بسم الله الرحمن الرحیم

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–قدرت

طراحی و مدل‌سازی مدار میرا کننده ریپل ورودی DC میدان در سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون

توسط:

رضا کاظمی گل‌خندان

اساتید راهنما:

دکتر محمد توکلی بینا

دکتر مسعود علی‌اکبر گلکار

زمستان ۱۳۸۹

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: **رضا کاظمی گل‌خندان**

را با عنوان: **طراحی و مدل‌سازی مدار میرا کننده ریپل ورودی DC میدان در سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	محمد توکلی بینا	دانشیار	
۲- استاد راهنما	مسعود علی اکبر گلکار	دانشیار	
۳- استاد ممتحن	داوود عرب خابوری	استادیار	
۴- استاد ممتحن	عابدینی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی			

تقدیم به پدر و مادر عزیزم و تمامی کسانی که دوستشان دارم.

چکیده

ولتاژهای شفت از جمله پدیده‌هایی هستند که در ماشین‌های دوار وجود دارند و منابع متفاوتی به نسبت‌های مختلف در به وجود آوردن این ولتاژها سهیم هستند. در این پژوهش ولتاژهای شفت در مولدها مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. ولتاژ شفت باعث به وجود آمدن جریان‌های عبوری از یاتاقان‌ها می‌گردد. این جریان‌ها از روغن یاتاقان‌ها عبور می‌کنند و به مرور زمان با ایجاد حباب در آن‌ها منجر به از کار افتادن آن‌ها می‌شوند. اگر مقدار ولتاژ شفت از سطح ولتاژ شکست دی‌الکتریک مربوط به لایه روغن موجود در یاتاقان‌ها فراتر رود، جریان دشارژی از یاتاقان‌ها عبور خواهد کرد که این جریان منجر به وارد شدن صدمه‌های شدیدی به یاتاقان و مولد می‌گردد. به منظور بررسی پدیده ولتاژهای شفت، مدل‌سازی دقیق سیستم مورد مطالعه مورد نیاز است. در این پژوهش سعی شده است که مدل کاملی به منظور بررسی این پدیده در مولدهای سنکرون ارائه شود. جهت مقابله با این ولتاژ راهکارهایی وجود دارند که برخی از این راهکارها مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مزایا و معایب هر یک توضیح داده شده است. دو راهکار مقابله با ولتاژ شفت که عبارتند از نصب فیلتر پسیو و استفاده از مبدل ولتاژ باک در خروجی یکسوکننده سیستم تحریک، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و روی مدل ارائه شده از سیستم بکار گرفته شده‌اند. مدل استخراج شده از سیستم به همراه دو راهکار ارائه شده، در MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج به دست آمده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

کلید واژه: جریان یاتاقان، سیستم تحریک استاتیک، فیلتر پسیو، مبدل ولتاژ باک، ولتاژ شفت

