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: ذرات درشت + (۱/۶۵) mm که این ذرات برای خردایش مجدد به داخل سنگ‌شکن بر می‌گردد. سه فراکسیون بعدی + (۱/۶۵) mm و4/0+8/0 mm و (۰/۴+۰/۱۵) هر کدام به‌صورت جداگانه بر روی میز فرآوری می‌شوند تا کنسانتره نهایی به‌دست آید. محصول میانی به‌دست‌آمده از هر کدام از میزها وارد سنگ‌شکن دوم شده و پس از خردایش مجدداً سرند می‌شوند تا اندازه‌های موردنظر به‌دست آید. عمده محصولات فرعی میکا که در کارخانه‌های فرآوری تولید می‌شود، عبارت‌اند از کائولن – کوارتز و فلسپار. در بعضی از کارخانه‌ها همه این محصولات تولید می‌شود درحالی‌که در بعضی دیگر یک یا دو مورد از آنها به‌عنوان محصول ارائه می‌شود. شیشه از نوع سیلیکا می‌تواند در بیشتر کارخانه‌های فرآوری میکا با اضافه کردن مقدار کافی از کوارتز به‌دست آید. درحال‌حاضر میکاهای نوع یک در آمریکا از پگماتیت‌ها و میکاشیست‌های هوازده به‌دست می‌آیند. در این مورد معدن‌کاری به‌صورت روباز انجام می‌گیرد. در مورد مواد نرم از شاول، اسکراپر و لودر برای انتقال مواد استفاده می‌شود. در اغلب موارد کائولن، کوارتز و فلسپار همرا میکا بازیابی می‌شوند. در مورد استخراج میکا از سنگ‌های سخت احتیاج به عملیات حفاری و آتشباری است. بعد از عملیات آتشباری مواد

به‌دست‌آمده توسط آسیا خرد می‌شوند و سپس توسط کامیون به کارخانه فرآوری برای بازیابی میکا، کوارتز و فلدسپار فرستاده می‌شود.

۸ ۱۰ ۴ معادن ایران

شامل موارد زیر می‌شود:

۱- معدن مسکوویت (میکا، فلدسپات) ماسوله: این معدن در فاصله حدود ۶۵ کیلومتری غرب شهرستان رشت و ۳۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان فومن واقع است. عمده این فاصله به جز چند کیلومتر انتهایی جاده آسفالته و بقیه جاده شوسه خاکی است.

ماده معدنی در داخل سنگ‌های آذرین دوران اول که تا حدود زیادی نیز دگرگون شده‌اند یافت و ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی استخراجی عمدتاً شامل کوارتز، فلدسپات و مسکوویت است. ذخیره این معدن طبق گواهینامه کشف صادره برای آن در حدود ۲۰۰۰۰ تن میکا و ۱۰۰۰۰۰ تن فلدسپات است. این معدن هم‌اکنون غیرفعال بوده و درحال‌حاضر عملیات اکتشافی با استفاده از اعتبارات بند (الف) بودجه سال ۱۳۷۹ توسط وزارت معادن و فلزات در غالب طرح اکتشاف سراسری میکا بر روی آن در حال انجام است.

۲- معدن میکا (بیوتیت) یا علی گوابر املش: این معدن که در بخش جنوبی محدوده اکتشافی این شرکت (پروانه حاضر) و در فاصله ۵ کیلومتری جنوب غربی مرکز شهرستان املش واقع است، به‌وسیله یک جاده شنی درجه ۳ به طول تقریبی ۳ کیلومتر به محل کارخانه فرآوری که متعلق به شرکت گیلان میکا است متصل بوده و به‌واسطه قرار داشتن در مجاورت روستای یا علی گوابر به این نام، نام‌گذاری شده است.

۳- معدن میکای قره باغ: این معدن در بین گردنه قوشجی و دریاچه ارومیه و در فاصله ۷۵ کیلومتری شهر ارومیه و در کنار روستای قره باغ واقع است. ذخیره قطعی این معدن با توجه به عمق سونداژ انجام شده حداکثر ۲۰ متری معادل ۱۱۵۰۰تن گزارش شده است. از این معدن هر دو نوع میکای سیاه و سفید (بیوتیت و مسکوویت) استخراج شد. این معدن هم‌اکنون هم فعال است.

از سایر معادن قابل‌توجه میکای کشور می‌توان به معادن زیر اشاره کرد:

۴- معدن میکای ناحیه‌ای یارم قیه خوی در استان آذربایجان غربی.

۵- معدن میکای ناحیه‌ای زارعان در ۲۴ کیلومتری شمال شرقی شهرستان خوی.

۶- معدن میکای زمان آباد و کمری منگاوی و کندهلان در استان همدان.

۸ ۱۰ ۴ ۱ حجم میکای موردنیاز کشور

انواع میکای مصرفی در کشور به‌صورت‌های ورقه‌ای، خرده میکا و میکای فلسی از همه انواع میکاها بوده و ضمناً خرده‌های میکا به‌صورت بلوک‌ها و ورقه‌های نازک به‌دست می‌آید که به‌صورت قالبی ساخته شده و برای ساختن کاغذ، میکا به‌کار می‌رود.

طبق آمارهای موجود کشور، با توجه به نیاز روزافزون صنایع مختلف به‌ویژه صنعت نفت، لاستیک‌سازی، متالوژی و ... سالیانه به حدود ۱۸۰۰ تن میکا نیاز است، که البته نزدیک به ۴۰ درصد آن در صنعت نفت (در بخش حفاری‌های نفتی) موردمصرف قرار می‌گیرد. از سایر واحدهای مصرف‌کننده‌ی این ماده ارزشمند و حیاتی می‌توان، صنایع لاستیک‌سازی کشور با مصرف سالیانه بیش از ۳۵۰ تن، صنایع تزئینی و آرایشی با مصرف ۱۵۰ تا ۲۰۰ تن و صنایع رنگ‌سازی، برق الکترونیک مجموعاً با بیش از ۴۰۰ تن اشاره کرد.

افزون بر موارد فوق‌الذکر مسئله‌ای دیگر که در مورد میکای تولیدی عمده معادن کشور وجود دارد این است که کیفیت این میکاها به‌مراتب نامناسب‌تر از میکای وارداتی بوده و عمده آنها قابلیت مصرف در صنایع استراتژیک نظیر شرکت ملی حفاری، صنایع متالوژی و برق و الکترونیک را ندارند.

۸ ۱۰ ۵ کاربردهای میکا

میکا یک ماده معدنی شگفت‌انگیز است که به دلیل ویژگی‌های خاص خود مخصوصاً مقاومت حرارتی بالا می‌تواند در طیف وسیعی از محصولات به‌کار گرفته شود. برای مثال در صنعت خودروسازی استفاده از این ماده بسیار رواج دارد. در لنت‌های ترمز و کلاچ‌ها از این ماده معدنی استفاده می‌شود. واشرهای حرارتی، عایق باتری اتومبیل از دیگر کاربردهای میکا در بخش خودروسازی است.

میکا در صنایع ریخته‌گری و فولاد، به‌عنوان روکش در ریخته‌گری تولید آهن و آلومینیوم استفاده می‌شود و ثبات فوق العاده‌ای را ارائه می‌دهد، بنابراین در حفظ دمای پردازش نقش اساسی را در مدیریت حرارتی بر عهده دارد.

از دیگر کاربردهای میکا می‌توان به استفاده از آن در صنایع هوا فضا و مصارف نظامی اشاره کرد. به دلیل سبک بودن و با دوام بودن محصولات ساخته‌شده با میکا می‌تواند به‌عنوان یک عایق حرارتی در بخش‌های مختلف این صنایع استفاده شود. برای مثال در فضاهای داخلی هواپیما و قطعات مختلف کاربرد گسترده‌ای دارد. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به استفاده از میکا در بخش خانگی اشاره کرد برای مثال در توستر، مایکوویو، سشوار، بخاری و دیگر وسایل برقی و... به وفور از قطعاتی که با میکا ساخته می‌شوند استفاده می‌گردد.

در رنگ‌دانه‌های رنگ‌ها می‌توان از میکا استفاده کرد چون که باعث روشن‌تر شدن رنگدانه‌های رنگی می‌شود. استفاده از میکا در تولید خمیردندان و مواد آرایشی به سبب براقیت و درخشان بودن آن نیز رواج دارد. استفاده از میکا به‌عنوان عایق آب در زیر شیروانی‌ها و در بلوک‌های بتونی نیز رایج است. در کار باغبانی نیز با اضافه کردن مقداری کمی به خاک می‌توان خاصیت خاک را بیشتر کرد.

۸ ۱۰ ۶ میکا موسکوویت و میکا فلوگوپیت

دو نوع از میکا که کاربرد گسترده‌ای دارند موسوم به میکای سفید یا موسکوویت و میکای فلوگوپیت هستند. استقامت ولتاژی میکا سفید نسبت به نوع فلوگوپیت بیشتر است. در موتورهای برق و ژنراتورها استفاده گسترده‌ای از میکا موسکوویت می‌شود. میکا موسکوویت را در بازار با نام میکای هندی نیز می‌شناسند. کاربرد فلوگوپیت در ساخت سرامیک‌سازی، لوازم عایق الکتریکی، سنگ نسوز، کاغ نسوز، طلق و لاستیک‌سازی است.

به دلیل اینکه میکا دارای اتلاف الکتریکی کم، مقاومت دی‌الکتریک بالا و همچنین پایداری حرارتی و قدرت قوی برشی و کششی است به‌عنوان عایق برق استفاده از آن بسیار به‌صرفه و اصولی است.

۸ ۱۰ ۷ انواع میکا

انواع میکا که در بازار موجود است شامل رول میکا، ورق میکا، نوار میکا و صفحه میکا هستند که در ادامه درمورد آنها توضیحاتی ارائه می‌شود.

۸ ۱۰ ۷ ۱ نوار نسوز میکا

نوار نسوز میکا ترکیبی از پارچه فیبرشیشه‌ای، کاغذ میکا و فیلم پلی‌اتیلن ترفتالات آغشته‌شده با اپوکسی پلی‌استر است.

استفاده از نوار نسوز میکا که در ساختار آن از کاغذ میکا، پارچه فیبر شیشه‌ای و پلی‌اتیلن ترفتالات استفاده می‌شود، برای افزایش امنیت کابل‌های ابزار دقیق و ثبت سیگنال در بیمارستان‌ها، سکوهای نفتی و تأسیسات نظامی و صنعتی و همچنین در تونل‌ها اهمیت زیادی دارد. زیرا در صورت آتش‌سوزی این سیم‌ها قادر هستند دمایی بین ۹۵۰ – ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را

تحمل کنند. ظرفیت گرمایی میکای مصنوعی ۱۲۰۰ درجه و میکا نوار طبیعی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد است. استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بالای این نوع نوارها باعث می‌شود که بتوان در تجهیزاتی که تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه با نوار کار می‌کنند از این نوع نوارها استفاده کرد. نوار میکا هیچ‌گونه گاز سمی، هالوژن و آزبستی ندارد.

