

# مواجهه با جریان‌های شفت و یاتاقان

## مقدمه

این مقاله، مسایل کلیدی مرتبط با جریان‌های شفت و یاتاقان را مطرح می‌سازد. عناوین بحرانی که تحت پوشش قرار خواهد گرفت، شامل تشخیص علایم جریان‌های شفت و یاتاقان، و تعیین اینکه آیا سطوح جریان مخربی وجود دارد یا خیر، می‌باشد. همچنین، دلایل احتمالی جریان‌های مخرب مانند عدم تقارن ماشین و عملکرد در درایوهای با فرکانس متغیر (VFD)، مورد بحث قرار خواهد گرفت. روش‌های تست به منظور اطمینان از حضور جریان‌های شفت یا یاتاقان، و نیز چگونگی ارزیابی دامنه جریان‌های مخرب، توصیف خواهد شد. همچنین، راه‌حل‌های حذف یا کنترل جریان‌های شفت و یاتاقان، ارائه خواهد شد.

در حالی که جریان‌های شفت و یاتاقان، مساله تازه‌ای نیست (مقاله‌های این موضوع با پیش از سال 1930 بر می‌گردد)، چیزی که جدید است، افزایش درک چگونگی تشخیص و حل این مساله می‌باشد. جریان‌های شفت و یاتاقان، به صورت ولتاژهای شفت، ولتاژهای چرخشی، جریان‌های چرخشی و جریان‌های یاتاقان توصیف شده است. ولتاژ شفت تنها زمانی تبدیل به یک مساله می‌شود که منجر به جریان یاتاقان، و در پی آن آسیب به یاتاقان‌های موتور شود. اگر این ولتاژ، که ولتاژ مد مشترک یا ولتاژ شفت نامیده می‌شود، به حد کافی برسد، می‌توان از طریق لایه روان کننده در یاتاقان، به زمین تخلیه شود. جریانی که از طریق یاتاقان‌های موتور، بدین سان جریان به زمین می‌فرستد، جریان یاتاقان نام دارد.

این مقاله نخست به پدیده آسیب ناشی از جریان‌های شفت و یاتاقان به عنوان جریان‌های (های) یاتاقان می‌پردازد، زیرا جریان یاتاقان است که (نه جریان شفت) که موجب آسیب می‌شود. در مواردی که جریان‌های شفت و یاتاقان باید متمایز شود، عبارت جریان‌های (های) شفت یا جریان‌های (های) یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## شناخت علایم جریان یاتاقان

نخستین علامت جریان یاتاقان، سروصدای قابل شنیدن از یاتاقان بوده که نشان می‌دهد در مرحله پیشرفته یا خرابی است. بررسی یاتاقان پس از خرابی، می‌تواند نشان دهنده شیار شیار شدن حلقه دور یاتاقان (شکل 1)، یخزدگی ساچمه‌ها یا غلتک‌ها (شکل 2)، یا سطح خاکستری کدر یا دودی تیره سراسری روی ساچمه‌ها/غلتک‌ها و نیز شیار جای ساچمه، باشد. روان کننده نیز ممکن است دارای ظاهر تیره‌ای باشد.

شکل 1. شیار شیار شدگی. شیار شیار شدگی حلقه دور یاتاقان ناشی از جریان الکتریکی.

شکل 2. یخزدگی. یخزدگی ساچمه ها/غلتکها به دلیل جریان الکتریکی.

## آسیب جریان

ظاهر سطح آسیب دیده، متناسب با سه نوع اصلی جریان می باشد. نوع اول آسیب جریان الکتریکی، ایجاد حفره الکتریکی است (شکل 4). این اساسا مرتبط با آسیب یک دهانه حفره بوده و معمولا در کاربردهای DC مانند موتورهای کششی قطار دیده می شود. اندازه قطر دهانه حفره، از "0.004-0.020 (0.1-0.5 mm) بوده و با چشم غیرمسطح نیز قابل مشاهده است. این حفره ها اغلب ناشی از منابع ولتاژ بسیار فشار قوی می باشد.

نوع دوم آسیب، شیار شیار شدگی است که الگوی چندین خط در حلقه های داخلی و بیرونی می باشد (شکل 1). دلیل این شیار شیار شدگی، تشدید لرزش مکانیکی ناشی از اثرات دینامیک عناصر غلتان می باشد؛ زیرا آنها روی حفره های کوچک تر در حلقه یاتاقان، غلت می زنند. به سخن دقیق، شیار شیار شدگی، مد اولیه خرابی ناشی از عبور جریان از خود یاتاقان نیست. بلکه آیب ثانویه یاتاقان بوده که تنها پس از دوره ای از زمان قابل رویت بوده و در مراحل اولیه دارای حفره است.

نوع سوم آسیب جریان، حفره های ریز بوده که رایج ترین نوع آسیب جریان در زمان کارموتور با VFD می باشد. سطح آسیب دیده کدر به نظر رسیده و دارای ظاهر حفره های مذاب می باشد (شکل 5). چندین حفره ریز، عناصر غلتان و حلقه ها را تحت پوشش قرار می دهند. اندازه حفره ها کوچک بوده، و اغلب دارای قطر بین "0.0002-0.0003 یا ( $5 - 8 \mu\text{m}$ ) می باشند؛ حال چه حفره در حلقه داخلی، حلقه بیرونی یا عناصر غلتان باشد. شکل صحیح این حفره ها را تنها می توان زیر میکروسکوپ با استفاده از بزرگ نمایی زیاد، مشاهده کرد.

شکل 3. سطح تیره سطح تیره شده ساچمه در سمت راست، ناشی از جریان الکتریکی بوده است.

شکل 4. ایجاد حفره نمای میکروسکوپی حفره های الکتریکی.

شکل 5. سطح کدر سطح کدر و حفره های الکتریکی در حلقه داخلی یاتاقان غلتکی.

شکل 6. Picket Fence به الگوی picket fence حلقه بیرونی یاتاقان توجه شود. این اغلب یک نشانه دیداری از ولتاژهای شفت می‌باشد.

## علائم دیگر

اگر یاتاقانی سروصدا دارد، مهم است که پیش از خرابی کامل یاتاقان، آن را از کار متوقف و پیاده کرد. در صورتی که یاتاقان با عیبی نابود شود، شواهد جریان یاتاقان نیز نابود شده و علت ریشه ای خرابی آن تعیین نخواهد شد.

نشانه‌های دیداری از ولتاژهای شفت، شامل شیار شیار شدگی الگوی picket fence در حلقه‌های یاتاقان می‌باشد (شکل 6). فاصله علائم شیاری، وابسته به سرعت (rpm)، قطر یاتاقان، بار شعاعی و دامنه جریان یاتاقان می‌باشد. ساچمه‌ها یا غلتک‌ها ممکن است دارای سطح خاکستری تیره یا دودی باشند (شکل 3). در صورتی که سرعت موتور متغیر باشد، حلقه نیز ممکن است دارای الگوی یخزدگی باشند. گریس‌ها ممکن است به دلیل سوختن فلز که تولید اکسید آهنی می‌کند، دارای ظاهری سیاه باشند.

اغلب آسیب جریان یاتاقان، نخست با چشم در آن نواحی در یاتاقان که بیشترین بار روی آنها قرار می‌گیرد، مشاهده می‌شود. دلیلش این است که لایه روان کننده در نواحی با بیشترین بار، نازک تر از بقیه نواحی می‌شود. برای مثال، در کاربردهای تسمه ای، آسیب به یاتاقان بیشتر در راستای جهت کشش تسمه می‌باشد. با توجه به ضخامت لایه روان کننده، مطالعات دریافتند که ضخامت لایه روان کننده یاتاقان اغلب در سرعت‌های عملیاتی عادی بین  $0.2-2.0 \mu\text{m}$  می‌باشد. با دانستن این ضخامت لایه، آسیب جریان‌های یاتاقان می‌تواند ناشی از ولتاژهای شفت 60 Hz با پیک 2V-0.2 باشد. جریان‌های یاتاقان همچنین موجب می‌شوند تا روان کننده در یاتاقان، ترکیب خود را از دست داد و به سرعت معیوب گردد. دمای محلی بالا باعث می‌شود که افزودنی‌های روان کننده و روغن پایه، واکنش نشان دهند که اغلب منجر به نیمسوز شدن روغن پایه می‌شود. آنگاه مواد افزودنی سریع تر مصرف شده و روان کننده سخت و سیاه می‌شود. شکست سریع گریس نیز یکی از حالت‌های خرابی رایج بوده که ناشی از جریان یاتاقان است.