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه... ۱

۱-۱- ولتاژ شفت ۳

۱-۱-۱- منابع الکترومغناطیسی ۳

۱-۱-۲- منابع الکترواستاتیکی ۶

۱-۱-۳- منابع ولتاژ خارجی که به سیمپیچی روتور اعمال میشوند ۷

۱-۱-۴- عدم تقارنهای مغناطیسی محتمل در سیمپیچی الکتریکی ۷

فصل ۲- بررسی مدلهای مختلف ارائه شده به منظور بررسی پدیده ولتاژهای شفت ۱۲

۲-۱- سیستمهای تحریک ۱۲

۲-۱-۱- تحریک کننده ۱۳

۲-۱-۲- تنظیم کننده ۱۳

۲-۱-۳- مبدل ولتاژ پایانه و جبرانکننده بار ۱۳

۲-۱-۴- پایدارساز سیستم قدرت ۱۳

۲-۱-۵- مدارهای محدودکننده و حفاظتی ۱۳

۲-۲- انواع سیستمهای تحریک ۱۴

۲-۲-۱- سیستم تحریک جریان مستقیم ۱۴

۲-۲-۲- سیستمهای تحریک جریان متناوب ۱۵

۲-۲-۲-۱- سیستمهای تحریک جریان متناوب با یکسوساز ساکن ۱۵

۲-۲-۲-۲- سیستمهای با یکسوساز چرخان ۱۶

۲-۲-۳- سیستمهای تحریک استاتیک ۱۷

۲-۲-۳-۱- سیستمهای با یکسوساز قابل کنترل و منبع ولتاژ ۱۷

۲-۲-۳-۲- سیستمهای با یکسوساز و منبع ترکیبی ۱۸

۲-۲-۳-۳- سیستمهای تحریک به همراه یکسوساز و منبع ترکیبی قابل کنترل ۱۹

۲-۳- توابع کنترلی و حفاظتی ۲۰

۲-۳-۱- تنظیمکنندههای AC و DC ۲۰

۲-۳-۲- پایدارساز سیستم تحریک ۲۱

۲-۳-۳- پایدارساز سیستم قدرت ۲۱

۲-۴- مبدل ولتاژ پایانه ماشین سنکرون ۲۲
۲-۵- تنظیمکنندههای ولتاژ ۲۴
۲-۶- سیستم تحریک استاتیک ۲۷
۲-۷- ولتاژ حالت مشترک ۲۸
۲-۸- ولتاژ شفت ۲۹
۲-۹- مدلهای مختلف ارائه شده به منظور بررسی پدیده ولتاژهای شفت ۳۰
۲-۱۰- راهکارهای مقابله با پدیده ولتاژهای شفت و جریان یاتاقانها ۳۶

فصل ۳- مدلسازی سیستم حالت مشترک ۳۷

۳-۱- مقدمه ۳۷
۳-۲- اثر پوستی ۳۷
۳-۳- خازنهای پارازیتی ۴۰
۳-۳-۱- ظرفیت خازنی بین دو دور ۴۱
۳-۳-۲- ظرفیت خازنی پوشش عایقی ۴۲
۳-۳-۳- ظرفیت خازنی مربوط به فاصله هوایی ۴۳
۳-۳-۴- ظرفیت خازنی بین یک دور و هسته ۴۴
۳-۴- مدل شفت ۴۴
۳-۵- مدل جاروبک ۴۴
۳-۶- کوپلاژهای خازنی بین قسمتهای مختلف ۴۵
۳-۶-۱- کوپلاژ خازنی بین روتور و قاب ۴۵
۳-۶-۲- کوپلاژ بین روتور و استاتور ۴۵
۳-۷- ظرفیت خازنی یاتاقان ۴۶
۳-۸- شبیهسازی مدل ارائه شده در Simulink ۴۹

فصل ۴- پیشنهادهای جبرانسازی ولتاژهای شفت: فیلتر پسیو و مبدل باک ۵۴

۴-۱- مقدمه ۵۴
۴-۲- فیلتر پسیو ۵۴
۴-۲-۱- شبیهسازی مدل ارائه شده سیستم با اعمال فیلتر پسیو به خروجی یکسوکننده ۵۵
۴-۳- تنظیم کننده باک ۶۰
۴-۳-۱- استفاده از مبدل باک به منظور مقابله با پدیده ولتاژهای شفت ۶۲
۴-۳-۲- شبیهسازی مدل ارائه شده سیستم با اعمال مبدل باک به خروجی یکسوکننده ۶۳