۳ ۷ ۱۰ ۸ ورق میکا

میکاها برای کاربردهای تجاری به‌صورت ورق‌هایی با ضخامت‌ها و سایزهای مختلف برش داده می‌شوند. در ساخت واشرهای عایق، استفاده از ورق میکا رواج گسترده‌ای دارد. در کابین‌های ولتاژبالا به‌عنوان پشتیبانی مکانیکی و عایق الکتریکی استفاده از این نوع از ورق‌ها رایج است. همچنین در دستگاه‌های پرس فورج گرم و سرد برای پانل‌های آزبست از ورق‌های میکا استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این نوع ورق‌ها حرارت مقاومتی بالا، دی‌الکتریک، انعطاف‌پذیری و تقسیم شدن به ورق‌های نازک است.

۳ ۷ ۱۰ ۸ میکا رولی

لمینت‌های میکا که به‌صورت رول موجود هستند، از ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی و خنک‌کنندگی عالی برخوردارند و باعث می‌شود که آنها برای استفاده در کوره‌ها بسیار مناسب باشند. میکا رولی را با استفاده از ورق‌های میکا می‌سازند.

کوره‌های القایی در اندازه‌های مختلف ساخته می‌شوند. در فرایندهای ساخت آنها از مواد نسوز مختلفی استفاده می‌شود که یکی از این مواد پرکاربرد میکای رولی است. استفاده از میکا علاوه بر راحتی و سهولت نصب از دوام و مقاومت بالایی برخوردار است.

۸ ۱۱ راه‌اندازی خط تولید عایق کپتون در کشور

عایق الکتریکی کپتون (کاپتون) فیلمی از پلی‌آمید است که توسط شرکت DuPont آمریکا در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی تولید و توسعه یافت و در طیف گسترده‌ای از دما (۲۶۹- تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) در سفینه‌های فضایی، ماهواره‌ها، هواپیماها، تولید قطعات الکترونیکی، چاپ سه‌بعدی و همچنین در محیط خلأ استفاده شده است. کپتون به دلیل خاصیت دی‌الکتریک خوب و در دسترس بودن تبدیل به محصولی موردعلاقه به‌عنوان عایق الکتریکی در شیب حرارتی کم شده است. همچنین به علت سبک‌تر بودن نسبت به سایر عایق‌ها و مقاومت در مقابل اشعه ایکس، به‌طور گسترده در هواپیماهای نظامی و غیر نظامی و نیز در ساخت تلسکوپ فضایی جیمز وب مورداستفاده قرار گرفته است. با توجه به ثبات حرارتی و خاصیت ضد الکتریسیته نوار کپتون، معمولاً در صنایع الکترونیکی به‌عنوان یک عایق و محافظ در قطعات حساس و شکننده‌ی الکترواستاتیک استفاده می‌شود. خاصیت الکتریکی، هدایت حرارتی و چقرمگی مکانیکی ایدئال عایق کپتون برای کنترل و مدیریت حرارت باعث شده تا استفاده از آن در بخش‌های الکترونیکی و خودرو بسیار موردتوجه قرار گیرد [۵۳]-[۵۴]. راه‌اندازی خط تولید کپتون در کشور بسیار سودمند خواهد بود.

۸ ۱۲ راه‌اندازی خط تولید عایق نومکس در کشور

نومکس و پلیمرهای آرامیدی مشابه آن، از خانواده نایلون هستند، اما ستون فقرات آنها از نوع آروماتیک است. به همین دلیل سخت‌تر و مقاوم‌تر از نایلون هستند.

نومکس به‌عنوان نوعی پلیمر، از مقاومت حرارتی، شیمیایی و تشعشعی بالایی برخوردار است.

نومکس دارای نقطه ذوب ۳۷۱ درجه سانتی‌گراد است (درجه حرارتی که کالا به اتو می‌چسبد ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است) بنابراین مقاومت حرارتی آن فوق‌العاده زیاد است.

مقاومت شیمیایی آن نیز فوق‌العاده خوب است (تفلون تنها الیافی است که در این مورد از نومکس بهتر است).

اسید و قلیایی رقیق هیچ‌گونه اثری روی الیاف نمی‌گذارد اما اسید و قلیایی غلیظ خصوصاً در حرارت بالا مقاومتش را تا حدودی کاهش می‌دهد.

در مقابل حلال‌های آلی نظیر فنول، فرمیک اسید و متانول مقاوم است.

تثبیت حرارتی آن فوق‌العاده خوب است؛ به‌طوری‌که در درجه حرارت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد (نقطه‌ی ذوب نایلون‌های معمولی) این الیاف فقط ۲٪ ایجاد جمع‌شدگی می‌کند. در آب جوش نیز در حدود ۲٪ جمع می‌شود. استحکام الیاف در حدود ۵/۳ گرم بر دنیر (در حالت استاندارد) و در حالت خیس ۴/۱ گرم بر دنیر است. ازدیاد طول تا حد پارگی ۲۲٪ در حالت خشک و ۱۶٪ در حالت خیس است. چگالی نومکس ۱/۳۸ است. فشرده بودن ساختمان ملکولی الیاف باعث پایداری در مقابل حرارت و افزایش وزن مخصوص آن است.

نومکس ورق عایق الکتریکی کلاس F سه‌لایه با روکش Dupont NOMEX محصول شرکت دوپون (دوپونت) است.

نومکس برای عایق‌کاری در کلاس F و تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مناسب است.

هر ورق نومکس از سه لایه NMN (نومکس، مایلر، نومکس) تشکیل شده است.

هر ورق این عایق متشکل از فیلم پلی‌استر (مایلر MYLAR) با دو لایه کاغذ با سطح صاف ساخته‌شده از فیبرآرامیدی نومکس چسبیده‌شده در دو وجه آن است.

با توجه به قدرت کشسانی، مقاومت برابر پارگی و کلاس حرارتی بالای ورق عایق نومکس، NMN کیفیت خود را در زمینه ساخت ماشین‌های الکتریکی به اثبات رسانده و موقعیت‌های ویژه‌ای برای بهینه‌سازی در تولید موتورهای کلاس F به‌وجود آورده است.

خصوصیات استثنایی ورق عایق نومکس (نومکس مایلر نومکس) تنها به مدد مواد اولیه مورداستفاده در آن محقق می‌شود.

نوع چسبی که برای چسباندن لایه‌های مختلف استفاده می‌شود اهمیت ویژه‌ای دارد.

در طول فرایند ساخت این محصول، از دانش ساخت محصولات لایه‌ای استفاده شده که در طول دهه‌های متمادی تجربه به‌دست‌آمده و حاصل آن چسبی بوده است که ترکیب بهینه‌ای از مواد اولیه مورداستفاده را به‌وجود می‌آورد.

ویژگی‌های مطلوب الکتریکی و مکانیکی فیلم پلی‌استر در این محصول با ویژگی‌های فوق‌العاده‌ی شیمیایی و حرارتی نومکس و کاغذ آرامید تکمیل شده است.

۸ ۱۲ ۱ ویژگی‌های فنی نومکس [۵۴]

ویژگی اختصاصی کاغذ آرامید، مقاومت منحصربه‌فرد آن در برابر مواد شیمیایی و حلال‌ها، و افزون‌برآن پایداری آن برابر حرارت‌های بالا است.

به‌نحوی‌که در مقاومت دیاالکتریک و قدرت دیاالکتریک این کاغذها تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر محسوسی به وجود نمی‌آید (در مدت‌زمان کوتاه).

در نتیجه کاغذ آرامید از فیلم پلی‌استر برابر تأثیر مخرب اکسیداسیون و هیدرولیز و همچنین تخریب مکانیکی حتی در دماهای بالا محافظت می‌کند.

علاوه‌براین، با وجود سطح صاف و صیقل‌خورده کاغذ آرامید، رزین‌های اشباع‌کننده به خوبی به لایه نومکس مایلر نومکس نفوذ کرده و به آنها متصل می‌شوند.

به سبب مکانیزه شدن سیستم‌های تولید، زمانی که کلاف‌های سیم داخل شیارها قرار داده شده و فشرده می‌شوند، عایق استفاده‌شده برای سطح آن نیاز به خصوصیاتی دارد که موتور را برای زمان استفاده از کارایی واقعی آن (نه فقط در زمان تست) آماده کند.

به منظور پاسخ به این نیازها این شرکت عایق‌های الکتریکی‌ای علاوه بر خواص الکتریکی عالی، خواص مکانیکی بسیار خوب مانند مقاومت در برابر پارگی، قدرت انعطاف‌پذیر، تاپذیری، وصول انرژی، انعطاف، پایداری و صاف بودن و نرم بودن سطح را در این محصول فراهم کرده است.

این محصول در بازار ایران به‌صورت رول یک‌تکه با عرض ۹۰ سانتی‌متر به وزن ۲۵ کیلوگرم عرضه می‌شود.

۸ ۱۲ ۳ فرایند تولید نومکس [۵۴]

نومکس از طریق واکنش تراکمی بین مونومرهای ام–فنیلندیامین m-phenylendiamine و ایزوفتالویل کلراید isophthaloyl chloride تولید می‌شود.

نومکس هم به شکل رشته فیبر و هم ورق عرضه می‌شود. از رشته‌های نومکس برای ساخت پارچه‌های مقاوم برابر حرارت و شعله استفاده می‌گردد.

ورق نومکس در واقع نوعی کاغذ کلندر است و به روش مشابهی هم تولید می‌شود.

ورق نومکس تیپ ۴۱۰ اولین نوع از کاغذ نومکسی است که تولید شده و از نوع پرحجم این کاغذ به‌شمار می‌آید و بیشتر برای عایق‌سازی الکتریکی به‌کار می‌رود.

رشته فیبر نومکس در ایالات متحده آمریکا تولید می‌شود. راه‌اندازی خط تولید نومکس در ایران بسیار سودمند خواهد بود.

پیوست

پ-۱) توربوژنراتور



شرکت توربوژنراتور شاهرود (سهامی خاص)

طراحی، ساخت و بازسازی انواع ماشینهای الکتریکی

تاریخ ۹۸/۱۲/۱۹
شماره: ۹۸/ص/۸۱
پیوست: دارد ۲ برگ

شرکت پژوهشگاه نیرو

گروه ماشینهای الکتریکی دوار

جناب آقای مهندس ارسلان حکمتی

با سلام

احتراماً به پیوست پرسشنامه تکمیل شده شماره ۱ با موضوع نظرخواهی از ذینفعان صنعت عایقی ماشین های دوار حضورتان ارسال میگردد.