## تعیین حضور یا عدم حضور سطوح جریان مضر

هم اکنون هیچ روشی برای اندازه گیری جریان‌های یاتاقان شناخته نشده است و روش عملی برای اندازه گیری جریان‌های شفت به طور مستقیم، وجود ندارد. اندازه گیری جریان شفت، نیازمند قرار دادن سیم پیچی ترانس جریان در اطراف شفت در درون موتور می‌باشد. در موارد نادری، در صورت در دسترس بودن سطح داخلی موتور، می‌توان یک سیم پیچ روگوفسکی (شکل 7) را دور شفت پیچید و از آن برای اندازه گیری جریان

شفت استفاده کرد. روش رایج برای آشکارسازی حضور جریان به شدت زیان آور شفت و یاتاقان، اندازه گیری ولتاژ از شفت به زمین، یعنی از شفت به بدنه موتور، می باشد.

## ولتاژ شفت به بدنه

از میان چالش های موجود در اندازه گیری ولتاژ شفت به بدنه، این است که یاتاقان ها به صورت تقریباً تصادف، از حالت عایق به حالت هادی تغییر می یابند. در نتیجه به هنگام ارزیابی امکان حضور جریان های مخرب یاتاقان، بایستی بالاترین ولتاژ اندازه گیری شده را بکار برد.

اگر ولتاژ شفت به بدنه برای یک بلبرینگ یا یاتاقان غلتکی بیش از 100 میلی ولت متناوب باشد، یا در یاتاقان های بوشی بیش از 200 میلی ولتا متناوب باشد، جریان شفت احتمالاً آنقدر زیاد است که باعث خرابی یاتاقان شود. یک روش تست دیگر، مبتنی بر NEMA MG1، اندازه گیری ولتاژ شفت از سر تا سر شفت می باشد. اگر این ولتاژ بیش از 300 mV ac باشد، ممکن است به یاتاقان آسیب برسد. روش NEMA از همین حد 300 mV ac برای همه انواع یاتاقان ها استفاده می کند.

دامنه جریان شفت، همچنین می تواند شاخصی از حضور جریان های مخرب شفت باشد. اگر یک کابل جوش به هر دو سر شفت متصل شده و جرقه ای تولید شود، نشان دهنده جریان شفت می باشد، اگرچه دامنه آن مجهول است. در صورتی که بتوان جریان را اندازه گرفت، مقدار بیش از 20 A به عنوان نشانگری از حضور سطوح مخرب جریان یاتاقان می باشد.

VFD ها می توانند ولتاژ حالت مشترکی تولید کنند که پتانسیل خنثای سیم پیچی سه فاز را، به شدت به بالای پتانسیل زمین افزایش می دهد. در موتورهای سه فاز، جمع سه فاز به ازای یک توان سینوسی، برابر با صفر می باشد. هنگامی که خروجی سه فاز از درایو یکسوساز می شود، DC مثبت یا منفی می باشد؛ و ولتاژ مد مشترک تقریباً برابر با ولتاژ RMS می گردد. عدم تقارن مغناطیسی ذاتی، می تواند موجب جریان های شفت و یاتاقان شود. این ولتاژ مد مشترک، در فرکانس های بالا نوسان می کند و قادر به تزویج با روتور است (شکل 8). نتیجه، پالس های به شدت 25 ولت از شفت به زمین، با مسیر جریان یک کدام یا هر دو یاتاقان به زمین می باشد. در صورتی که موتوری از طریق VFD تغذیه شود، بررسی ولتاژ بدنه با شفت و تعیین اینکه امکان وجود جریان های مضر یاتاقان وجود دارد یا خیر، کار مفیدی می باشد.

شکل 7. سیم پیچی نوع روگوفسکی  
یک سیم پیچ نوع روگوفسکی که می توان آن را دور شفت پیچید تا جریان شفت را اندازه گیری کرد.

## جریان یاتاقان

اگر ولتاژ شفت ناشی از VFD به اندازه کافی زیاد باشد، جریان می‌تواند از شفت و هر دو یاتاقان (شکل 9) و، در برخی موارد از شفت و یاتاقان ماشین بار، عبور کند. این جریان گردشی در صورتی که بسته به اندازه یاتاقان ها، نرخ صعود ولتاژ در ترمینال‌های موتور و سطح ولتاژ باس dc اینورتر دامنه آن از 3-20 A بیشتر شود\_ می‌تواند به یاتاقان آسیب برساند.

## شکل 9. مسیر جریان گردشی      مسیر جریان گردشی از طریق شفت، یاتاقان‌ها و بدنه.

دلیل اینکه دامنه جریان بسته به اندازه یاتاقان تغییر می‌کند، این است که نسبت مستقیم تری با چگالی جریان دارد. چگالی جریان، جریان تقسیم شده بر سطح تماس عناصر غلتان می‌باشد و هنگامی که بیشتر از  $1 \text{ A/mm}^2$  ( $645 \text{ A/in}^2$ ) شود، باعث آسیب می‌گردد. دشواری در این تفرانس، این است که چگالی را نمی‌توان در یک کاربرد واقعی، اندازه گیری کرد؛ زیرا سطح تماس معمولاً مجهول است و می‌تواند متغیر باشد.

نتایج جالبی در مطالعات تجربی که در آن جریان شفت ناشی از تزویج خازنی بین استاتور و روتور موتور با تغذیه VFD را می‌توان اندازه گیری کرد، بدست آمده است. مشاهده شد که بسته به اندازه یاتاقان، جریان 5-200 A باعث آسیب به یاتاقان نخواهد شد. همچنین، با عایق سازی یک یاتاقان، سطح جریان به کمتر از 40٪ مقدار با یاتاقان‌های بدون عایق، کاهش می‌یابد؛ و در مورد عایق سازی هر دو یاتاقان، جریان به کمتر از 20٪ کاهش یافته است. همچنین مشاهده شد که اعمال فیلتر یا راکتور بین درایو و موتور، جریان شفت را به مقدار 30-50٪ کاهش می‌دهد.

## مغناطیس پسماند

در صورتی که شفت دارای خاصیت مغناطیسی باشد، ممکن است در یاتاقان جریان بوجود آید. سطوح میدان مغناطیسی باقی ماند، بهترین حالت زمانی بدست می‌آید که ماشین در حال کار نباشد. می‌توان از گوس متر در مد dc برای اندازه گیری سطح میدان مغناطیسی پسماند شفت، استفاده کرد. با باز گردن قطعات موتور، قدرت میدان مغناطیسی را می‌توان تغییر داد؛ زیرا مسیرهای شار تغییر می‌کند. برای مثال، هنگامی که تزویجی برداشته می‌شود، سطح میدان مغناطیسی شفت مجاور ممکن است افزایش یا کاهش یابد. بنابراین،

بهتر است عناصر شفت را باز نکنیم تا میدان مغناطیسی اندازه گیری شده، نشان دهنده شرایط عملکرد واقعی باشد.

جدول زیر بر مبنای نتایج تست گردآوری شده توسط یک محقق از بیش از 200 ماشین در یک دوره فراتر از 15 سال می باشد.

ماکزیمم سطوح میدان مغناطیسی پسماند (اندازه گیری شده در هوای آزاد)	
عناصر یاتاقان، ژورنال یاتاقان؛ پلمپ ها؛ دنده ها و دندانه کوپلینگ	2 گوس
بدنه یاتاقان	4 گوس
سطح هسته روتور و میانه-شفت	6 گوس

یک عامل مهم این است که سطوح میدان مغناطیسی اندازه گیری شده، تنها مقادیر حاشیه ای هستند و می تواند بسیار کمتر از سطوح واقعی درون یک عنصر باشد.