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۶

فهرست مراجع ۶۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: حداکثر مقدار مجاز سطح میدان مغناطیسی پسماند (گاوس)..... ۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: تولید جریان شفت از منبع مغناطیسی پسماند- عامل به وجود آورنده: شار محوری شفت..... ۴
شکل ۱-۲: تولید جریان شفت از منبع مغناطیسی پسماند- عامل به وجود آورنده: جریان محوری شفت ۴
شکل ۱-۳: تولید ولتاژ شفت از منبع الکترواستاتیکی..... ۶
شکل ۱-۴: تولید ولتاژ شفت به علت اعمال منبع ولتاژ خارجی به سیمپچی روتور..... ۷
شکل ۱-۵: ولتاژ شفت تولید شده در ماشینهای الکتریکی به واسطه عدم تقارنهای مغناطیسی موجود در سیمپیچی الکتریکی – ایجاد ولتاژ بین دو انتهای شفت مولد ۸
شکل ۱-۶: ولتاژ شفت تولید شده در ماشینهای الکتریکی به واسطه عدم تقارنهای مغناطیسی موجود در سیمپیچی الکتریکی- ایجاد شار بین دو انتهای شفت مولد..... ۹
شکل ۲-۱: نمودار توابع کنترلی تحریک مولد سنکرون ۱۲
شکل ۲-۲: سیستم تحریک جریان مستقیم به همراه آمپلیدین ۱۴
شکل ۲-۳: سیستم تحریک متناوب به همراه یکسوساز با تحریک کنترل شده ۱۵
شکل ۲-۴: سیستم تحریک متناوب با یکسوساز قابل کنترل..... ۱۶
شکل ۲-۵: سیستم تحریک بدون جاروبک..... ۱۷
شکل ۲-۶: سیستم تحریک با یکسوساز قابل کنترل..... ۱۸
شکل ۲-۷: سیستم تحریک با یکسوساز و منبع ترکیبی..... ۱۹
شکل ۲-۸: سیستم تحریک با یکسوساز و منبع ترکیبی..... ۱۹
شکل ۲-۹: پایدارسازی سیستم تحریک با بازخورد مشتقی ۲۱
شکل ۲-۱۰: بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت..... ۲۱
شکل ۲-۱۱: بلوک دیاگرام مبدل ولتاژ پایانه..... ۲۲
شکل ۲-۱۲: شمای تنظیمکننده خطی ولتاژ سری..... ۲۴
شکل ۲-۱۳: شمای تنظیمکننده خطی ولتاژ موازی..... ۲۵
شکل ۲-۱۴: شمای ساده شده تنظیمکننده کلیدزنی ۲۶
شکل ۲-۱۵: شکلموج مربوط به ولتاژ سه فاز ورودی یکسوکننده با در نظر گرفتن عملکرد غیر ایدهال کلیدها..... ۲۷
شکل ۲-۱۶: شکل موج خروجی یکسوکننده..... ۲۸
شکل ۲-۱۷: ولتاژ حالت مشترک درخروجی یکسوکننده..... ۲۸

شکل ۲-۱۸: نمایش یکسوساز متصل به سیمپیچی تحریک با سه منبع ولتاژ برای مدارهای متقارن در فرکانسهای پایین ۲۹
شکل ۲-۱۹: شمایی از تولید وانتقال ولتاژهای شفت به واسطه سیستمهای تحریک استاتیک ۳۰
شکل ۲-۲۰: مدار معادل شبکه پارازیتی ارائه شده در مرجع [۷] ۳۲
شکل ۲-۲۱: مدار معادل سیمپیچی سه فاز ارائه شده در مرجع [۸] ۳۲
شکل ۲-۲۲: مدل فرکانس بالای کابلها ارائه شده در مرجع [۱۱] ۳۳
شکل ۲-۲۳: مدل فرکانس بالای موتور ارائه شده در مرجع[۱۱] ۳۴
شکل ۲-۲۴: مدل مداری حالت مشترک ماشین القایی ارائه شده در مرجع [۱۲] ۳۴
شکل ۲-۲۵: مدل مداری حالت مشترک ارائه شده در مرجع[۱۳] ۳۵
شکل ۳-۱: شماتیک اتصال شاخههای امپدانس به صورت نردبانی ۳۹
شکل ۳-۲: نحوه قرارگیری سیمپیچی میدان روی روتور در مولد 200MVA-ANSALDO-TY 1054 ۴۱
شکل ۳-۳: شماتیک قرارگیری دو دور سیمپیچی مجاور ۴۱
شکل ۳-۴: سطح سیلندری سطح هادی و پوشش خارجی عایق ۴۲
شکل ۳-۵: ظرفیت خازنی استاتور نسبت به روتور ۴۵
شکل ۳-۶: مدل گسترده سیستم تحریک مولد نوع 200MVA-ANSALDO-TY 1054 ..... ۴۸
شکل ۳-۷: ولتاژ ورودی میدان در بازه دو ثانیه اول ۴۹
شکل ۳-۸: مقدار موثر ولتاژ میدان ۵۰
شکل ۳-۹: ولتاژ ورودی میدان در بازه ۲۰ ms ۵۰
شکل ۳-۱۰: جریان میدان ۵۱
شکل ۳-۱۱: شکلموج ولتاژ شفت اندازهگیری شده در سمت EE ۵۱
شکل ۳-۱۲: مقدار موثر ولتاژ شفت اندازهگیری شده در سمت EE ۵۲
شکل ۳-۱۳: مقدار موثر توان مصرفی در یاتاقانها ۵۲
شکل ۴-۱: شماتیک نحوه اتصال فیلتر پسیو به سیستم تحریک ۵۵
شکل ۴-۲: ولتاژ ورودی میدان در بازه دو ثانیه اول با اعمال فیلتر پسیو ۵۵
شکل ۴-۳: ولتاژ ورودی میدان در بازه ۲۰ ms با اعمال فیلتر پسیو ۵۶
شکل ۴-۴: جریان ورودی میدان با اعمال فیلتر پسیو ۵۶
شکل ۴-۵: شکل موج ولتاژ شفت اندازهگیری شده در سمت EE با اعمال فیلتر پسیو ۵۷
شکل ۴-۶: مقدار موثر ولتاژ شفت اندازهگیری شده در سمت EE با اعمال فیلتر پسیو ۵۷
شکل ۴-۷: مقدار موثر توان مصرفی یاتاقانهای سمت EE در زمان اعمال فیلتر پسیو ۵۸
شکل ۴-۸: مقدار موثر توان مصرفی یاتاقانهای سمت TE در زمان اعمال فیلتر پسیو ۵۸