با تشکر

محمد علی طاهری پور

قائم مقام مدیر عامل

توربو GT ژنراتور

Website:www.turbogen.co.ir
Email : info@turbogen.co.ir

ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
OHSAS 18001:2007
ISO 10002:2014
ISO 10004:2012

دفتر مرکزی: تهران -خیابان آفریقا- نرسیده به میرداماد -کوچه شهید عمدی- پلاک۹ -طبقه سوم
تلفن: ۸۸۷۸۰۶۶۰ و ۶ -۸۸۶۷۶۲۷۵ و ۸۸۶۷۶۸۱۷ و ۸۸۶۷۶۳۸۴ و فاکس: ۸۸۷۹۸۶۹۵
دفتر خوزستان: اهواز -کیانپارس -خیابان ۱۹ شرقی -مجتمع آرین -واحد ۳۰۲
تلفن: ۰۶۱-۳۳۳۷۱۴۱۸ فاکس: ۰۶۱-۳۳۳۸۱۴۱۸
کارخانه: شاهرود -شهرک صنعتی -خیابان زنده یاد مهندس هامیان
تلفن: ۹ -۰۲۳-۳۲۵۱۱۴۳۷ و ۸ -۰۲۳-۳۲۵۱۱۳۹۱ و ۰۲۳-۳۲۵۱۱۴۵۷-۶۰ فاکس: ۰۲۳-۳۲۵۱۱۲۴۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۶-اگر فعالیتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های دوار انجام گردیده است، آیا در حال حاضر از آنها در پروسه تولید استفاده می شود ؟
بلی ■ خیر □

متناسب با تکنولوژی به کار رفته در الکتروموتورهای با تاریخ ساخت جدیدتر این امر طبیعتاً میبایست انجام پذیرد.

۷- چنانچه تغییراتی در پروسه تولید با هدف بهبود سیستم عایقی داده شده است، آیا این تجربه را موفق ارزیابی می کنید؟
بلی ■ خیر □
(در چه مواردی موفق یا ناموفق بوده است؟ میزان سود یا ضرر ناشی از این تغییر را چه میزان ارزیابی می کنید؟)

بکارگیری از روشهای ابداعی و بهینه سازی مصرف عایق در الکتروموتور موجبات بهبود شرایط کاری فراهم آمده است.

۸- آیا مواد عایقی یا سیستم های خاص، متفاوت از شرکتهای مشابه داخلی یا خارجی، در آن شرکت محترم استفاده می گردد؟
بلی □ خیر ■
توضیحات در صورت امکان:

۹- چه پیشنهاداتی جهت بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی دارید؟

گردآوری اطلاعات گرافهای حرارتی ماشینهای الکتریکی در چند شاخه مشخص شامل صنعت نیروگاهی و ... و دیگر بازه زمانی 5ساله و بررسی های روی آنها با تمام کلیه عملیات بازسازی که روی آنها صورت گرفته میتواند در ارتقاء سیستم عایقی ماشینهای الکتریکی مؤثر باشد.

۱۰- مهمترین عیوبی که در سیستم عایقی ماشینهای تولیدی آن شرکت تجربه گردیده است، چه عیوبی ست و ناشی از چه عواملی ارزیابی می گردد؟ میزان هزینه رفع این عیب را حدودا به چه میزان پیش بینی می کنید؟

ضعف عایقی در سیمهای لاکی تولید داخل

۱۱- آیا توصیه خاصی جهت افزودن پرسش به این پرسشنامه یا ارسال آن به شرکت های عایقی بخصوص یا سازندگان موتور مشخصی دارید؟

- چگونگی بهبود رسانایی حرارتی عایق الکتریکی
- روشهای عملی برای بهبود لاک در سیمهای لاکی بخصوص در کاربردهای کنترلی با درایو.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

گروه ماشینهای الکتریکی دوار	پرسشنامه شماره ۱ نظرخواهی از ذینفعان صنعت عایقی ماشین های دوار	نام شرکت : تاریخ :

۱- به نظر شما، آیا بهبود ساختار عایقی ماشین های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیا در محصولات آن شرکت ضرورت دارد ؟ بلی ■ خیر □

توضیحات :

این موضوع امری ضروری و حیاتی است . زیرا ساختار عایقی به عنوان یکی از مهمترین بخشهای عایقی میتواند موجب افزایش طول عمر و در نهایت افزایش راندمان شود.

۲- حساس‌ترین (پر تنش‌ترین) نواحی سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی تولید شده در آن شرکت را چه ناحیه‌هایی ارزیابی می کنید؟ دلیل این حساسیت را توضیح فرمایید.

سیستم عایقی الکتروموتورهای کنترل شده توسط درایو . به دلیل وجود راندمانهای (پیک) ولتاژی بالا و تأثیر مخرب آن همچنین بخشهای عایقی در پیشانی کوئلهل بر روی عایق.

۳- بهبود سیستم عایقی را در کدام یک از محصولات آن شرکت مهم تر ارزیابی می کنید (با چه رده ولتاژی و توانی)؟ لطفا به ترتیب اهمیت ذکر فرمایید.

در الکتروموتورهای MV و HV به دلیل آنکه نیازمند بهبود خاصیت عایقی الکتریکی همزمان با بهبود ویژگی رسانایی حرارتی هستیم که این کار نیازمند بهره گیری از عایقهای مرغوب تر با ضخامت کمتر و یا رسانایی حرارتی بهتر است.

۴- آیا تا کنون فعالیتی در خصوص بهبود ساختار عایقی ماشینهای الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیا ، در آن شرکت انجام شده است؟

بلی ■ خیر □

توضیحات :

با توجه به اینکه یکی از فعالیت این شرکت باز سیم پیچی و تقویت عایقی ماشینهای الکتریکی میباشد و از طرفی در ماشینهای ارسالی تکنولوژی روز استفاده شده است که به ناچار ما نیز میبایست دائماً و به موازات کارخانجات سازنده از آخرین مواد عایقی تولیدی با تکنولوژی روز استفاده نمایم.

۵- اگر مطالعاتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی انجام نشده است، دلیل آن را چه ارزیابی می کنید؟ آیا فکر می کنید در صورت ارائه پیشنهاد برای بهبود سیستم عایقی (با ارائه توجیه اقتصادی)، مورد استقبال و استفاده آن شرکت محترم قرار خواهد گرفت؟

قطعاً ارائه پیشنهاد به شرکت توربوژنراتور مورد استقبال واقع خواهد شد و چنانچه با توجه به پیشنهادات تهیه متریال قابل الجام باشد ، این امر مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

پ-۲) جهاد دانشگاهی خواجه نصیر



جهاد دانشگاهی
سازمان جهاد دانشگاهی خواجه نصیرالدین طوسی

جمهوری اسلامی ایران
بسمه تعالی

شماره: ۹۹/۱۲/۱۹۸۷/ص
تاریخ: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵
پیوست: دارد

برادر گرامی جناب آقای مهندس قائم پناه
مدیر محترم گروه پژوهشی ماشین های الکتریکی پژوهشگاه نیرو
موضوع: پاسخ به پرسشنامه

با سلام و احترام

بازگشت به نامه شماره ۹۹/۳۰۰/۱۷۷۶ مورخ ۹۹/۰۳/۲۷، موضوع مواد و سیستم‌های عایقی موتورهای الکتریکی، به پیوست پاسخ به پرسشنامه ارسالی، به حضور ابلاغ می‌گردد.

سام روزبهانی
سرپرست معاونت پژوهشی

جهاد دانشگاهی
سازمان جهاد دانشگاهی خواجه نصیرالدین طوسی

نشانی: تهران، خیابان شریعتی
تقاطع بزرگراه رسالت، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
تلفن: ۸۸۴۶۶۲۰۰ (خط ویژه)
ورنگار: ۸۸۴۶۶۲۰۰ (داخلی ۳۰۰)
صندوق پستی: ۳۱۴۱ - ۱۶۳۱۵
پست الکترونیک:
Sec.tuts@aeoer.ac.ir

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

گروه ماشینهای الکتریکی دوار	پرسشنامه شماره ۱ نظرخواهی از ذینفعان صنعت عایقی ماشین های دوار	نام شرکت : تاریخ :

۱-به نظر شما، آیا بهبود ساختار عایقی ماشین های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیا در محصولات آن شرکت ضرورت دارد ؟ بلی ■ خیر □

توضیحات :

بحث انواع عایق‌های الکتریکی بسته به رنج ولتاژ شکست، دمای کاری و استحکام مکانیکی آنها در تولید محصولات مختلف این مجموعه همواره مطرح می‌باشد.

۲-چه نوع مواد عایقی، با چه مشخصاتی و با چه میزان حجم مصرفی سالانه (از نظر قیمت) در سیستم عایقی محصولات آن شرکت استفاده می گردد؟ مایه امتنان است چنانچه به تفکیک محصول و با ذکر سازنده ماده عایقی (داخلی یا خارجی) عنوان فرمایید.

میزان مصرف عایق‌های الکتریکی در این مجموعه ارتباط مستقیم با تیراژ تولید داشته و با توجه به تنوع محصولات و عایق‌های الکتریکی نمی‌توان عدد مشخصی برای آن تعیین کرد. عایق‌های مورد استفاده در این مجموعه برای ترانسفورماتورهای الکتریکی انواع عایق‌های کاپتون دار و لاک های عایق حرارتی با کلاس **f** مورد استفاده قرار می گیرند. در موتورهای الکتریکی با ولتاژ پائین از عایق‌های نومکس با ضخامت های مختلف و قابلیت تحمل تنش مکانیکی و تحمل حرارتی کلاس **f** و سطح ولتاژ شکست ۶ کیلو ولت مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-کدام شرکت ها را عمده ترین سازندگان و تولید کنندگان مواد عایقی ماشین های الکتریکی در داخل و خارج کشور ارزیابی می نمایید؟

کاربران عمده این مواد عایقی را در داخل کشور کدام کارخانجات ارزیابی می کنید؟ آیاتخمینی از حجم بازار آنها دارید؟

محصولات آلمان و سوئیس در زمینه عایق‌های الکتریکی محبوبیت بسیاری داشته و در داخل کشور علاوه بر این مجموعه تمام کارخانجات ترانسفورماتور سازی از قبیل ایران ترانسفو، کوشکن، نیرو ترانس و .... کارخانجات الکتروموتورسازی از قبیل موتوژن، جمکو و ..... و شرکت های سیم و کابل از مصرف کنندگان عمده عایق‌های الکتریکی می‌باشند.

۴- حساس‌ترین (پر تنش‌ترین) نواحی سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی تولید شده در آن شرکت را چه ناحیه‌هایی ارزیابی می کنید؟ دلیل این حساسیت را توضیح فرمایید.