### دلایل ممکن جریان های مخرب

سه منبع اصلی از جریان های گردشی وجود دارد که می تواند از شفت و سپس از یاتاقان ها عبور کند. یک منبع، عدم تقارن مغناطیسی می باشد؛ مورد بعد تخلیه های الکترواستاتیکی، و مورد سوم تزویج خازنی بین سیم پیچی های استاتور و روتور می باشد. هر کدام از این منابع، می تواند بطور مستقل یا همزمان وجود داشته و از این رو منجر به جریان های یاتاقان شود.

دیگر منابع ولتاژ شفت شامل عدم تعادل ولتاژ منبع، جریان های چرخشی در مدارات موازی نامتعادل با سیم پیچی سه فاز، و شرایط ولتاژ گذرا می باشد. عوامل نادرتر جریان های شفت و یاتاقان، شامل پیچ های اصلی عایق نشده در روتور یا آرمیچر، فاصله هوایی غیرعادی، و مقاطع آهن اتصال کوتاه شده در هسته روتور یا استاتور می باشد. هر کدام از این عوامل، می تواند بطور مستقل یا همزمان وجود داشته باشد و از این رو منجر به جریان های یاتاقان شود.

### عدم تقارن مغناطیسی

عدم تقارن مغناطیسی به دلیل اختلاف در مدار مغناطیسی بین استاتور و روتور می باشد. اغلب این مرتبط با موتورهای بزرگ تر دارای ورقه های جدا هستند و از طریق منابع توان غیر سینوسی (همانند منبع

اعمالی توسط VFD) تغذیه می‌شوند، می‌باشد. شار نامتقارن منتج شده در موتور، منجر به جریان گردشی با فرکانس کم در یاتاقان‌ها می‌شود.

اگرچه عدم تقارن در ورقه‌های هسته تنها منبع عدم تقارن نیست، دلیل عمده آن می‌باشد. عوامل دیگر عدم تقارن مغناطیسی، شامل فاصله هوایی نابرابر بین استاتور و روتور، و آسیب به ورقه‌های هسته استاتور مثلا به دلیل خطای زمین سیم پیچی، می‌باشد.

عدم تقارن مغناطیسی در ماشین‌های dc\_ که امکان تغییر در فاصله هوایی هر یک از قطب‌های میدان و قطب‌های کمکی در آنها وجود دارد\_ نیز رایج است. یک مطالعه غیررسمی، دریافته که جریان‌های شفت در بیشتر ماشین‌های dc بزرگتر از 10 اسب بخار (7.5 kW)، وجود دارد.

در هر موتور، شامل موتورهایی که در آنها به جای ورقه‌های جدا از ورقه‌های یک-قطعه ای استفاده شده، فولاد هسته مغناطیسی دارای ترکیب کاملاً یکنواخت نیست. بدین دلیل، مسیرهای شار عبوری از هسته کاملاً متقارن نیستند که موجب خطوط شار متغیر-با-زمان شده که شفت را در بر می‌گیرد. اینها شامل عبور جریان از شفت، از یاتاقان، از بدنه و دوباره از یاتاقان دیگر به شفت می‌شود (شکل 9).

کمی اختلاف در فضای میان قطعات هسته ورقه ورقه شده (شکل 10)، و اینکه چطور لایه به لایه بهم متصل شده اند، منجر به عدم تقارن در هسته استاتور می‌شود. برای نشان دادن این قضیه، یک لایه از ورقه هسته را به عنوان دایره ای از جنس تعداد زیادی قطعات مجاور هم را در نظر بگیرید (مانند قطعات یک پیتزا). فاصله بین هر قسمت ورقه مجاور، کمی متفاوت بوده و هر لایه از ورقه به اعوجاج می‌افزاید. از این رو هسته کامل، اعوجاج‌های کم را تقویت می‌کند؛ زیرا\_ از انجایی که مدار مغناطیسی را منحرف می‌کنند\_ بطور موثری با هم جمع می‌شوند.

هسته‌های کوچکتر که از ورقه‌های یک قطعه ای استفاده می‌کنند، کمتر در معرض اعوجاج مغناطیسی قرار دارند، اما امکان آن وجود دارد. یک دلیل بالقوه این است که یکی از جنبه‌های اصلی فولاد مغناطیسی، کمیتی به نام نفوذ پذیری می‌باشد که می‌تواند از یک قسمت ورقه دایروی تا قسمت دیگر، متغیر باشد. نفوذ پذیری متناسب با چگالی شاری بوده که فولاد هسته به اشباع مغناطیسی می‌رود. از این رو، اگر نفوذ پذیری ورقه‌ها متفاوت باشد، برخی از قسمت‌های آن ممکن است اشباع شده و گرم تر گردد که منجر به اعوجاج ناشی از حرارت مانند خمیدگی می‌شود. به این دلیل، برخی از کارخانه‌های سازنده موتور، به هنگام یکپارچه کردن هسته‌های 2-قطبی، ورقه‌ها را در محیط شیفتمی‌دهند؛ زیرا با تعداد کمک قطب، بیشترین احتمال وجود دارد که تحت تاثیر تغییرات نفوذ پذیری قرار گیرند.

## تخلیه‌های الکترواستاتیکی

دومین عامل اصلی جریان مخرب یاتاقان، پدیده ای تا حدودی تعجب برانگیز به نام الکتریسیته ساکن می‌باشد. اغلب الکتریسیته ساکن را به عنوان منبع جریان‌های مضر در نظر نمی‌گیریم. هر چند، سطوح مخرب جریان یاتاقان به دلیل تخلیه‌های الکترواستاتیکی (شکل 11)، می‌تواند در کاربردهایی مانند تسمه‌ها، رول پیچ‌های کاغذی و فن‌ها و دمنده‌ها ایجاد شود. هر چه ماشین بزرگتر باشد (مانند ژنراتورهای بادی که برخی از آنها دارای پره‌های 330 فوت (100 متر) هستند)، جریان‌های یاتاقان بالقوه بیشتر خواهد بود.

**شکل 10. ورقه‌های جدا** ورقه‌های جدا شده که هر کدام یک-هشتم یک لایه از هسته استاتور را تشکیل می‌دهد.

**شکل 11. سطح کدر** سطح کدر و حفره‌های الکتریکی در حلقه داخلی یک یاتاقان غلتکی (بلبرینگ).

## تزویج خازنی

تزویج خازنی بین استاتور و روتور، اغلب زمانی اتفاق می‌افتد که موتور از طریق یک VFD تغذیه شود. ولتاژهای ناشی از کلیدزنی بسیار سریع ترانزیستورهای دوقطبی گیت عایقی (IGBT) در شکل موج‌های خروجی مدولاسیون پهنای-پالس (PWM) (شکل 12) مربوط به یک VFD، از طریق فاصله هوایی بین استاتور و روتور، در روتور و شفت القا می‌شود. فرکانس کلیدزنی IGBT، که فرکانس حامل (کریر) نیز نامیده می‌شود، جریان مستقیم را به بلوک‌های شبیه سازی شده ac در شین dc قسمت اینورتر درایو، برش می‌دهد.

ولتاژ القا شده ناشی از کلیدزنی، باعث تجمع پتانسیل در روتور می‌شود تا از قابلیت شکست عایق روان کننده یاتاقان عبور کرده و منجر به تخلیه کوچکی از طریق یاتاقان به زمین شود. این فرایند بطور پیوسته تکرار می‌شود، در نتیجه دامنه آسیب به یاتاقان افزایش پیدا می‌کند. پالس‌های تخلیه، گونه ای از ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) می‌باشد که در حقیقت مواد را از سطح قسمت‌های تحت تاثیر یاتاقان‌ها، بر می‌دارد (شکل 11). ولتاژ ناشی از برش توان ac به dc با تغذیه تریستوری و یکسوسازهای کنترل کننده سیلیکونی (SCR) در یک درایو dc نیز به همین ترتیب می‌تواند منجر به جریان‌های مخرب یاتاقان در موتورهای dc شود.