شکل ۴-۹: مقدار موثر کل توان مصرفی یاتاقانها در زمان اعمال فیلتر پسیو ۵۹
شکل ۴-۱۰: شمای کلی تنظیمکننده باک ۶۰
شکل ۴-۱۱: شماتیک مدار باک در زمان روشن بودن کلید ۶۰
شکل ۴-۱۳: شماتیک مدار باک در زمان خاموش بودن کلید ۶۱
شکل ۴-۱۴: جریان سلف در حالت هدایت پیوسته ۶۱
شکل ۴-۱۵: جریان عبوری از دیود در حالت هدایت پیوسته ۶۱
شکل ۴-۱۷: شکل موج ولتاژ ورودی میدان در بازه دو ثانیه اول با اعمال مبدل باک ۶۴
شکل ۴-۱۸: شکل موج مربوط به ولتاژ ورودی در بازه ۲۰ ms در حالت اتصال مبدل باک به مدل استخراج شده از سیستم ۶۴
شکل ۴-۱۹: شکل موج ولتاژ شفت اندازه گیری شده در سمت EE در حالت اتصال مبدل باک به مدل استخراج شده از سیستم ۶۵
شکل ۴-۲۰: مقدار موثر ولتاژ شفت اندازه گیری شده در سمت EE در حالت اتصال مبدل باک به مدل استخراج شده از سیستم ۶۵

فصل ۱– مقدمه

سیستم‌های قدرت در اندازه و اجزای تشکیل‌دهنده نسبت به یکدیگر متفاوت هستند. با وجود تفاوت-هایی که بین این سیستم‌ها وجود دارد همگی آن‌ها دارای مشخصه‌های اصلی مشابه هم هستند. از جمله این مشخصه‌های مشترک می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- سیستم‌های تولید و تجهیزات انتقال بر پایه استفاده از ولتاژ AC سه فاز هستند. بارهای صنعتی همگی با ولتاژ سه فاز تغذیه می‌شوند. بارهای خانگی که به صورت تکفاز هستند هم به صورت متعادل بین سیستم سه فاز توزیع می‌شوند.

۲- در تمامی سیستم‌های قدرت از ماشین‌های سنکرون برای تولید الکتریسیته استفاده می‌گردد. محرک اصلی، منابع اولیه‌ای مثل انرژی فسیلی، هسته‌ای و یا هیدرولیکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند و بعد از آن مولدها انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند.