این حساسیت در محصولات مختلف متفاوت است. در مورد عایق‌های بکار رفته در ترانسفورماتورها حساسیت بیشتر بر روی میزان تحمل حرارت و سطح ولتاژ عایقی می‌باشد. درمورد موتورها و ژنراتورهای الکتریکی با ولتاژ فشار ضعیف بیشتر بر روی ضخامت عایق و قدرت تحمل تنش مکانیکی و حرارتی می‌باشد. در موتورهای با ولتاژ کاری بالا (چند کیلو ولتی) بیشتر بحث سطح ولتاژ عایقی مطرح می‌باشد.

۵- بهبود سیستم عایقی را در کدام یک از محصولات آن شرکت مهم تر ارزیابی می کنید (با چه رده ولتاژی و توانی)؟ لطفا به ترتیب اهمیت ذکر فرمایید.

در حال حاضر بیشترین نیاز در این مجموعه به عایق‌های الکتریکی با ضخامت ۰.۱ میلی متر با استحکام مکانیکی مناسب و تحمل دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد و نقطه شکست عایقی بالای ۳ کیلو ولت می‌باشد که در حال حاضر از جنس‌های آلمانی استفاده می‌شود.

همچنین از پوشش‌های رنگ (به عنوان لاک) برای عایق الکتریکی نیز استفاده می‌شود که این رنگ ها نیز تحمل دمایی ۱۵۰ درجه سانتیگراد و ولتاژ شکست بالای ۵ کیلو ولت دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۶-آیا تاکنون فعالیتی در خصوص بهبود ساختار عایقی ماشین های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیا، در آن شرکت انجام شده است؟

بلی ■ خیر □

توضیحات :

بحث عایق الکتریکی یکی از بحث های جاری در این مجموعه بوده و با توجه به تنوع محصولات تولیدی و کاربری های بعضاً خاص این محصولات همواره به عایق‌های الکتریکی مختلف با مشخصات متفاوت نیاز بوده و در این زمینه تحقیقات صورت پذیرفته است. البته این تحقیقات محدود به تست عایق‌ها و انتخاب عایق مناسب از بین محصولات موجود در بازار داخل و یا خارج بوده است.

۷- اگر مطالعاتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی انجام نشده است، دلیل آن را چه ارزیابی می کنید؟ آیا فکر می کنید در صورت ارائه پیشنهاد برای بهبود سیستم عایقی (با ارائه توجیه اقتصادی)، مورد استقبال و استفاده آن شرکت محترم قرار خواهد گرفت؟

در صورتی که شرکتی قادر به تولید و تامین عایق‌های الکتریکی باشد که دارای مشخصات مدنظر این مجموعه بوده و قابلیت رقابت با محصولات خارجی را داشته باشد حتماً استقبال نموده و آماده بررسی نمونه های تولیدی هستیم

۸-اگر فعالیتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های دوار انجام گردیده است، آیا در حال حاضر از آنها در پروسه تولید استفاده می شود ؟ بلی □ خیر □

بحث عایق الکتریکی یکی از بحث های جاری در این مجموعه بوده و با توجه به تنوع محصولات تولیدی و کاربری های بعضاً خاص این محصولات همواره به عایق‌های الکتریکی مختلف با مشخصات متفاوت نیاز بوده و در این زمینه تحقیقات صورت پذیرفته است. البته این تحقیقات محدود به تست عایق‌ها و انتخاب عایق مناسب از بین محصولات موجود در بازار داخل و یا خارج بوده است.

۹- چنانچه تغییراتی در پروسه تولید با هدف بهبود سیستم عایقی داده شده است، آیا این تجربه را موفق ارزیابی می کنید؟ بلی ■ خیر □

(در چه مواردی موفق یا ناموفق بوده است؟ میزان سود یا ضرر ناشی از این تغییر را چه میزان ارزیابی می کنید؟)

بسته به نوع محصول تولیدی این مجموعه همواره در تلاش برای بهبود سیستم عایقی بوده و نسبت به شرایط سعی در انتخاب بهترین عایق ممکن را داشته است.

۱۰-آیا مواد عایقی یا سیستم های خاص، متفاوت از شرکتهای مشابه داخلی یا خارجی، در آن شرکت محترم استفاده می گردد؟ بلی ■ خیر □

توضیحات در صورت امکان:

تمامی عایق‌های الکتریکی به کار رفته در محصولات این مجموعه بسته به سطح ولتاژ دمای کاری و مشخصات مکانیکی عایق‌ها می بایست ویژگی های بخصوصی داشته باشند.

۱۱- ضعف سیستم عایقی ماشین های الکتریکی دوار را در حالت کلی در چه مواردی ارزیابی می نمایید؟ چه پیشنهاداتی جهت بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی دوار در حالت کلی دارید؟

قابلیت تحمل دمایی این عایق‌ها و استحکام مکانیکی آنها در مقابل خراش، کشش و بعضاً خم شدن از مواردی است که موجب بالا یا پائین رفتن کیفیت عایق‌ها می شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۱۲- مهمترین عیوبی که در سیستم عایقی ماشینهای تولیدی آن شرکت تجربه گردیده است، چه عیوبی ست و ناشی از چه عواملی ارزیابی می گردد؟ رفع این عیب را به چه طریق و حدودا با چه میزان هزینه پیش بینی می کنید؟ قابلیت تحمل دمایی این عایق‌ها و استحکام مکانیکی آنها در مقابل خراش، کشش و بعضاً خم شدن از مواردی است که موجب بالا یا پائین رفتن کیفیت عایق‌ها می شود.
۱۳- آیا توصیه خاصی جهت افزودن پرسش به این پرسشنامه یا ارسال آن به شرکت های عایقی بخصوص یا سازندگان موتور مشخصی دارید؟ بحث عایق‌های الکتریکی بحث گسترده ای بوده و نمی توان عایقی که مناسب برای تمام مصارف باشد تولید کرد. واضح است که عایق‌های فشار قوی مشخصات و کلاس حرارتی مخصوص به خود را داشته و عایق‌های فشار ضعیف قابلیت های متفاوتی دارند. به طور کلی برای هر محصول عایق بخصوصی مورد نیاز می باشد که بتواند سطح عایقی استاندارد متناسب با آن محصول را تامین نموده و تحمل دمای کاری مورد نیاز را داشته باشد. با توجه به محدودیت فضا در بسیاری از کاربردهای عایق‌های الکتریکی بخصوص در ماشین های دوار با ولتاژ پائین داشتن ضخامت کم با قابلیت های بالا بسیار مهم می باشد.
نام و نام خانوادگی و سمت کارشناس: فرشید نجاتی مسئول مهندسی و نظارت مرکز ماشین های الکتریکی جهاد دانشگاهی خواجه نصیر الدین طوسی

پ-۳) جمکو



JEMCO

شرکت صنایع ماشینهای الکتریکی جوین(جمکو)
Jovain Electrical Machines Industries Co.

تاریخ:
شماره:
پیوست:

۱۳۹۹/۰۵/۲۰
۸۴۱/ک ج/۹۹
دارد

جناب آقای مهندس قائم پناه

مدیر محترم گروه پژوهشی ماشین های الکتریکی پژوهشگاه نیرو

موضوع: ارسال اطلاعات

سلام علیکم؛

احتراماً بازگشت به نامه شماره ۹۹/۳۰۰/۱۷۷۶ مورخ ۱۳۹۹/۰۳/۲۷، بپیوست اطلاعات مورد نیاز آن مجموعه در خصوص مواد و سیستم عایقی موتورهای الکتریکی جهت استحضار و بهره برداری لازم تقدیم حضور می گردد.

و من الله التوفیق
محمدرستمیان
مدیر عامل و نائب رئیس هیات مدیره

۱۳۹۹ /۵/ ۲۰

دفتر مرکزی: تهران، خیابان طالقانی، جد از چهارراه بهار، خیابان جهان، بن بست بنیاد، پلاک ۳، طبقه اول
کدپستی: ۱۵۶۳۶۴۷۳۱۳ تلفن: ۰۲۱-۷۷۵۳۲۴۰۱-۷۷۵۳۲۱۹۳-۷۷۵۳۲۵۴۴ فکس: ۰۲۱-۷۷۵۳۲۷۹۵
کارخانه: سبزوار، کیلومتر ۴۵ جاده سبزوار - اسفراین کدپستی: ۹۶۱۸۸۳۶۴۹۷ صندوق پستی ۴۴۲
تلفن: ۰۵۱-۴۴۶۴۵۸۰۲ (۵ خط) ۰۵۱- ۵۸۲۸۵۲۶۹-۷۱ فکس: ۰۵۱-۴۴۶۴۴۴۲

Head Office: Unit 1, No. 2, Bonyad dead end, Jahan Ave., Talegani st., Tehran, Iran
Postal Code: 1563637313 Tel: +9821-77532594 - 77532401-77531993 Fax:+9821-77532795
Factory: 45 th km, Sabzevar-Esfarayen road, Sabzevar, Khorasan Razavi, Iran
Postal Code: 9618836897 Tel: +9851-56265269-71 +9851-44645602 Fax:+9851-44664434

Economic Code: 411193685877

www.jemcomotor.ir
sales@jemcomotor.ir

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

گروه ماشینهای الکتریکی دوار	پرسشنامه‌شماره ۱ نظرخواهی از ذینفعان صنعت عایقی ماشین های دوار	نام شرکت : تاریخ :

۱- به نظر شما، آیا بهبود ساختار عایقی ماشین های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیادر محصولات آن شرکت ضرورت دارد ؟ بلی □
خیر □
توضیحات :
بله برای کاهش ضخامت عایق در داخل شیار و رقابت پذیر شدن محصولات از نظر اندازه با پیشروان صنعت تولید الکتروموتور فشارقوی

۲- چه نوع مواد عایقی، با چه مشخصاتی و با چه میزان حجم مصرفی سالانه (از نظر قیمت) در سیستم عایقی محصولات آن شرکت استفاده می گردد؟ مایه امتنان است چنانچه به تفکیک محصول و با ذکر سازنده ماده عایقی (داخلی یا خارجی)،عنوان فرمایید.
پیوست است

۳- کدام شرکت ها را عمده ترین سازندگان و تولید کنندگان مواد عایقی ماشین های الکتریکی در داخل و خارج کشور ارزیابی می نمایید؟
کارمزان عمده این مواد عایقی را در داخل کشور کدام کارخانجات ارزیابی می کنید؟ آیاتخمینی از حجم بازار آنها دارید؟
به پیوست مراجعه شود

۴- حساس‌ترین (پر تنش‌ترین) نواحی سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی تولید شده در آن شرکت را چه ناحیه‌هایی ارزیابی می کنید؟ دلیل این حساسیت را توضیح فرمایید.
داخل شیار