هر چه فرکانس کلیدزنی بیشتر باشد، نرخ پالس‌های تخلیه جریان بیشتر بوده و آسیب سریع تر رخ می‌دهد. VFDها معمولاً در فرکانس‌های کلیدزنی بالاتر، کم سروصداتر هستند؛ هرچند، فرکانس‌های بالاتر، مخرب تر از فرکانس‌های پایین تر می‌باشند. در صورت امکان، فرکانس کلیدزنی بهتر است، تا حد امکان کم\_ترجیحا کمتر از 6 kHz باشد، بدون اینکه سروصداهای غیرقابل قبول تولید کند. اغلب استفاده از VFD با



رکانس‌های حامل قابل تنظیم تا افزایش کمتر از 1 kHz، مطلوب می‌باشد. با این کار امکان تنظیم دقیق فرکانس حامل بر روی پایین‌ترین حدی که عملیات قابل قبول ارائه می‌دهد، وجود خواهد داشت.

تجربه برخی از کاربران و تحلیل‌های خرابی، این گمان را در سر ایجاد می‌کنند که عملکرد با سرعت ثابت، احتمال آسیب به جریان یاتاقان را کاهش می‌دهد. اگرچه به نظر این قضیه اثبات نشده است، مشاهده شد که یاتاقان‌هایی که با سرعت ثابت کار می‌کنند، به آسیب‌های ناشی از عملکرد EDM مرتبط با تخلیه جریان‌های الکتریکی، آسیب پذیرتر هستند.

اگر موتور و درایو بطور موثری به هم و به گراند سیستم الکتریکی، متصل نشده باشند، دامنه ولتاژ می‌تواند افزایش یابد. زیرا این ولتاژ مد مشترک است، یعنی پتانسیل ولتاژ از خنثای سیم پیچی موتور، به بالای سطح پتانسیل گراند نرمال افزایش می‌یابد. همچنین، این ولتاژ مد مشترک، با فرکانس بسیار بالایی نوسان کرده و روتور و استاتور را بصورت خازنی تزویج می‌کند.

هر چه ولتاژ مد مشترک و فرکانس کلیدزنی VFD بیشتر باشد، امکان جریان‌های مخرب یاتاقان بیشتر خواهد بود. توصیه می‌شود که از کابل‌های گراند با امپدانس پایین استاندارد برای ایجاد مسیر گراند مشترک بین موتور و درایو، استفاده شود، زیرا اثر پوسته‌ای خود یک عامل است. هرچه فرکانس بیشتر باشد، جریان متناوب بیشتر روی سطح یا به سطح (پوسته) هادی نزدیک می‌شود، از این رو عبور مقاومت-به-ولتاژ تحت تاثیر مساحت سطح هادی قرار می‌گیرد. هادی استاندارد، مساحت سطحی بیشتری نسبت به هادی یک رشته (مفتول) دارد، از این رو مسیر با مقاومت (امپدانس) کمتری را ارائه می‌دهد.

شکل 13. کابل استاندارد کابل با امپدانس-پایین استاندارد، ساخته شده مخصوص کاربردهای VFD.

### روش‌های تست به منظور تایید و ارزیابی حضور جریان‌های یاتاقان یا شفت

رایج‌ترین روش‌های تست به منظور تایید حضور جریان‌های یاتاقان یا شفت، تحلیل لرزش و تحلیل ولتاژ با بدنه (زمین) می‌باشد. تکنیک‌های دیگری که می‌توان از آن استفاده کرد، شامل تحلیل روان‌کننده و تحلیل میکروسکوپی می‌باشد؛ هر چند تحلیل میکروسکوپی را تنها می‌توان پس از اینکه یاتاقان خراب شد، انجام داد.

اگرچه تست عیب‌یابی می‌تواند حضور جریان‌های یاتاقان مخرب بالقوه را آشکار سازد، یک رویکرد بهتر می‌توان مانیتورینگ شرایط باشد. مانیتورینگ شرایط با ارائه مقادیر مبنا برای اندازه‌گیری‌های تست و سپس توسعه این اندازه‌گیری‌ها در زمان، آغاز می‌گردد. یک سطح افزایش، یعنی توسعه صعودی، نیاز به

عملکرد احتمالی را مشخص می‌کند. تشخیص به موقع یک روند صعودی همچنین اغلب زمان مورد نیاز برای خاموشی برنامه ریزی شده یا دیگر عملیات را، فراهم می‌سازد.

## تحلیل لرزش

تحلیل لرزش را می‌توان برای تعیین اینکه یاتاقان دارای آسیب یخزدگی \_ که می‌تواند ناشی از جریان‌های تخلیه باشد \_ هست یا خیر، مورد استفاده قرار داد. یک طیف با رزولوشن بالا از بازه 2-4 kHz (شکل 14)، می‌تواند باند انرژی بلند غیرعادی، یعنی شکل تپه مانند، را مشخص کند؛ زیرا دامنه به تدریج به یم پیک گرد رسیده و سپس کاهش می‌یابد. با پیشرفت شرایط خطا نسبت به زمان، سطوح لرزش در فرکانس‌های خطای یاتاقان، ظاهر می‌گردد. برخی از تحلیلگرهای لرزش، دارای قابلیت اندازه گیری انرژی ضربه یا g's شتاب می‌باشد؛ که هر کدام ابزاری برای تعیین مقدار انرژی ضربه به منظور عیب یابی خطای یاتاقان می‌باشد.

شکل 14. طیف لرزش طیف لرزش با رزولوشن بالا

## تحلیل شفت به بدنه (زمین)

همان طور که پیشتر گفته شد، هیچ روش شناخته شده ای برای اندازه گیری جریان‌های یاتاقان وجود ندارد، و هیچ راه عملی برای اندازه گیری مستقیم جریان‌های شفت نیست. اندازه گیری جریان شفت نیازمند قرار دادن یک کویل ترانس جریان در اطراف شفت درون موتور می‌باشد. روش معمول برای آشکارسازی حضور جریان‌های یاتاقان و شفت به شدت مخرب، اندازه گیری ولتاژ از شفت به زمین، یعنی بدنه موتور، می‌باشد.

## ولتاژ شفت

یکی از میان چالش‌های موجود برای اندازه گیری ولتاژ شفت به بدنه موتور، این است که یاتاقان‌ها تقریباً به صورت تصادفی، از حالت عایق به حالت هادی در می‌آیند. در نتیجه، هنگامی که امکان حضور جریان‌های مخرب یاتاقان ارزیابی می‌شود، بایستی بالاترین ولتاژ اندازه گیری شده را لحاظ کنیم.

ولتاژ شفت را می‌توان با استفاده از یک مجموعه مولتی متر دیجیتالی (DMM) برای مقایسه ولتاژ، اندازه گیری کرد. امیدانس ولت متر، بر روی اندازه گیری‌های بدست آمده تاثیر می‌گذارد؛ مولتی مترهای با امیدانس بیشتر، دقیق تر می‌باشند. یک سر مولتی متر را به بدنه ماشین متصل کنید. یک مداد #2 برداشته و چوب

سمت پاک کن آن را بردارید تا "سر" کربن آن مشاهده شود. از یک اهم متر برای تایید اینکه "سر" گرافیت در مداد شکسته نباشد، استفاده کنید؛ بدین صورت که مقاومت را از سر پاک کن قبلی تا سر نوشتنی آن، اندازه بگیرید. سر دیگر DMM را به سر مداد متصل کنید و اجازه دهید آن سر مداد با شفت در حال دوران، تماس پیدا کند. نقطه اتصال تا حد امکان باید به یاتاقان نزدیک باشد (شکل 15).

**شکل 15. اندازه گیری ولتاژ شفت** ولتاژ شفت را می‌توان با DMM اندازه گیری کرد. به استفاده از مداد برای اتصال به شفت، توجه کنید.

اگر در یک بلرینگ یا یاتاقان غلتشی ولتاژ بیش از  $100\text{ mV ac}$  یا در یاتاقان‌های بوشی بیش از  $200\text{ mV ac}$  شود، جریان شفت احتمالاً آنقدر زیاد هست که باعث خرابی یاتاقان شود. یک روش تست دیگر، مبتنی بر NEMA MG1، اندازه گیری ولتاژ شفت از یک سر به سر دیگر شفت (با استفاده از دو نقطه مداد و DMM) می‌باشد. اگر ولتاژ بیش از  $300\text{ mV ac}$  شود، امکان آسیب یاتاقان وجود دارد. روش NEMA از حد  $300\text{ mV ac}$  برای همه انواع یاتاقان‌ها، استفاده می‌کند.