۳- انتقال توان از طریق مسافت‌های مشخصی به مصرف‌کننده‌هایی که در یک منطقه وسیع پراکنده شده‌اند صورت می‌پذیرد. لازمه این کار وجود سیستم‌های جنبی که در سطوح متفاوت ولتاژی کار کنند می‌باشد.

توان الکتریکی در نیروگاه‌ها تولید می‌گردد و از طریق شبکه پیچیده‌ای متشکل از اجزای مختلفی نظیر خطوط انتقال، ترانسفورمرها و تجهیزات کلیدزنی به مصرف‌کننده انتقال داده می‌شود. اجزای اصلی تولید برق در نیروگاه‌ها، مولد و توربین می‌باشند. محور اصلی ارتباط دهنده بین توربین و مولد، شفت می‌باشد. در حقیقت محرکه مکانیکی که در توربین به وجود آمده است از طریق شفت به روتور مولد منتقل می‌شود و در آن‌جا به واسطه وجود میدان‌های الکترومغناطیسی تبدیل به انرژی الکتریکی می-گردد. با توجه به نقش مولدها در تولید انرژی الکتریکی، در این‌جا مختصری در رابطه با ماشین‌های سنکرون توضیح داده می‌شود.

یک ماشین سنکرون دارای دو قسمت اصلی می‌باشد که عبارتند از میدان و آرمیچر. میدان روی روتور قرار دارد و آرمیچر روی استاتور واقع شده است. سیم‌پیچی میدان از طریق جریان مستقیم تحریک

می‌شود. هنگامی که روتور توسط محرک گردانده می‌شود میدان مغناطیسی دوار در سیم‌پیچی میدان باعث القای ولتاژ متناوب در سیم‌پیچی سه فاز آرمیچر می‌شود. فرکانس ولتاژهای متناوب القایی و جریان‌های منتجه آن که در زمان بارداری مولد در سیم‌پیچی استاتور جریان می‌یابند وابسته به سرعت روتور می‌باشد. فرکانس کمیت‌های الکتریکی استاتور به صورت سنکرون با سرعت مکانیکی روتور می‌باشد.

هنگامی که ماشین‌های سنکرون به یکدیگر متصل می‌شوند ولتاژ و جریان تمام ماشین‌ها بایستی دارای فرکانس مشابهی باشند و سرعت مکانیکی روتور هر ماشین با فرکانس مورد نظر سنکرون شده باشد. نحوه قرارگیری فیزیکی سیم‌پیچی آرمیچر استاتور به نحوی است که جریان‌های متناوب عبوری از سیم‌پیچی‌های سه فاز باعث تولید میدان مغاطیسی دواری می‌گردد که در عملکرد حالت ماندگار با سرعت روتور گردش می‌کند [۱].

با توجه به نقشی که مولدها در تولید انرژی الکتریکی دارند، تعمیر و نگهداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از اثراتی که به واسطه غیر ایده‌ال بودن المان‌ها و طبیعت چرخشی روتور مولدها به وجود می‌آید پدیده ولتاژهای شفت است. بازه تغییر مقادیر مربوط به این ولتاژ از میکرو ولت تا صدها ولت می‌باشد. مقادیر کوچک ولتاژهای شفت مربوط به چرخش شفت در میدان مغناطیسی زمین و یا القای سیگنال‌های الکترومغناطیسی و مقادیر بزرگ آن ناشی از شار مغناطیسی پسماند روتور و یا کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. ولتاژهای شفت و جریان‌های عبوری از یاتاقان‌ها از جمله پارامترهای غیرقابل صرفنظر در ماشین‌های دوار می‌باشند. این پدیده به این صورت است که با القای ولتاژی روی شفت مولد و به تبع آن روی یاتاقان‌ها، جریانی از یاتاقان‌ها به زمین ایجاد می‌گردد و عبور این جریان از یاتاقان‌ها به مرور زمان منجر به یونیزه شدن روغن یاتاقان‌ها می‌گردد. یونیزه شدن روغن یاتاقان‌ها منجر به ایجاد حباب در آن می‌شود. در صورتی که این پدیده تشخیص داده نشود و در جهت مقابله با آن راهکاری انتخاب نگردد می‌تواند به مرور زمان منجر به از کار افتادن کامل یاتاقان‌ها و در نتیجه آن از کار افتادن کامل مولد بشود که همین امر می‌تواند خسارت‌های زیادی را به وجود بیاورد [۲] و [۳]. با توجه به مطالبی که گفته شد به منظور تشخیص هر چه بهتر ولتاژهای شفت بایستی در وهله اول با منابعی که