۴- بهبود سیستم عایقی را در کدام یک از محصولات آن شرکت مهم تر ارزیابی می کنید (با چه رده ولتاژی و توانی)؟ لطفا به ترتیب اهمیت ذکر فرمایید.
هر چه فشار الکتریکی بیشتر اولویت بالاتر

۶-آیا تاکنون فعالیتی در خصوص بهبود ساختار عایقی ماشین های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی های عایقی روز دنیا، در آن شرکت انجام شده است؟
بلی □ خیر □
توضیحات :
تلاش میشود از بالاترین کیفیت استفاده شود

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

ID	ELINAR	VON ROLL
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

Description ISOVOLTA	BaoSteel or Tisco

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

FAG or SKF	Unit	Quantity	JFMCO CODE	Comment
	m	3600		180,000
	m²	4500		4,500
	m	1000		50,000
	m²	6025		500,000
	m²	1400		70,000
	m	240		12,000
	m	12		600
	m	800		40,000
	m	6024		500,000
	kg	60		60
	m²	400		20,000
	liter	5,000		
	Kg	1,200,000		مقادیر فوق پیشبینی میباشد
	No	0		
	Set	400,000		
Ball bearing 6309C3	pce	1,200		
Ball bearing 6314C3	pce	1,300		
Ball bearing 6312C3	pce	1,200		
Ball bearing 6330C3	pce	850		
Ball bearing 6310C3	pce	700		
Ball bearing 6315C3	pce	600		
Ball bearing 6319C3	pce	1,000		
Ball bearing 6322C3	pce	250		
Ball bearing 6324C3	pce	30		
Ball bearing 6214C3	pce	0		
Roll bearing NU324ETNHC3	pce	30		

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

پ-۴) ژنراتور مپنا – پارس

گروه ماشین‌های الکتریکی دوار	**پرسشنامه شماره ۱** **نظرخواهی از ذینفعان صنعت عایقی ماشین‌های دوار**	**نام شرکت : مهندسی و ساخت ژنراتور مپنا – پارس** **تاریخ : ۱۳۹۹/۰۷/۱۳**

۱- به نظر شما، آیا بهبود ساختار عایقی ماشین‌های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی‌های عایقی روز دنیا در محصولات آن شرکت ضرورت دارد؟ بلی ☐ خیر ☐

توضیحات :

بهبود سیستم‌های عایقی از جهت کاهش ضخامت عایق در سطح خواص موردانتظار یکسان (ولتاژ – کلاس دمایی و ...) حائز اهمیت است. همچنین افزایش Thermal conductivity در کنار بالا بردن عمر مفید سیستم عایقی در بهبود سیستم عایقی و به تبع آن، محصولات تولیدی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدیهی است رصد تکنولوژی‌های جدید و اعمال بهبودهای متناسب با تغییرات تکنولوژی همواره موردتوجه است.

۲- چه نوع مواد عایقی، با چه مشخصاتی و با چه میزان حجم مصرفی سالانه (از نظر قیمت) در سیستم عایقی محصولات آن شرکت استفاده می‌گردد؟ مایه امتنان است چنانچه به تفکیک محصول و با ذکر سازنده ماده عایقی (داخلی یا خارجی) عنوان فرمایید.

انواع مختلف متریال‌های عایقی اعم از انواع پلیت‌ها – pipe ها و Round bar های فایبرگلاس، نوارهای عایقی، چسب، رزین، نوارهای نیمه‌هادی و لاستیک‌ها و رنگ در پوزیشن‌های مختلف عایقی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

تأمین کنندگان متریال‌های عایقی عبارت‌اند از:

فایبرگلاس: Isovolta – Krempel-Vonroll

نوارهای عایقی و نیمه‌هادی : Isovolta – Vonroll – Nippon rika

چسب: Huntsman – 3M – Henkel

رزین: Vonroll – Elantas – Huntsman

لاستیک: شرکت امگا – شرکت مباشران

رنگ: رنگین زره – رنگان – سمن–روناس

۳- کدام شرکت‌ها را عمده‌ترین سازندگان و تولیدکنندگان مواد عایقی ماشین‌های الکتریکی در داخل و خارج کشور ارزیابی می‌نمایید؟

کاربران عمده این مواد عایقی را در داخل کشور کدام کارخانجات ارزیابی می‌کنید؟ آیاتخمینی از حجم بازار آنها دارید؟

شرکت‌های خارجی: Vonroll – Isovolta – Krempel – Nippon rika – Elantas و ...

شرکت‌های داخلی که عمدتاً درزمینه خرید رنگ ولاستیک مورداستفاده قرار می‌گیرند: رنگین زره – رنگان – سمن– روناس – امگا – مباشران

تخمینی از حجم بازار در اختیار نیست.

۴- حساس‌ترین (پرتنش‌ترین) نواحی سیستم عایقی ماشین‌های الکتریکی تولیدشده در آن شرکت را چه ناحیه‌هایی ارزیابی می‌کنید؟ دلیل این حساسیت را توضیح فرمایید.

مهم‌ترین بخش، سیستم عایقی شینه‌های استاتور است که بیشترین تنش الکتریکال بر روی این قسمت وجود دارد و اکثر تست‌ها و کنترل‌ها در حین فرایند تولید و پایش شرایط سیستم عایقی در زمان بهره‌برداری بر روی این بخش از ماشین، انجام می‌شود.

۵- بهبود سیستم عایقی را در کدام یک از محصولات آن شرکت مهم‌تر ارزیابی می‌کنید (با چه رده ولتاژی و توانی)؟ لطفا به ترتیب اهمیت ذکر فرمایید.

هر چقدر سطح ولتاژ و توان الکتریکی محصولات افزایش پیدا می‌کند، بهبود سیستم‌های عایقی و کیفیت آن از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. بنابراین بهبود سیستم‌های عایقی در ژنراتورهای نیروگاهی اعم از گاز و بخار که دارای سطح ولتاژ بالا و سطح توان الکتریکی بالایی هستند از بیشترین اهمیت برخوردار است.

۶-آیا تاکنون فعالیتی در خصوص بهبود ساختار عایقی ماشین‌های الکتریکی و استفاده از تکنولوژی‌های عایقی روز دنیا، در آن شرکت انجام شده است؟

بلی ☐ خیر ☐

توضیحات :

کاهش ضخامت نوارهای عایقی ژنراتورهای گازی 160 MW شرکت با استفاده از نوارهای عایقی تکنولوژی جدید شرکت ISOVOLTA (تکنولوژی FAB) که علاوه بر کاهش ضخامت عایقی، دارای Thermal conductivity بالاتر و عمر مفید بیشتر نسبت به متریال‌های اولیه بودند.

۷- اگر مطالعاتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی انجام نشده است، دلیل آن را چه ارزیابی می کنید؟ آیا فکر می کنید در صورت ارائه پیشنهاد برای بهبود سیستم عایقی (با ارائه توجیه اقتصادی)، مورد استقبال و استفاده آن شرکت محترم قرار خواهد گرفت؟

مطابق با موارد توضیح‌داده‌شده در پاسخ سوال ۶، بهبود سیستم عایقی در داخل شرکت انجام شده است.

۸-اگر فعالیتی در زمینه بهبود سیستم عایقی ماشین های دوار انجام گردیده است، آیا در حال حاضر از آنها در پروسه تولید استفاده می شود ؟ بلی ☐ خیر ☐

بر مبنای اصلاح فوق، ژنراتورهای گازی 160MW که درحال‌حاضر در شرکت تولید می‌گردند با استفاده از سیستم عایقی جدید است. ضمن آنکه استفاده از تکنولوژی FAB، زمینه ارتقای توان محصول فوق و تولید ژنراتورهای 185MW را نیز فراهم کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

۹- چنانچه تغییراتی در پروسه تولید با هدف بهبود سیستم عایقی داده شده است، آیا این تجربه را موفق ارزیابی می کنید؟

بلی ☐ خیر ☐

(در چه مواردی موفق یا ناموفق بوده است؟ میزان سود یا ضرر ناشی از این تغییر را چه میزان ارزیابی می کنید؟)

با توجه به موارد ذکرشده در پاسخ سوال ۸، تجربه بهبود سیستم عایقی منجر به نتایج مثبت و عملی شده است.

۱۰-آیا مواد عایقی یا سیستم‌های خاص، متفاوت از شرکتهای مشابه داخلی یا خارجی، در آن شرکت محترم استفاده می گردد؟ بلی ☐ خیر ☐

توضیحات در صورت امکان:

سیستم‌های عایقی متنوعی در شرکت مورداستفاده قرار می‌گیرد که تمامی آنها دارای مشابه خارجی هستند.

۱۱- چه پیشنهاداتی جهت بهبود سیستم عایقی ماشین های الکتریکی دارید؟

استفاده از مواد با کیفیت بالا – پایش مستمر سیستم‌های عایقی جهت تخمین صحیح عمر مفید و شناسایی عوامل تأثیرگذار بر کاهش عمر مفید سیستم‌های عایقی

۱۲- مهمترین عیوبی که در سیستم عایقی ماشینهای تولیدی آن شرکت تجربه گردیده است، چه عیوبی ست و ناشی از چه عواملی ارزیابی می گردد؟ میزان هزینه رفع این عیب را حدودا به چه میزان پیش بینی می کنید؟

مهم‌ترین عیوب شامل آسیب دیدن شینه‌های استاتور به دلیل بروز خطا مانند اتصال کوتاه و یا پیری سیستم عایقی و یا آسیب فیزیکی ناشی از صدمات مکانیکی در این ناحیه است. بسته به شدت آسیب و نوع سیستم عایقی استاتور که یکپارچه (GVPI) و یا غیر یکپارچه (Resin Rich or SVPI) باشد. اصلاح می‌تواند در حد تعویض یک عدد شینه تا کل سیستم عایقی استاتور متغیر و به تبع هزینه انجام اصلاحات نیز تغییر کند.