توجه: هنگامی که موتور با VFD کار می‌کند، مدت تخلیه‌های ولتاژ ممکن است تنها چند نانو ثانیه باشد. در نتیجه DMM‌های مرسوم می‌تواند ولتاژهای کمتری از تست اسپیلوسکوپ که بعداً در این مقاله توصیف می‌شود، را نشان دهد.

## جریان‌های شفت

روش "تایمرهای قدیمی" برای بررسی سطوح مخرب جریان یاتاقان، استفاده از کابل جوش و تماس هر سمت آن یک سر شفت موتور به هنگام عملکرد آن، می‌باشد. در صورتی که در دفعه دومی که کابل به شفت وصل یا از آن قطع شد، جرقه تولید شود، فرض می‌شود که جریان مخرب در یاتاقان وجود دارد. گونه مدرنی از این تست، اعمال کابل جوش به عنوان یک پل اتصال کوتاه از سر شفت به آن سر شفت و اندازه گیری جریان عبوری از کابل می‌باشد. هم‌اکنون جریان‌های بیش از  $20\text{ A}$ ، نشان دهنده سطوح مخرب جریان یاتاقان در نظر گرفته می‌شود.

مرحل تست زیر، بر مبنای سه روش جایگزین برای اندازه گیری پتانسیل شفت برای جریان‌های گردشی توصیف شده در استاندارد IEEE 112 می‌باشد. در موتورهایی که همه یاتاقان‌ها یا همه به جز یکی از یاتاقان‌های آنها عایق شده است، از این تست‌ها می‌توان برای آشکارسازی حضور پتانسیل شفت، همزمان با کار کردن موتور، استفاده کرد.

نخست، از یک جاروبک مخصوص شفت (شکل 16) برای اتصال کوتاه یاتاقان عایق نشده (یا در صورتی که همه عایق شده باشند، یکی از یاتاقان‌ها) استفاده می‌شود. جاروبک در نزدیکی یاتاقان به شفت اعمال می‌شود و با یک قطعه کابل مسی کوتاه به بدنه متصل می‌شود. این تست با اندازه گیری پتانسیل شفت به بدنه در هر یک از یاتاقان‌ها، انجام می‌شود.

سپس یک اسیلوسکوپ با امپدانس بالا که یک سر آن به بدنه زمین شده و سر دیگر آن به جاروبک شفت متصل شده، بکار گرفته می‌شود. ترجیه داده می‌شود که از هادی شیلددار با امپدانس کن برای سرهای اسکوپ استفاده شود تا تداخل الکترومغناطیسی کمینه شود. این شیلد بهتر است تنها در یک سر گرانند شود. پس از اتصال سرها، ولتاژهای پیک اندازه گیری می‌شود.

روش دوم، جایگزینی برای اسیلوسکوپ می‌باشد که در آن از ولت‌متر با امپدانس بالا استفاده می‌شود. هم ولتاژ ac و هم ولتاژ dc باید در هر یاتاقان اندازه گیری شود. ولتاژ پیک را می‌توان با اضافه کردن سطح dc و ضرب عدد 1.4 در مقدار ولتاژ rms ac، تخمین زد. این ولتاژ پیک تخمین زده شده، هر چند ممکن است به اندازه قابل ملاحظه ای کمتر از مقدار پیک واقعی باشد.

یک روش دیگر، شامل اندازه گیری ولتاژ ac با اتصال جاروبک‌های مخصوص شفت به سرهای مخالف شفت، همزمان با کار کردن موتور با سرعت و ولتاژ نامی می‌باشد. مراحل آن همانند روش نخست است، با این تفاوت که به جای اسیلوسکوپ از آوومتر با مقاومت پایین استفاده می‌شود. در این آرایش تست، از آوومتر به عنوان یک ولت متر کالیبره نشده با امپدانس پایین استفاده می‌شد. مقادیر اندازه گیری شده با آن، ممکن است شاخص دقیقی از جریانی که ممکن است به هنگام شکست لایه‌های ورقه در یاتاقان‌ها (ها) جاری می‌شود، نباشد. در صورتی که تاریخچه ای از تست‌های مشابه برای مقایسه موجود باشد، این روش سودمند می‌نماید.

**شکل 16. جاروبک زمین کننده شفت** جاروبک "مسواک مانند" زمین کننده شفت، مسیر جریان یاتاقان را اتصال کوتاه می‌کند.

استاندارد IEEE، هیچ سطح تفرانس یا آستانه ای برای تعیین وجود سطوح جریان مخرب در یاتاقان، ارایه نکرده است. هر چند، بیان می‌دارد که توسعه این تست ها، می‌تواند برای آشکارسازی افزایش سطوح جریان، و از این رو افزایش احتمال جریان‌های مخرب یاتاقان، سودمند باشد.

## تحلیل روان کننده

در تحلیل روان کننده، از تست آزمایشگاهی برای تحلیل روان کننده یاتاقان، استفاده می‌شود. نمونه برداری از گریس، اغلب غیرعملی است؛ زیرا معمولاً ابزار مستقیمی برای بدست آوردن نمونه تازه وجود ندارد، مگر اینکه موتور عملاً باز شود. گریسی که از درگاه گریس اضافی خارج می‌شود، غیرقابل اطمینان است، زیرا طول زمانی که آخرین بار یاتاقان را روغن کاری کرده است را نمی‌توان تعیین کرد.

روغن بکار رفته برای روان کاری یاتاقان ها، معمولاً با دسترسی به سطح حلقه روغن مربوط به یک ماشین با یاتاقان بوشی، یا مقداری از روغن از مخزن موتور بی-کار با روان کننده روغن \_چه یاتاقان غلتشی و چه بوشی باشد، برای نمونه گیری بدست می‌آید. توصیه نمی‌شود که نمونه گیری از موتور در حال کار انجام شود، زیرا ریسک از دست رفتن سریع روغن وجود دارد.

در صورتی که تحلیل روان کننده، حضور فلز از یاتاقان را نشان دهد، ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) مرتبط با تخلیه‌های جریان یاتاقان، یک عامل احتمالی می‌باشد. هر چند، اباری برای تمایز میان ذرات ناشی از عبور جریان الکتریکی و ذرات ناشی از خوردگی مکانیکی، وجود ندارد.

## تحلیل میکروسکوپی

تحلیل میکروسکوپی را می‌توان با یک آزمایشگاه دارای آن قابلیت، اغلب کارخانه سازنده یاتاقان، انجام داد. اگر شما یک میکروسکوپ از بازار تهیه کنید، ممکن است خود بتوانید این تحلیل را انجام دهید. میکروسکوپ موجود در بازار را می‌توان به طور مستقیم بر روی یاتاقان قرار داد تا سطح مورد ارزیابی را بزرگ نمایی کرد. اغلب جریان الکتریکی موجب ذرات مذاب می‌شود. آسیب‌های با منشأ الکتریکی، اغلب به صورت نشانه‌های لکه مانند با مشاهده گرمای ناشی از اصطکاک مکانیکی، ظاهر می‌شوند.

راه حل‌های حذف یا کنترل جریان‌های شفت و یاتاقان

گام نخست در ارایه راه جل برای مسایل جریان یاتاقان و شفت، تعیین نوع منبع دلیل احتمالی است. پیش از این منابع را مشخص کردیم و شایان این است که آنها را تکرار کرده و سپس به حذف یا کنترل آنها پردازیم.

سه منبع اصلی جریان‌های چرخشی وجود دارد که می‌تواند از شفت و در نتیجه یاتاقان‌ها عبور کند. یک منبع، عدم تقارن مغناطیسی می‌باشد، منبع دیگر تخلیه‌های الکترواستاتیکی است، سومین منبع نیز تزویج خازنی بین سیم پیچی استاتور و روتور است. هر کدام از این منابع، می‌تواند به تنهایی یا بطور همزمان، وجود داشته و از این رو جریان‌های یاتاقان را بوجود آورد.