تولیدکننده این ولتاژ هستند آشنا شد. آشنایی با منابع تولید ولتاژ شفت و چگونگی تاثیر آن‌ها در ایجاد ولتاژهای شفت می‌تواند کمک بسزایی در جلوگیری از وقوع این پدیده داشته باشد. سعی شده است که در این قسمت منابع تولید ولتاژهای شفت و جریان یاتاقان‌ها و نحوه ایجاد ولتاژهای شفت به واسطه وجود این منابع به تفصیل مورد بررسی قرار گیرند.

۱-۱- ولتاژ شفت

چهار منبع تولید ولتاژهای شفت در ماشین‌های دوار وجود دارند. گاهی اوقات این منابع تولید ولتاژ شفت در کنار یکدیگر و با هم این ولتاژ را تولید می‌کنند. لذا بررسی هر یک از این منابع به‌صورت مجزا به منظور تشخیص بهتر و سریعتر آن حائز اهمیت می‌باشد. این چهار منبع تولید ولتاژهای شفت و جریان یاتاقان‌ها عبارتند از:

۱. منابع الکترومغناطیسی

۲. منابع الکترواستاتیکی

۳. منابع ولتاژ خارجی که به سیم‌پیچی روتور اعمال می‌گردند.

۴. عدم تقارن‌های مغناطیسی محتمل در سیم‌پیچی الکتریکی

۱-۱-۱- منابع الکترومغناطیسی

با چرخش منبع مغناطیسی پسماند در یک محفظه مغناطیسی یا برعکس، که در عمل مانند عملکرد مولد می‌باشد، ولتاژهای شفت القایی تولید می‌گردند. تفاوت در این نکته است که ماشین‌های الکتریکی به منظور حمل جریان‌های القایی دارای سیم‌پیچی‌های آرمیچر می‌باشند در صورتی که نقش سیم‌پیچی ثانویه در ماشین‌های مکانیکی را یاتاقان‌ها، شفت و نشت‌گیر روغن یاتاقان‌ها ایفا می‌کنند. به منظور تولید ولتاژهای شفت و برقراری جریان یاتاقان‌ها عوامل زیر بایستی در کنار هم وجود داشته باشند:

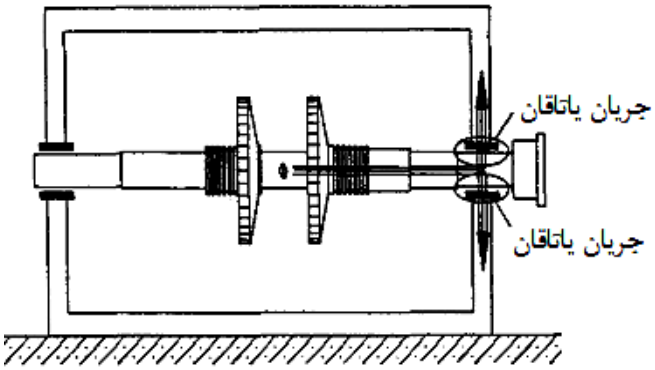
- ✓وجود یک منبع مغناطیسی با پسماند بالا مثل روتور، یاتاقان‌ها و یا پوشش محفظه
- ✓سرعت سطحی بالا مانند نمونه‌هایی که در ماشین‌های حرارتی وجود دارد.