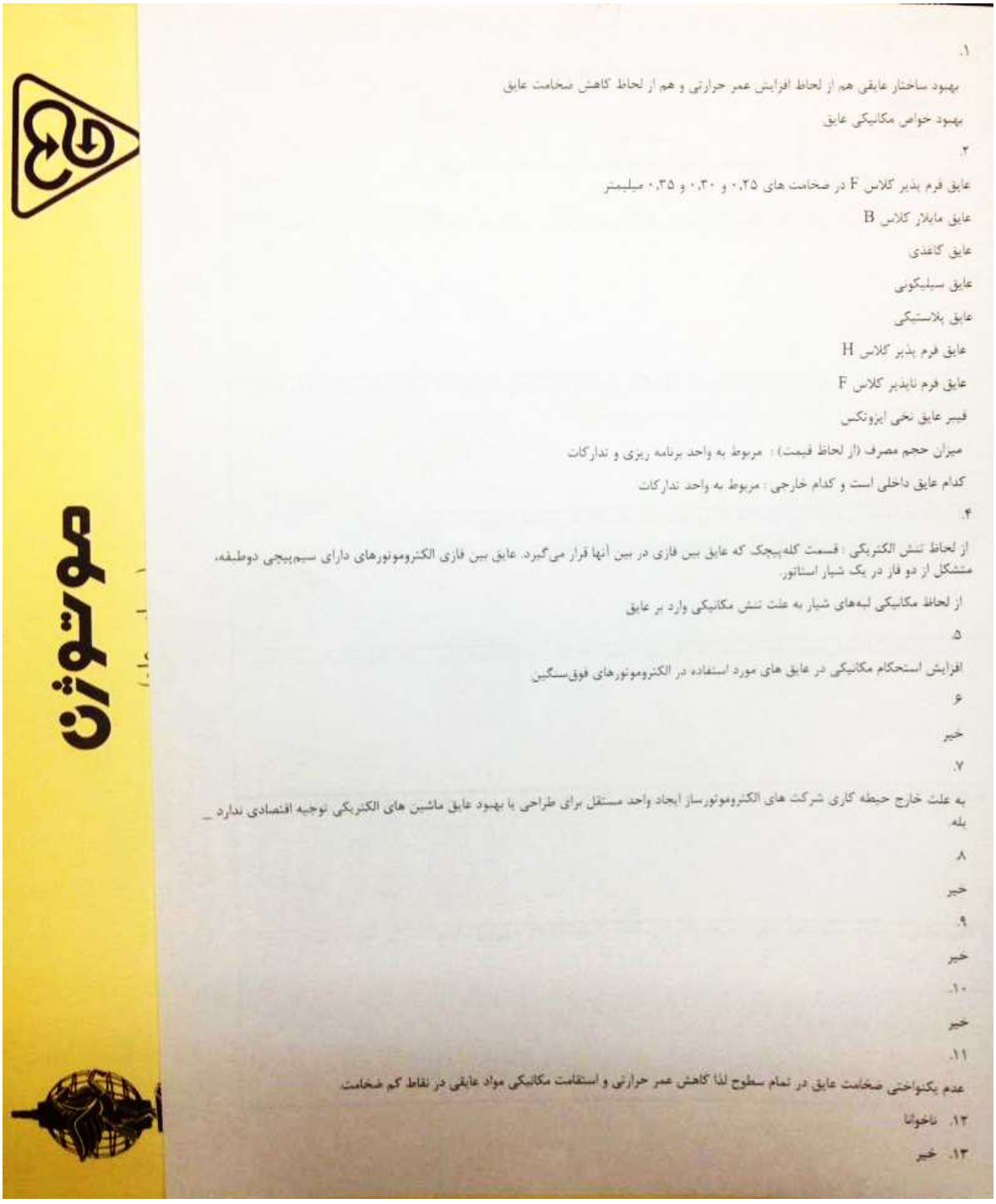
۱۳- آیا توصیه خاصی جهت افزودن پرسش به این پرسشنامه یا ارسال آن به شرکت های عایقی بخصوص یا سازندگان موتور مشخصی دارید؟

به‌صورت معمول اطلاعات ارائه‌شده از سوی تولیدکنندگان داخلی متریال‌های عایقی ناقص است. پیشنهاد می‌گردد علت موضوع از تولیدکنندگان داخلی استعلام شود. این موضوع با مقایسه دیتا شیت متریال‌های مشابه تولیدی توسط تولیدکنندگان داخلی و خارجی به راحتی قابل‌تشخیص است که پیشنهاد می‌شود توسط سازندگان داخلی، مشکل ذکرشده رفع گردد.

نام و نام خانوادگی و سمت کارشناس:

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

پ-۵) موتوژن



مراجع

1. https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/electric-motor-insulation-material-market.asp
2. https://www.transparencymarketresearch.com/electric-motor-insulation-material-market.html
3. https://www.krempel-group.com/en/solutions/electrical-insulation/electrical-insulation-for-motors/
4. https://www.krempel-group.com/en/solutions/electrical-insulation/electrical-insulation-for-high-voltage/
5. https://www.ganapathyindustries.com
6. https://www.Kapton.com
7. https://pumpart.ir/shop
8. Insulating Systems for High-Voltage Rotating Machines, www.vonroll.com
9. Insulating Systems for Large Generators, www.vonroll.com
10. http://www.fkaeng.com/home/page16.aspx@lang=fa.htm
11. http://www.fkaeng.com/home/page15.aspx@lang=fa.htm
12. https://iransimlak.com
13. http://www.felezatonline.ir/
14. http://www.motogen.com/#Slider
15. http://www.felezatonline.ir/News-
16. http://jemcomotor.ir/
17. https://www.kalasanati.com
18. https://tejaratnews.com
19. S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu and T. G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4127-4136, Dec. 2008.
20. M. Leijon, M. Dahlgren, L. Walfridsson, Li Ming and A. Jaksts, "A recent development in the electrical insulation systems of generators and transformers," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, no. 3, pp. 10-15, May-June 2001.
21. G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair, 2nd ed., vol. 21. John Wiley & Sons, 2014.
22. J. Samek, C. Ondrusek, J. Kurfurst, "A review of thermal conductivity of epoxy composites filled with Al 2 O 3 or SiO 2",2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE‘17 ECCE Europe), 2017.
23. J. Samek, C. Ondrusek, J. Kurfurst, "A review of thermal conductivity of epoxy composites filled with AIN or BN",2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ICPS Europe), pp. 1-6, 2017.
24. Y. Liu, H. Nguyen, A. M. Bazzi, Y. Cao, "Torque enhancement and re-rating of medium-voltage induction machines using nanostructured stator winding insulation",2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp. 232-237, 2017.
25. H. Matsumoto, A. Ohtake, A. Sano, "Comparison studies on mechanical and electrical properties of epoxy/silica nanocomposites using Hydrophilic and Hydrophobic Silica",IEEJ Trans. Fundam. Mater., vol. 133, no. 2, pp. 57-63, 2013.
26. H. Nguyen, A. Y. Mirza, W. Chen, J. Ronzello, S. Nasreen, J. Chapman, A. Bazzi, Y. Cao, "Discharge resistant epoxy/clay nanocomposite for high torque density electrical

propulsion",2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 171-174, 2018.
27. T. Hildinger, J. R. Weidner, "Progress in development of a nanocomposite stator winding insulation system for improved generator performance",2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 139-142, 2017.
28. S. Ul Haq R. Omranipour "Accelerated life testing of high voltage stator coils with enhanced PET-mica insulation system" Proc. IEEE Electrical Insulation Conf. pp. 479-482 5–8 June 2011.
29. M. Tani K. Yoshida S. Sekito et al. "Impacts on turbine generator design by the application of increased thermal conducting stator insulation" Proc. CIGRE Session 2002.
30. P. Marek F. Senn W. Grubelnik et al. "Impact of new motor and generator insulation systems" Energize pp. 51-55 2007.
31. M. Sinnett, “787 no-bleed systems: saving fuel and enhancing operational efficiencies,” Aero Q., vol. 18, pp. 6–11, 2007.
32. L. Tarisciotti, A. Costabeber, C. Linglin, A. Walker, and M. Galea, Evaluation of isolated DC/DC converter topologies for future HVDC aerospace microgrids,” in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 2238–2245.
33. G. Buticchi, S. Bozhko, M. Liserre, P. Wheeler, and K. Al-Haddad, “On-board microgrids for the more electric aircraft—technology review,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 7, pp. 5588–5599, Jul. 2019.
34. V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, “Electrical power generation in aircraft: review, challenges, and opportunities,” IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646–659, Sep. 2018.
35. V. Iosif, D. Roger, S. Duchesne, and D. Malec, “Assessment and improvements of inorganic insulation for high temperature low voltage motors,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2534–2542, Oct. 2016.
36. “Managing Higher Voltages in Aerospace Electrical Systems,” AIR6127 SAE Int.,2017.
37. A. N. Esfahani, S. Shahabi, G. Stone, and B. Kordi, “Investigation of corona partial discharge characteristics under variable frequency and air pressure,” in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018, pp. 31–34.
38. A. Cavallini, D. Fabiani, and G. C. Montanari, “Power electronics and electrical insulation systems; Part 1: Phenomenology overview,” IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 26, no. 3, pp. 7–15, May 2010.
39. C. Hudon, N. Amyot, T. Lebey, P. Castelan, and N. Kandev, “Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulated applications,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 7, no. 6, pp. 783–789, Dec. 2000.
40. “Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 13, no. 6, pp. 18–23, Nov. 1997.
41. P. H. F. Morshuis, “Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 12, no. 5, pp. 905–913, Oct. 2005.
42. Rotating electrical machines, “Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines,” IEC 60034, vol. 27, 2006.
43. G. C. Stone and I. Culbert, “Prediction of stator winding remaining life from diagnostic measurements,” in 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010, pp. 1–4.
44. C. Philippe, M. David, and L. Yvan, “Tool to Design the Primary Electrical Insulation System of Low Voltage Rotating Machines Fed by Inverters,” in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018, pp. 8–13.