**شکل 17. یاتاقان با سر مخالف درایو عایق شده** جریان چرخشی ناشی از عدم تقارن مغناطیسی را می‌توان با عایق سازی یک یاتاقان، از میان برد.

**شکل 18. جاروبک کربن-نقره زمین کننده شفت** جاروبک‌های آغشته به نقره با مقاومت پایین، برای استفاده به عنوان جاروبک زمین کننده شفت، مناسب می‌باشد.

## عدم تقارن مغناطیسی

عدم تقارن مغناطیسی می‌تواند منجر به جریان‌های چرخشی از بدنه به یاتاقان، به شفت، به یاتاقان دیگر و دوباره به بدنه شود. جریان چرخشی را در این مورد می‌توان با قطع مدار که اغلب با عایق سازی سر مقابل درایو و یاتاقان انجام می‌شود، حذف کرد (شکل 17).

جریان یاتاقان ناشی از عدم تقارن را با عایق سازی جاروبک زمین کننده شفت، می‌توان کاهش داد، اما حذف نمی‌توان کرد. این در صورتی است که بتوان موتور را به منظور نصب این تجهیز، اصلاح کرد؛ و همچنین اگر مقرون بصرفه باشد. مدار جاروبک از بدنه به شفت، یک مدار موازی (فرعی) با مقاومت کم (شکل 9) را برای انتقال جریان از مدار یاتاقان با مقاومت بسیار بیشتر، ارایه می‌دهد. هر چه مقاومت مدار جاروبک در مقایسه با مقاومت یاتاقان کمتر باشد، جریان بیشتری از یاتاقان به این مسیر موازی انتقال داده می‌شود. برای کارایی بیشتر، جاروبک بهتر است بین یاتاقان‌ها قرار گیرد. اگر خارج از یاتاقان قرار گیرد، از حلقه جریان چرخشی موتور خارج می‌شود. توجه شود که مقاومت در این روش، بسیار حیاتی است. یاتاقان‌های گراندینگ مخصوص برای این مقصود، دارای مقاومت بسیار کمی هستند (شکل 18). جاروبک‌های کربنی مرسوم، مقاومت مورد نیاز را نداشته و از این رو سازندگان، از جاروبک‌هایی استفاده می‌کنند که آغشته به نقره شده اند. یک

نوع دیگر از جاروبک‌های گراندینگ شفت، مشابه با برس‌های مویی بوده که با سطح شفت تماس می‌یابد (شکل 16). کارخانه‌های سازنده این نوع جاروبک‌های گراندینگ، اغلب از مویی‌های آغشته به نقره یا طلا استفاده می‌کنند تا مقاومت کاهش یافته و لایه ای با مقاومت کم بر روی شفت حفظ شود.

اگر مقاومت مسیر جاروبک انتقال دهنده جریان از یاتاقان افزایش یابد، مثلاً به دلیل آلودگی یا تغییر در لایه، جریان‌های مضر بالقوه تری از یاتاقان عبور می‌کند. قسمتی از مدار جاروبک که بیشترین ریسک را برای افزایش مقاومت دارد، سطح تماس شفت می‌باشد. با کثیف شدن یا خورد شدن سطح شفت، مقاومت لایه تشکیل شده در مسیر جاروبک، افزایش می‌یابد. و مقاومت بیشتر در مدار جاروبک، منجر به عبور جریان کمتر از آن و در نتیجه جریان بیشتر از یاتاقان، می‌شود.

به منظور ارایه کارآمدترین حفاظت از هر دو یاتاقان موتور، یک جاروبک زمین کننده باید در سمت داخلی هر یاتاقان قرار داده شود. بنابراین، نیاز به دو نصب جاروبک می‌باشد. هرچند، اگر احتمال جریان چرخشی بین موتور و وسیله حرکت داده شده وجود داشته باشد، و تنها از یک جاروبک استفاده شود، بهتر است که در سمت درایو باشد.

### تخلیه‌های الکترواستاتیکی

دومین دلیل اصلی جریان‌های مخرب یاتاقان، الکتریسیته ساکن می‌باشد. سطوح آسیب رساننده جریان یاتاقان ناشی از تخلیه‌های الکترواستاتیکی، ممکن است در کاربردهایی مانند تسمه‌ها، رول پیچ‌های کاغذی و فن‌ها و دمنده‌ها بوجود آید. راه حل‌هایی که پیش از این برای عدم تقارن مغناطیسی نام برده شد را می‌توان برای حل مساله تخلیه‌های الکترواستاتیکی، مورد استفاده قرار داد. در برخی از کاربردها مانند رول‌های محصول فرآوری که تولید الکتریسیته ساکن می‌کنند، یک ماده دسته گل مانند زمین شده، رول را به منظور قطع الکتریسیته ساکن، متصل می‌کند.

### توزیع خازنی

توزیع خازنی بین استاتور و روتور (شکل 8)، می‌تواند زمانی که موتور از طریق VFD تغذیه می‌شود، رخ دهد. این درایوها قادر به تولید ولتاژهای مد مشترک بوده که پتانسیل خنثای سیم پیچی سه فاز را به شدت به بالای پتانسیل زمین، افزایش می‌دهد. نتیجه، تخلیه از شفت به زمین، با مسیر جریان از طریق یک یا هر دو یاتاقان به زمین می‌باشد.

طبق استاندارد کمیسیون الکتروتکنیکی بین المللی (IEC) شماره IEC 60034-25، "راهنمایی برای طراحی و عملکرد موتورهای ac که مخصوص منبع مبدل طراحی شده اند"، برخی از عوامل فیزیکی و ویژگی‌های دیگر موتور که می‌تواند منجر به ولتاژهای شفت و در نتیجه جریان یاتاقان شود، شامل موارد زیر می‌شود:

- اندازه فیزیکی بزرگ یا توان خروجی بالای ماشین، تمایل به افزایش ولتاژ شفت موتور دارد.
- شکل فیزیکی موتور نیز بر روی ولتاژ القا شده شفت تاثیر می‌گذارد: شکل کوتاه و ضخیم برای طراحی موتور، اساساً بهتر از دراز و نازک می‌باشد.
- تعداد قطب بالا تمایل به کاهش ولتاژ شفت القایی دارد.
- سرعت اجرای آهسته و دمای بالای یاتاقان، و نیز بار زیاد یاتاقان، ریسک جریان یاتاقان را به دلیل لایه روان کننده نازک تر، بیشتر می‌کند.

### راه حل‌های تزویج خازنی

راه حل‌هایی که به تزویج خازنی می‌پردازند، شامل عایق کردن یاتاقان‌ها (شکل 19)، و استفاده از جاروبک‌های زمین کننده شفت برای هر دو یاتاقان می‌باشد. یاتاقان‌ها را می‌توان با تعدادی از روش‌های مختلف شامل بدنه عایق، جورنال‌های یاتاقان عایق، عایق سازی حلقه بیرونی یاتاقان، عایق سازی حلقه درونی یاتاقان، و عناصر غلتکی سرامیکی می‌باشد.

شایان ذکر است که عایق سازی تنها یک عایق مانند سر بدون-درايو، موثر نیست، زیرا جریان هنوز مسیر هود را از یاتاقان سمت درایو، می‌بندد. گریس‌های هادی در یاتاقان نیز وجود دارد که جریان را با استفاده از ذرات فلزی معلق در گریس که آن را هادی می‌سازد، عبور می‌دهد. هر چند، شواهد قدرتمندی وجود ندارد که تایید کند این روش کارآمد است. یک مطالعه آزمایشگاهی، دریافته است که مواد هادی در گریس، خوردگی مکانیکی را افزایش می‌دهند و در نتیجه عمر یاتاقان را کم می‌کنند.

یک نکته کلیدی دیگر برای زیر زره بین قرار دادن تزویج خازنی، این است که VFDها منبع آن می‌باشند. اگر فناوری‌های درایو آینده بتواند در این زمینه پیشرفته ایجاد کند، ممکن است با استفاده از طراحی درایو بتوان جریان‌های یاتاقان ناشی از تزویج خازنی را از بین برد.