✓وجود مدار بسته مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی پایین

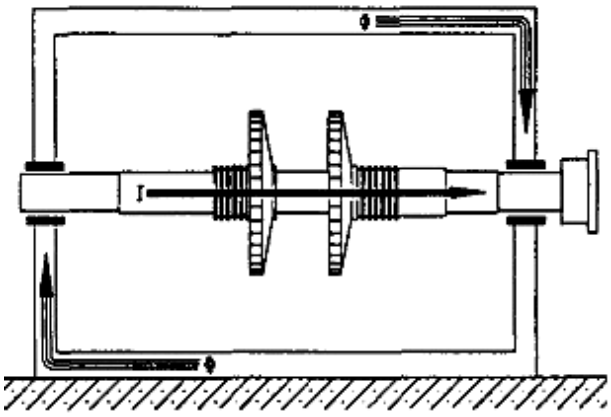
هنگامی که این عوامل در کنار یکدیگر قرار بگیرند منجر به تولید ولتاژ شفت می‌گردند. این ولتاژ باعث تولید جریان یاتاقان و به دنبال آن ایجاد صدمه در حلقه‌هایی با مقاومت پایین می‌گردد. شکل‌های (۱-۱) و (۱-۲) نشان‌دهنده عوامل تولید ولتاژ شفت ناشی از منبع مغناطیسی پسماند هستند [۴]. این دو عامل عبارتند از:

۱- شار محوری شفت

۲- جریان محوری شفت



شکل ۱-۱: تولید جریان شفت از منبع مغناطیسی پسماند- عامل به وجود آورنده: شار محوری شفت



شکل ۱-۲: تولید جریان شفت از منبع مغناطیسی پسماند- عامل به وجود آورنده: جریان محوری شفت

تعیین دقیق این موضوع که ولتاژ شفت القایی به واسطه شار محوری شفت و یا جریان محوری شفت به وجود آمده از اهمیت زیادی برخوردار است چون نحوه مقابله با هر یک از این عوامل نسبت به دیگری متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال جداکننده غیرمغناطیسی[1] فلزی به منظور جلوگیری از به وجود آمدن ولتاژ شفت از طریق شار محوری شفت بکار گرفته می‌شود. این جداکننده هادی است و به راحتی جریان محوری شفت را هدایت خواهد نمود. در صورتی که تشخیص داده شود جریان‌های شفت از منبع مغناطیسی پسماند به وجود آمده باشند بایستی منبع مغناطیسی پسماند به طور کامل مغناطیس‌زدایی شود. سیستم‌هایی به منظور مغناطیس‌زدایی کردن اجزای ماشین‌های الکتریکی وجود دارند که به صورت خودکار این کار را انجام می‌دهند. هنگامی‌که اجزا ماشین نصب می‌شوند بسته به حداکثر مقدار مجازی که برای سطح میدان مغناطیسی پسماند برای قسمت‌های مختلف در نظر گرفته شده است و در جدول (۱-۱) هم آورده شده است بایستی مغناطیس‌زدایی شوند [۴].

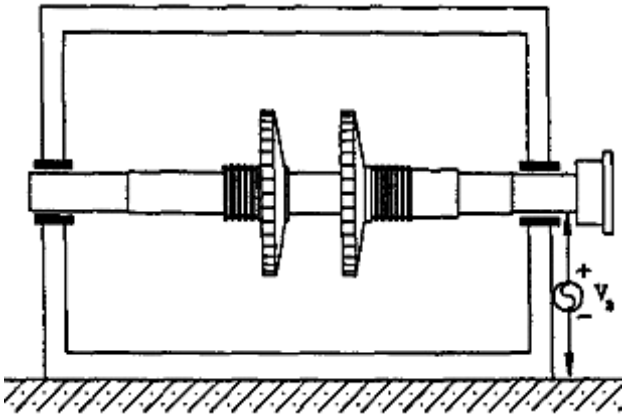
جدول ۱-۱: حداکثر مقدار مجاز سطح میدان مغناطیسی پسماند (گاوس)

اجزای مولد	حداکثر مقدار مجاز سطح میدان مغناطیسی پسماند (گاوس)
اجزا یاتاقان از قبیل ضامن[2]، یاتاقان‌گرد[3]، نشت‌گیر روغن یاتاقان، دنده‌ها	2G
بدنه(محفظه) یاتاقان[4]	4G
شفت میانی[5] و دیافراگم‌ها	6G
پوشش مولد	10G