45. V. Iosif, D. Roger, S. Duchesne, and D. Malec, “Assessment and improvements of inorganic insulation for high temperature low voltage motors,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2534–2542, Oct. 2016.
46. T. J. A. Hammarström, “Partial discharge characteristics within motor insulation exposed to multi-level PWM waveforms,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 2, pp. 559–567, Apr. 2018.
47. L. Fang, I. Cotton, Z. J. Wang, and R. Freer, “Insulation performance evaluation of high temperature wire candidates for aerospace electrical machine winding application,” in 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2013, pp. 253–256.
48. F. Arastu, X. Yi, M. Garg, K. Haran, and J. Lyding, “Magnet Wire for Venus Exploration,” in AIAA Scitech 2019 Forum, 2019, p. 0777.
49. A. M. EL-Refaie, M. R. Shah, and K. Huh, “High-power-density faulttolerant pm generator for safety-critical applications,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 3, pp. 1717–1728, May 2014.
50. N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion, “electrical agingof the insulation of low-voltage machines: model definition and test with the design of experiments,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4147–4155, Sep. 2013.
51. D. R. Meyer, A. Cavallini, L. Lusuardi, D. Barater, G. Pietrini, and A. Soldati, “Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 3, pp. 873–882, Jun. 2018.
52. Cavallini, L. Versari, and L. Fornasari, “Feasibility of partialdischarge detection in inverter-fed actuators used in aircrafts,” in 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013, pp. 1250–1253.
53. P. Werynski, D. Roger, R. Corton, J. F. Bmdny, "Proposition of a new method for in-service monitoring of the aging of stator winding insulation in AC motors", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 673-681, Sep. 2006
54. .X. Z. Liu, Y. G. Bai, X. M. Wang, X. X. Ding, J. J. Zhang, T. L. Zhang, K. Zhang, "Evaluation method of insulation system for wind turbine generator based on accelerated multi-factor ageing test",2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 56-59, 2013.
55. X. Liu, T. Zhang, Y. Bai, X. Ding, Y. Wang, "Effects of accelerated repetitive impulse voltage aging on performance of model stator insulation of wind turbine generator",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 4, pp. 1506-1515, Aug. 2014.
56. M. Katz, R. J. Theis, "New high temperature polyimide insulation for partial discharge resistance in harsh environments",IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 13, no. 4, pp. 24-30, Jul. 1997.
57. L. Lin, A. Kang, J. Song, Z. Lei, Y. Zhao, C. Feng, "Influences of humidity and temperature on oil contamination discharge of HV motor stator windings",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2695-2703, Oct. 2016.
58. A. Mirza, W. Chen, H. Nguyen, Y. Cao, A. M. Bazzi, "High-voltage high-frequency testing for medium-voltage motor insulation degradation", 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 2444-2447, 2018.
59. S. J. Williamson, R. Wrobel, J. Yon, J. D. Booker, P. H. Mellor, "Investigation of equivalent stator-winding thermal resistance during insulation system ageing",2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 550-556, 2017.
60. M. Florkowski, P. Blaszczyk, P. Klimczak, "Partial discharges in twisted-pair magnet wires subject to multilevel PWM pulses",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 4, pp. 2203-2210, 2017.
61. N. Hayakawa, Y. Daicho, T. Kaji, H. Kojima, "Estimation of partial discharge inception voltage under repetitive inverter surge voltage by volume-time theory",2018 IEEE

Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 550-553, 2018.
62. M. Florkowski, B. Florkowska, P. Zydron, "Partial discharges in insulating systems of low voltage electric motors fed by power electronics-twisted-pair samples evaluation",Energies, vol. 12, no. 5, pp. 1-19, Jan. 2019.
63. L. Benmamas, P. Teste, E. Odic, G. Krebs, T. Hamiti, "Contribution to the analysis of PWM inverter parameters influence on the partial discharge inception voltage",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 26, no. 1, pp. 146-152, Feb. 2019.
64. M. Hikita, H. Mizoguchi, T. Kubo, T. Uchimura, M. Kozako, J. Sun, A. Izumi, K. Karasawa, T. Ueno, T. Hirose, S. Hiroshima, "Influence of electromagnetic sensor location on repetitive partial discharge inception voltage in actual stator core of inverter fed motor",2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 435-438, 2018.
65. S. Narasimha Rao, K. Elanseralathan, "Influence of switching frequency of the voltage waveforms on breakdown in twisted pairs",2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), pp. 545-548, 2016.
66. W. Brithinee, M. Winkeler, S. Tuckwell, "Impact of nanoparticles on primary and secondary motor insulation in stators", 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 596-600, 2016.
67. L. Lusuardi, A. Cavallini, A. Caprara, F. Bardelli, A. Cattazzo, "The impact of test voltage waveform in determining the repetitive partial discharge inception voltage of type i turn/turn insulation used in inverter-fed induction motors",2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 478-481, 2018.
68. M. Hikita, N. Yanaze, T. Uchimura, M. Kozako, K. Tomizawa, M. Ohya, "Partial discharge and breakdown characteristics of inverter-fed motor winding with micro cellular coating", 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 482-485, 2016.
69. P. Wang, C. Zheng, Y. Li, Y. Lei, A. Cavallini, "The PD and endurance features of enameled wires at short repetitive impulsive voltages", 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 572-576, 2018.
70. P. Wang, A. Cavallini, G. C. Montanari, "The influence of repetitive square wave voltage parameters on enameled wire endurance",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 3, pp. 1276-1284, Jun. 2014.
71. https://www.Kapton.com
72. https://pumpart.ir
73. S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu and T. G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4127-4136, Dec. 2008.
74. M. Leijon, M. Dahlgren, L. Walfridsson, Li Ming and A. Jaksts, "A recent development in the electrical insulation systems of generators and transformers," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, no. 3, pp. 10-15, May-June 2001.
75. G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair, 2nd ed., vol. 21. John Wiley & Sons, 2014.
76. A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, “A review of stator fault monitoring techniques of induction motors,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 1, pp. 106–114, 2005.

77. J. Faiz, H. Nejadi-Koti, and Z. Valipour, “Comprehensive review on inter-turn fault indexes in permanent magnet motors,” IET Electr. Power Appl., vol. 11, no. 1, pp. 142–156, 2017.
78. M. R. W. Group, “Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I,” IEEE Trans Ind. Appl., vol. 1, no. 4, pp. 865–872, 1985.
79. F. Wu and A. El-Refaie, “Diagnosis and remediation of single-tum short circuit in a multiphase FSCW PM machine based on T-type equivalent circuit,” in Proc. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018, pp. 3228–3235.
80. F. Wu, P. Zheng, and T. M. Jahns, “Analytical modeling of interturn short circuit for multiphase fault-tolerant pm machines with fractional slot concentrated windings,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 53, no. 3, pp. 1994–2006, May 2017.
81. Insulating Systems for High-Voltage Rotating Machines, www.vonroll.com
82. Insulating Systems for Large Generators, www.vonroll.com
83. N. E. M. Association, “MG 1: Motors and Generators,” ANSINEMAMG, pp. 1–2009, 1998.
84. “IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and above) With High Direct Voltage,” IEEE Std 95-2002 Revis. IEEE Std 95-1977, pp. 1–56, Apr. 2002.
85. IEC 60270, “High-voltage test techniques: partial discharge measurements”, 2015.
86. P. IEC-TS, “62478: 2016 High Voltage Test Techniques—Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods,” BSI Lond. UK, 2016.
87. “IEEE 1434-2014 - IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery.” [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/1434-2014.html.
88. International electrotechnical Commission, “IEC 60034-27-1 Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation,” 2017.
89. “ASTM D1868-07 Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems.” West Conshohocken PA USA ASTM.
90. “IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip Up of Electric Machinery Sataor Coil Insulation,” IEEE Std 286-2000, pp. 1-29, 2001.
91. IEC Standard 60894, “Guide for the Test Procedure for the Measurement of Loss Tangent on Coils and Bars for Machine Windings.”
92. “IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines,” IEEE Std 522-2004 Revis. IEEE Std 522-1992, pp. 1–18, 2004.
93. V. Iosif, D. Roger, S. Duchesne, and D. Malec, “Assessment and improvements of inorganic insulation for high temperature low voltage motors,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2534–2542, Oct. 2016.
94. Rotating Electrical Machines, “Part 18-41: Qualification and Type Tests for Type I-Electrical Insulation Systems Used in Rotating Electrical Machines Fed from Voltage Converters,” IEC International Standard 60034-18-41, 2014.
95. G. C. Montanari, P. Seri, and A. Contin, “How to deal with the severity of different partial discharge sources in rotating machines: the definition of a new health index,” in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018, pp. 469–472.

96. B. Florkowska, M. Florkowski, A. Rybak, and P. Zydroń, "Comparison of PWM and SIN aging of insulating material subjected to surface discharges," in Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012, pp. 44–47.
97. D. E. Moghadam, J. Speck, S. Grossmann, and J. Stahl, "Parameters affecting the turn insulation lifetime and durability," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 2, pp. 516–523, Apr. 2018.
98. S. Vahid, H. Rastegar, S. H. Fathi, and M. Jedari, "A comprehensive comparison between three different control strategies for four-leg active power filters," in 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA), 2016, pp. 1–7.
99. T. J. A. Hammarström, "Partial discharge characteristics within motor insulation exposed to multi-level PWM waveforms," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 2, pp. 559–567, Apr. 2018.
100. J. Weimer, "Past, present and future of aircraft electrical power systems," in 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Art. no. 1147, pp. 1-9, Jan 2001.
101. B. Sarlioglu and C. T. Morris, "More Electric Aircraft: Review,Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft," IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 1, no. 1, pp. 54–64, Jun 2015.
102. I. Moir and A. Seabridge, Aircraft Systems: Mechanical, electrical,and avionics subsystems integration, vol. 52. John Wiley & Sons, 2011.
103. M. Sinnett, "787 no-bleed systems: saving fuel and enhancing operational efficiencies," Aero Q., vol. 18, pp. 6–11, 2007.
104. L. Tarisciotti, A. Costabeber, C. Linglin, A. Walker, and M. Galea, Evaluation of isolated DC/DC converter topologies for future HVDC aerospace microgrids," in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 2238–2245.
105. G. Buticchi, S. Bozhko, M. Liserre, P. Wheeler, and K. Al-Haddad, "On-board microgrids for the more electric aircraft—technology review," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 7, pp. 5588–5599, Jul. 2019.
106. V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, "Electrical power generation in aircraft: review, challenges, and opportunities," IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646–659, Sep. 2018.
107. V. Iosif, D. Roger, S. Duchesne, and D. Malec, "Assessment and improvements of inorganic insulation for high temperature low voltage motors," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2534–2542, Oct. 2016.
108. "Managing Higher Voltages in Aerospace Electrical Systems," AIR6127 SAE Int.,2017.
109. A. N. Esfahani, S. Shahabi, G. Stone, and B. Kordi, "Investigation of corona partial discharge characteristics under variable frequency and air pressure," in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018, pp. 31–34.
110. A. Cavallini, D. Fabiani, and G. C. Montanari, "Power electronics and electrical insulation systems; Part 1: Phenomenology overview," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 26, no. 3, pp. 7–15, May 2010.
111. C. Hudon, N. Amyot, T. Lebey, P. Castelan, and N. Kandev, "Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulated applications," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 7, no. 6, pp. 783–789, Dec. 2000.