شکل 19. عایق سازی هر دو یاتاقان  
هر دو یاتاقان عایق شده تا از جریان در یاتاقان جلوگیری شود.



## یاتاقان‌های عایق

واژه کلیدی در عبارت تزویج خازنی، "خازنی" بودن آن می‌باشد. در صورتی که مدار عایق شود، این کمیت ظرفیت کمی خواهد داشت. به منظور رسیدن به این هدف با یاتاقان عایق، بهتر است که حلقه داخلی یاتاقان (روی جورنال) را به جای روی بیرونی (روی پوشاننده) عایق کرد؛ زیرا حلقه داخلی دارای قطر کمتری است و به همین ترتیب سطح کمتری دارد. این یک مزیت در یاتاقان‌های سرامیکی ترکیبی است: ظرفیت بر مبنای سطح تماس کوچک بین عناصر غلتکی و حلقه‌های بلبرینگ می‌باشد، و ضخامت عایق برابر با قطر یک عنصر غلتشی می‌باشد.

هنگامی که عایق اضافه شود، انتقال گرما نسبت به حالت با سطح تماس فلزی، کاهش می‌یابد. یک مصالحه ذاتی با عایق یاتاقان، استفاده از ضخیم‌ترین پوشش ممکن بدون تاثیر شدید بر روی انتقال گرما و در نتیجه افزایش دمای عملکرد یاتاقان، می‌باشد.

برخی از کارخانه‌های سازنده، یاتاقان‌هایی را پیشنهاد می‌کنند که دارای پوشش اکسید آلومینیوم یا سرامیکی می‌باشند در حلقه بیرونی می‌باشند. هنگامی که به جای حلقه داخلی، حلقه بیرونی عایق شود، نیاز به پوشش سرامیکی یا اکسید آلومینیوم بیشتری \_گاهی تا "0.012 (300 μm) می‌باشد. از آنجا که این پوشش ها، مساحت زیادی را در مقایسه با حلقه داخلی تحت پوشش قرار می‌دهند، کارایی آنها به اندازه گزینه دیگر عایق سازی یاتاقان نیست.

اگر یک یاتاقان یا هر دو یاتاقان در یک موتور دارای پوشش عایق در سمت بیرون حلقه بیرونی بوده، و واریسی آن شواهدی از جریان‌های یاتاقان را نشان ندهد، می‌توان آن را با همان نوع یاتاقان تعویض کرد. در نتیجه، در صورتی که شواهدی از جریان‌های مخرب یاتاقان آشکارسازی شود، استفاده از روش عایق موثرتری را باید در نظر گرفت. اگر واریسی یاتاقان عایق، نشان دهنده آسیب ناشی از جریان‌های یاتاقان باشد، درپوش و براکت یاتاقان را بررسی کنید. تماس نامطلوب بین درپوش یاتاقان یا آشمارساز مقاومت یاتاقان (RTD) و خود یاتاقان، می‌تواند عایق را دور زده، و آن را ناکارآمد سازد.

یکی از اشکال‌های پوشش‌های اکسید آلومینیومی، این است که به سادگی برش می‌خورد. زمانی که یاتاقان برداشته شده یا پوشش بصورت تصادفی ضربه بخورد، این اتفاق می‌تواند رخ دهد. پوشش سرامیکی یا اکسید آلومینیومی یک ژورنال یاتاقان (شکل 20)، تعادل دینامیکی را دشوارتر می‌سازد؛ زیرا روتور را نمی‌توان روی ژورنال‌های پوشیده شده در موضع متعادل، قرار داد. مساحت مجاور شفت که متمرکز بر ژورنال یاتاقان است، باید مورد استفاده قرار گیرد. بارگذاری خط غلتک‌های موضوع متعادل، همراه با وزن روتور، احتمالاً پوشش اکسید آلومینیومی یا سرامیکی را می‌شکاند.

در صورت استفاده از اپوکسی، باید قادر به تحمل فشرده شدن یاتاقان و نیروهای بار باشد. محصولات اپوکسی با قدرت بالا و مقاوم در برابر خوردگی مانند بتونه Belzona Supermental یا Devcon Titanium،

اغلب مناسب هستند، اما بهتر است از اپوکسی‌های با مقاومت کمتر، اجتناب شود. یاتاقان‌های بوشی باید دارای پوشش سرامیکی یا اکسید آلومینیوم بر روی پوسته بیرونی باشند تا جریان یاتاقان کاهش داده شود. این پوشش را می‌توان توسط سازنده اصلی، یا به عنوان قسمتی از مقاوم سازی، انجام داد. لایه روغن در یاتاقان نیز، به عنوان عایق به منظور جلوگیری یا کاهش جریان یاتاقان، کار می‌کند. از این رو پوشش حلقه بیرونی یاتاقان بوشی، در برابر جریان‌های یاتاقان، موثرتر از پوشش یاتاقان‌های غلتشی است. بایستی مراقب کنترل یاتاقان بود، زیرا اکسید آلومینیوم یا سرامیک در عایق یاتاقان، به سادگی می‌شکند. روش‌های دیگر عایق سازی یاتاقان‌های بوشی، شامل افزودن Micrata یا Glastic (فایبرگلاس) بین پوسته بیرونی و بدنه (شکل 21)، اعمال Scotchply به پوسته بیرونی یاتاقان، و اعمال مواد باندینگ نوع آرمیچر به پوسته بیرونی یاتاقان می‌باشد. ماده باندینگ تمایل به ورقه ورقه شدن و تضعیف به دلیل اتصال روغن روان کننده با آن، دارد؛ بنابراین، این روش توصیه نمی‌شود.

شکل 21. یاتاقان با بوش عایق یاتاقان بوشی با عایق سازی قطر بیرونی با Glastic G-9.

## عایق سازی بدنه

عایق سازی بدنه (شکل 2)، به تکرار توسط کارخانه سازنده اصلی به عنوان روش مقاوم سازی برای ارابه عایق سازی یاتاقان، انجام می‌شود. هر چه عایق بدنه ضخیم تر باشد، ظرفیت خانی کمتر، و در نتیجه جریان یاتاقان شدید، کمتر خواهد بود. هر چند، عایق‌های کلفت تر، از انتقال گرما جلوگیری می‌کند، و این روش همیشه نیازمند قضاوت در ضخامت مورد استفاده آن است.

## یاتاقان‌های سرامیکی مرکب

استفاده از یاتاقان‌های غلتکی، روشی ساده، ولی نسبتاً گران برای عایق سازی یاتاقان‌ها می‌باشد. این یاتاقان‌ها اصطلاحاً یاتاقان‌های سرامیکی مرکب نامیده می‌شوند (شکل 23)، زیرا اگرچه عناصر غلکی سرامیکی هستند، حلقه‌های بیرونی و درونی از جنس ترکیب فولاد یاتاقان سخت شده می‌باشند. یاتاقان‌های کاملاً سرامیکی با حلقه‌های سرامیکی و نیز عناصر غلتکی سرامیکی نیز ساخته می‌شوند، اما اغلب به سادگی در دسترس نبوده و حتی در مقایسه با یاتاقان‌های سرامیکی مرکب نیز، گران هستند.

ضخامت عایق یاتاقان‌های مرکب، قطر عنصر غلتکی (یعنی ساچمه یا غلتک سرامیکی) می‌باشد. مساحت سطح، محدود به سطح تماس کوچک میان ساچمه‌ها و حلقه‌ها می‌باشد. عنصر غلتکی سرامیکی از این رو، منجر به ضخامت عایق بسیار بیشتر از گزینه حلقه عایق شده می‌باشد و ظرفیت آن نیز بسیار کمتر است.

## شکل 21. یاتاقان سرامیکی مرکب یاتاقان‌های ساچمه‌ای و غلتکی مرکب.

پیش از این، مقادیر نامی بار یاتاقان‌های سرامیکی مرکب، معمولاً کمتر از یاتاقان‌های تمام فولادی مرسوم قابل مقایسه بوده است. هرچند، اکنون سازندگان زیادی یاتاقان‌های مرکب با ظرفیت بار مرکب با ظرفیت بار سرامیک برابر یا حتی در مواردی بیشتر از یاتاقان‌های فولادی مرسوم، ارائه می‌کنند. بررسی مقدار نامی بار دینامیکی یاتاقان سرامیکی مورد استفاده به جای یاتاقان فولادی معمولی، کار مناسبی است. یکی دیگر از مزایای عناصر غلتک-سرامیکی، این است که سبک‌تر از فولادی‌ها می‌باشند. در نتیجه، یاتاقان سرامیکی قادر به سرعت‌های عملیاتی بیشتری نسبت به یاتاقان‌های عنصر-غلتکی فولادی مشابه می‌باشند.

### راه‌های دیگر

در صورت امکان، راه‌های دیگر شامل عایق‌سازی تزویج (بین موتور و وسیله یا تجهیز حرکت داده شده مانند سرعت سنج و موتور)، عایق کردن یاتاقان تجهیز حرکت داده شده، یا افزودن جاروبک شفت به تجهیز حرکت داده شده می‌باشد. در کاربردهای حرکت تسمه‌ای، تسمه‌ها ممکن است ولتاژ شفت خازنی موتور را به صورت کارآمدی تقلیل دهد، یا ندهد.

### احتیاط در عایق‌سازی یاتاقان‌ها

عایق‌سازی هر دو یاتاقان‌های موتور، اغلب در از بین بردن جریان‌های یاتاقان در موتور، کارآمد می‌باشد. هر چند، انجام این کار می‌تواند ایجاد مسیر جریان بین شفت موتور و تجهیز متصل به آن مانند فن، پمپ، گیربکس، کند. در این صورت، آسیب ناشی از جریان یاتاقان، می‌تواند در تجهیز حرکت داده شده و لوازمی مانند سرعت سنج، رخ دهد. راه حل این موارد، شامل تزویج عایق شده یا اضافه کردن جاروبک زمین‌کننده شفت به یاتاقان سمت درایو موتور می‌باشد. تزویج، مسیر جریان شفت را قطع کرده و جاروبک گراندینگ یک مدار بای‌چس برای شفت و جریان یاتاقان ایجاد می‌کند و ولتاژ شفت را به شدت کاهش می‌دهد.

هنگامی که بدنه یاتاقان عایق شود، بایستی اقدامات مورد نیاز برای عایق‌سازی روی انتهایی یاتاقان، انجام شود. تغییرات محوری در مکان یاتاقان، می‌تواند موجب اتصال یاتاقان به درپوش یاتاقان شود که در صورت عدم عایق‌سازی، ایجاد یک مسیر بای‌پس عایق یاتاقان، می‌نماید. روش‌های رایج عایق‌سازی روی

یاتاقان، اعمال یک ماده عایق مانند Micarta یا Glastic (فایبرگلاس) به روی درپوش یاتاقان در هر سمت یاتاقان می‌باشد.

## جاروبک‌های گراندینگ شفت

اضافه کردن جاروبک‌های گراندینگ شفت به موتور با یاتاقان‌های عایق، کاربرد اصلی یاتاقان‌های گراندینگ شفت نیست. کاربرد معمول آنها در انتقال جریان شفت به خارج از یاتاقان می‌باشد. اگرچه آنها می‌توانند در کاربردهای VFD موثر باشند، عایق سازی مدار یاتاقان، اغلب اولویت بیشتری دارد. زیرا جاروبک زمین کننده (گراندینگ) شفت، به عنوان یک مدار موازی یا بای پس، همیشه اجازه عبور مقداری جریان از یاتاقان‌ها را می‌دهد.

به منظور کارایی بیشتر، جاروبک‌های گراندینگ شفت بایستی مدار با مقاومت بسیار کمی بین بدنه موتور و شفت، داشته باشند. دامنه جریان شفت در بیشتر موارد، چگالی جریان بسیار بالایی را در جاروبک گراندینگ ایجاد نمی‌کند. آنگاه این باعث تشکیل لایه اضافی می‌شود که این لایه دارای مقاومت بیشتری در مقایسه با سطح لخت شفت می‌باشد. با افزایش مقاومت لایه، مدار جاروبک گراندینگ جریان کمتری را حمل کرده، و یاتاقان جریان بیشتری را حمل می‌کند. نتیجه، خرابی سریع تر یاتاقان به دلیل افزایش سرعت ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)، و خرابی زودهنگام یاتاقان می‌گردد.

جاروبک‌های گراندینگ شفت نوع-موی یا کربن-نقره ای مرسوم (شکل 18) نیز، دارای مسایل تعمیر و نگهداری هستند، زیرا با گذشت زمان خورده شده و بایستی تعویض شوند و بهتر است بصورت دوره ای مورد بازرسی قرار گیرند. بتازگی توسعه ای در فناوری جاروبک‌های گراندینگ شفت ایجاد شده که از جو الیاف کربن میکروسکوپی برای ایجاد یک مسیر هادی از بدنه به شفت، استفاده می‌کند. این وسیله ظاهری شبیه به پلمپ لبه شفت دارد و معروف به حلقه گراندینگ شفت Aegis می‌باشد (شکل 24).

شکل 24. حلقه گراندینگ شفت جاروبک گراندینگ شفت با الیاف کربن میکرو.

## حفاظ فاراده

یک روش دیگر برای حل مساله تزویج خازنی، نصب حفاظ فاراده در استاتور می‌باشد. در این روش معمولاً از یک ماده سیم پیچ مسی زمین شده در بالای سیم پیچی استاتور، استفاده می‌شود. این وسیله ایجاد یک حفاظ الکترواستاتیکی کرده که دامنه جریان‌های ناشی از تزویج خازنی بین استاتور و روتور را، کاهش

می‌دهد. حفاظت‌فراده دارای ساختار پیچیده شکننده ای می‌باشد که آن را برای موتورهای با تولید انبوه، غیرعملی و غیراقتصادی می‌سازد.

## گراندینگ

کیفیت گراندینگ بین موتور و درایو نیز یک عامل مهم است. هر چه ولتاژ مد مشترک و فرکانس کلیدزنی VFD بیشتر باشد، امکان جریان‌های یاتاقان مخرب، بیشتر خواهد بود. یک روش جایگزین، کاهش فرکانس کلیدزنی VFD می‌باشد. در بسیاری از کاربردها، فرکانس کلیدزنی را می‌توان بدون تاثیر گذاشتن منفی بر روی عملکرد درایو یا موتور، کاهش داد.

یک راه حل عملی که می‌تواند جریان‌های یاتاقان را کاهش دهد، استفاده از کابل‌های زمین شده استاندارد و شیلد دار می‌باشد (شکل 13) تا ایجاد یک مسیر گراند مشترک بین موتور و درایو شود، زیرا عامل اثر پوسته ای، وجود دارد. هر چه که فرکانس بیشتر باشد، جریان متناوب بیشتری از یا نزدیک سطح (پوسته) هادی عبور می‌کند، از این رو گردش مقاومت-به-ولتاژ، تحت تاثیر مساحت سطح هادی قرار دارد. کابل استاندارد دارای مساحت سطحی بیشتری از هادی مفتولی می‌باشد، از این رو مسیری با مقاومت (امپدانس) کمتر ارائه می‌دهد، و شیلد دار کردن به کاهش اثرات فرکانس بالا، کمک می‌کند.

## فیلترها و چک ها

نصب فیلترها بین VFD و موتور میز به کاهش دامنه جریان‌های یاتاقان کمک می‌کند، اما این جریان را حذف نمی‌کند. فیلترها شکل موج خروجی VFD را تغییر داده تا ولتاژ مد مشترک، کمینه شود. اشکال اصلی فیلترها، هزینه و پیچیدگی مربوط به نصب آنها می‌باشد. اضافه کردن فیلتر و چک (اصلاح شکل موج جریان)، همچنین به کاهش ولتاژهای گذرا که می‌تواند موجب تنش بیش از اندازه سیم پیچی موتور و افزایش سروصدا شود، کمک می‌کند.