112. “Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 13, no. 6, pp. 18–23, Nov. 1997.
113. P. H. F. Morshuis, “Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 12, no. 5, pp. 905–913, Oct. 2005.
114. Rotating electrical machines, “Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines,” IEC 60034, vol. 27, 2006.
115. G. C. Stone and I. Culbert, “Prediction of stator winding remaining life from diagnostic measurements,” in 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010, pp. 1–4.
116. C. Philippe, M. David, and L. Yvan, “Tool to Design the Primary Electrical Insulation System of Low Voltage Rotating Machines Fed by Inverters,” in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018, pp. 8–13.
117. L. Fang, I. Cotton, Z. J. Wang, and R. Freer, “Insulation performance evaluation of high temperature wire candidates for aerospace electrical machine winding application,” in 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2013, pp. 253–256.
118. F. Arastu, X. Yi, M. Garg, K. Haran, and J. Lyding, “Magnet Wire for Venus Exploration,” in AIAA Scitech 2019 Forum, 2019, p. 0777.
119. A. M. EL-Refaie, M. R. Shah, and K. Huh, “High-power-density faulttolerant pm generator for safety-critical applications,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 3, pp. 1717–1728, May 2014.
120. N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion, “electrical agingof the insulation of low-voltage machines: model definition and test with the design of experiments,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 4147–4155, Sep. 2013.
121. D. R. Meyer, A. Cavallini, L. Lusuardi, D. Barater, G. Pietrini, and A. Soldati, “Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 3, pp. 873–882, Jun. 2018.
122. Cavallini, L. Versari, and L. Fornasari, “Feasibility of partialdischarge detection in inverter-fed actuators used in aircrafts,” in 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013, pp. 1250–1253.
123. P. Werynski, D. Roger, R. Corton, J. F. Bmdny, "Proposition of a new method for in-service monitoring of the aging of stator winding insulation in AC motors", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 673-681, Sep. 2006
124. .X. Z. Liu, Y. G. Bai, X. M. Wang, X. X. Ding, J. J. Zhang, T. L. Zhang, K. Zhang, "Evaluation method of insulation system for wind turbine generator based on accelerated multi-factor ageing test",2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 56-59, 2013.
125. X. Liu, T. Zhang, Y. Bai, X. Ding, Y. Wang, "Effects of accelerated repetitive impulse voltage aging on performance of model stator insulation of wind turbine generator",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 4, pp. 1506-1515, Aug. 2014.
126. M. Katz, R. J. Theis, "New high temperature polyimide insulation for partial discharge resistance in harsh environments",IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 13, no. 4, pp. 24-30, Jul. 1997.

127. L. Lin, A. Kang, J. Song, Z. Lei, Y. Zhao, C. Feng, "Influences of humidity and temperature on oil contamination discharge of HV motor stator windings",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 5, pp. 2695-2703, Oct. 2016.
128. A. Mirza, W. Chen, H. Nguyen, Y. Cao, A. M. Bazzi, "High-voltage high-frequency testing for medium-voltage motor insulation degradation", 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 2444-2447, 2018.
129. S. J. Williamson, R. Wrobel, J. Yon, J. D. Booker, P. H. Mellor, "Investigation of equivalent stator-winding thermal resistance during insulation system ageing",2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 550-556, 2017.
130. M. Florkowski, P. Blaszczyk, P. Klimczak, "Partial discharges in twisted-pair magnet wires subject to multilevel PWM pulses",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 4, pp. 2203-2210, 2017.
131. N. Hayakawa, Y. Daicho, T. Kaji, H. Kojima, "Estimation of partial discharge inception voltage under repetitive inverter surge voltage by volume-time theory",2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 550-553, 2018.
132. M. Florkowski, B. Florkowska, P. Zydron, "Partial discharges in insulating systems of low voltage electric motors fed by power electronics-twisted-pair samples evaluation",Energies, vol. 12, no. 5, pp. 1-19, Jan. 2019.
133. L. Benmamas, P. Teste, E. Odic, G. Krebs, T. Hamiti, "Contribution to the analysis of PWM inverter parameters influence on the partial discharge inception voltage",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 26, no. 1, pp. 146-152, Feb. 2019.
134. M. Hikita, H. Mizoguchi, T. Kubo, T. Uchimura, M. Kozako, J. Sun, A. Izumi, K. Karasawa, T. Ueno, T. Hirose, S. Hiroshima, "Influence of electromagnetic sensor location on repetitive partial discharge inception voltage in actual stator core of inverter fed motor",2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 435-438, 2018.
135. S. Narasimha Rao, K. Elanseralathan, "Influence of switching frequency of the voltage waveforms on breakdown in twisted pairs",2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), pp. 545-548, 2016.
136. W. Brithinee, M. Winkeler, S. Tuckwell, "Impact of nanoparticles on primary and secondary motor insulation in stators", 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 596-600, 2016.
137. L. Lusuardi, A. Cavallini, A. Caprara, F. Bardelli, A. Cattazzo, "The impact of test voltage waveform in determining the repetitive partial discharge inception voltage of type i turn/turn insulation used in inverter-fed induction motors",2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 478-481, 2018.
138. M. Hikita, N. Yanaze, T. Uchimura, M. Kozako, K. Tomizawa, M. Ohya, "Partial discharge and breakdown characteristics of inverter-fed motor winding with micro cellular coating", 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 482-485, 2016.
139. P. Wang, C. Zheng, Y. Li, Y. Lei, A. Cavallini, "The PD and endurance features of enameled wires at short repetitive impulsive voltages", 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 572-576, 2018.

140. P. Wang, A. Cavallini, G. C. Montanari, "The influence of repetitive square wave voltage parameters on enameled wire endurance",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 3, pp. 1276-1284, Jun. 2014.
141. M. G. Danikas and A. Karlis, "A Review on Electrical Machines Insulation Aging and Its Relation to the Power Electronics Arrangements with Emphasis on Wind Turbine Generators," Ren. Sust. Ener. Rev., vol. 15, pp. 1748-1752.
142. Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation, A GAMBICA / BEAMA Technical Guide, 4th Edition, March, 2016.
143. G. C. Stone, H. Sedding, "Detection of stator winding stress relief coating deterioration in conventional and inverter fed motors and generators",2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), pp. 270-273, 2016.
144. A. Litinsky, G. Schmidt, F. Pohlmann, H. Hirsch, "Ageing of corona protection material on rotating machines",2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 356-359, 2017.
145. A. Staubach, G. Schmidt, F. Pohlmann, H. Hirsch, "Investigation of ideal anisotropic material properties for outer corona protection systems in large rotating machines",2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 365-368, 2018.
146. A. Staubach, H. Hirsch, G. Schmidt, F. Pohlmann, "Examination of anisotropic material characteristics in Outer Corona Protection (OCP)systems in large rotating machines", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), vol. 1, pp. 422-425, 2016.
147. T. Tanaka, "Polymer nanocomposites as HV insulators: Superiority and expectation",2007 Proceedings of the XVth international symposium on high voltage engineering. (ISH), pp. 16-19, 2007.
148. K. Kobayashi, A. Ohtake, A. Sano, T. Kato, "Multi-scale simulation techniques of mechanical strength of nanocomposite insulating materials",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 6, pp. 3500-3504, Dec. 2017.
149. T. Tomášková, P. Trnka, "The influence of thermal properties of aluminum oxide on electrical insulating materials", Proc. the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), pp. 421-425, 2014.
150. Y. -W. Mai, Z.-Z. Yu, Polymer nanocomposites, Woodhead publishing, 2006.
151. J. Samek, C. Ondrusek, J. Kurfurst, "A review of thermal conductivity of epoxy composites filled with Al 2 O 3 or SiO 2",2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017.
152. J. Samek, C. Ondrusek, J. Kurfurst, "A review of thermal conductivity of epoxy composites filled with AIN or BN", 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ICPS Europe), pp. 1-6, 2017.
153. Y. Liu, H. Nguyen, A. M. Bazzi, Y. Cao, "Torque enhancement and re-rating of medium-voltage induction machines using nanostructured stator winding insulation",2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp. 232-237, 2017.
154. H. Matsumoto, A. Ohtake, A. Sano, "Comparison studies on mechanical and electrical properties of epoxy/silica nanocomposites using Hydrophilic and Hydrophobic Silica",IEEJ Trans. Fundam. Mater., vol. 133, no. 2, pp. 57-63, 2013.

155. L. Zhao, J. C. Su, Y. F. Pan, R. Li, L. Zheng, Y. Zhang, X. L. Wu, P. C. Gao, "Calculation on heating effect due to void discharge in polymers in cumulative breakdown process",IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 5, pp. 3113-3121, Oct. 2017.
156. H. Nguyen, A. Y. Mirza, W. Chen, J. Ronzello, S. Nasreen, J. Chapman, A. Bazzi, Y. Cao, "Discharge resistant epoxy/clay nanocomposite for high torque density electrical propulsion",2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 171-174, 2018.
157. T. Hildinger, J. R. Weidner, "Progress in development of a nanocomposite stator winding insulation system for improved generator performance",2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 139-142, 2017.
158. "Hydrogenerator failures – results of the survey" 2003.
159. F.T. Emery M. Williams "Preliminary evaluation of flat glass backed mica paper tape for high voltage coil groundwall insulation using vacuum-pressure-impregnation" Proc. IEEE Electrical Insulation Conf. pp. 175-179 5–8 June 2011.
160. N. Glew "Design and manufacture of energy efficient and environmentally friendly large machines" Proc. IEE Symp. on Design Operation and Maintenance of High Voltage Electric Motors for Process Plant pp. 1-5 27 April 1999.
161. G.C. Stone E.A. Boulter I. Culbert et al. Electrical insulation for rotating machines design evaluation aging testing and repair USA:John Wiley & Sons Inc. 2014.
162. S. Ul Haq R. Omranipour "Accelerated life testing of high voltage stator coils with enhanced PET-mica insulation system" Proc. IEEE Electrical Insulation Conf. pp. 479-482 5–8 June 2011.
163. T. Baumann T. Hillmer P. Klee et al. "Optimized emission free production process for main wall insulation with enhanced propertied" Proc. IEEE Electrical Insulation Conf. pp. 184-189 5–8 June 2011.
164. M. Tani K. Yoshida S. Sekito et al. "Impacts on turbine generator design by the application of increased thermal conducting stator insulation" Proc. CIGRE Session 2002.
165. P. Marek F. Senn W. Grubelnik et al. "Impact of new motor and generator insulation systems" Energize pp. 51-55 2007.
166. F.T. Emery "Preliminary evaluation of CR Kapton-backed mica paper tape for high voltage coil groundwall insulation using vacuum pressure impregnation" IEEE Electr. Insul. Mag. vol. 14 no. 5 pp. 12-15 1998.
167. P. Gropper T. Hildinger F. Pohlmann et al. "Nanotechnology in high voltage insulation systems for large electrical machinery–first results" Proc. CIGRE Session 2012.
168. P. Gröppel D. Heinl C. Meichsner et al. "Insulation systems having improved partial discharge resistance and method for producing same" March 2017.
169. H. Nguyen Y. Liu W. Chen et al. "Nanostructured insulation for high torque density electric propulsion motors" Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symp. pp. 274-279 14–17 August 2017.
170. M. Chapman, N. Frost and R. Bruetsch, "Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines," *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, BC, 2008, pp. 257-260.

DOI: 10.30503/nripress.2020.164

171. N. Frost, M. Chapman and R. Bruetsch, "Considerations for Rotating Low-Voltage Machine Insulation Designs," *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, BC, 2008, pp. 571-574.