[1] Nonmagnetic isolator
[2] Retainer
[3] Journal
[4] Bearing housing
[5] Midshaft

۱-۱-۲- منابع الکترواستاتیکی

ولتاژهای شفت ناشی از این منبع اغلب با جداسازی بار در مراحل آخر توربین بخار یعنی جایی که بخار دیگر حالت فوق گرم را ندارد تولید می‌شوند. برخورد بخار مرطوب با پره‌های توربین منجر به این می‌شود که مقداری بار روی این پره‌ها قرار بگیرد و این پره‌ها باردار و دارای ولتاژ بشوند. وجود منابع الکترواستاتیکی تولید ولتاژهای شفت روی کمپرسورهای گاز مرطوب در کنار توربین‌های بخار، موضوعی غیر عادی نیست. شکل (۱-۳) نشان‌دهنده شماتیک تولید ولتاژ شفت از یک منبع الکترواستاتیکی را نشان می‌دهد. این منبع تولید ولتاژ شفت تقریباً ضعیف است و قادر به تولید جریان‌های قابل توجهی نمی‌باشد [۴].



شکل ۱-۳: تولید ولتاژ شفت از منبع الکترواستاتیکی

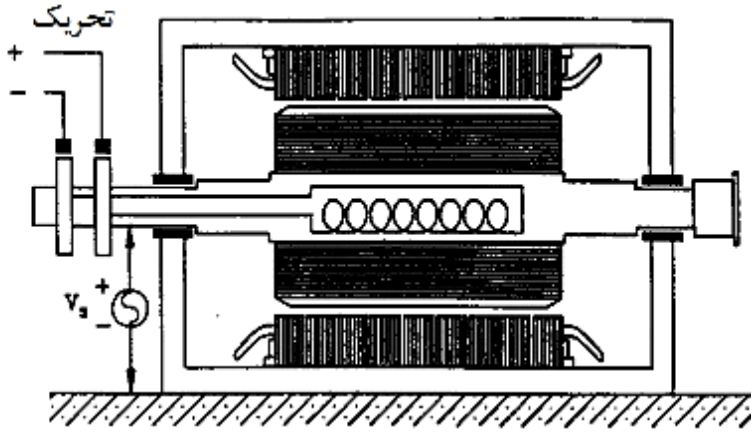
برای حل این مشکل بایستی شفت از طریق جاروبک به زمین متصل گردد. جاروبک‌های مویی[1] نسبت به انواع مسی یا کربنی آن دارای عملکرد بهتری می‌باشند. تقریباً توسط تمامی تولیدکنندگان ماشین‌های الکتریکی جاروبک‌های کموتاسیون در سیستم تحریک ماشین‌ها اغلب از جنس کربن ساخته می‌شوند. این نوع جاروبک‌ها جریان ثابت و مشخصی را منتقل می‌کنند و به همین علت لایه‌ای از جنس هادی بین جاروبک و حلقه‌های لغزان به وجود می‌آید. هنگامی‌که مشکلی برای جاروبک‌ها به وجود می‌آید راه‌حل آن برداشتن جاروبک‌هاست. این کار باعث می‌شود که از سایر جاروبک‌ها مقدار جریان بیشتری

[1] Bristle type brushes

عبور کند. به علت کم بودن مقدار جریان‌های الکترواستاتیکی، جاروبک‌های کربنی لایه‌ای غیرهادی را ایجاد می‌کنند و بدین صورت غیر قابل استفاده می‌شوند.

۱-۱-۳- منابع ولتاژ خارجی که به سیم‌پیچی روتور اعمال می‌شوند.

این منبع تولید ولتاژ شفت و جریان یاتاقان مربوط به سیستم تحریک ماشین‌های الکتریکی است. در اکثر کاربردهای توان بالا DC، استفاده از یکسوکننده‌های کنترل‌شونده با فاز به دلیل سادگی و هزینه پایینی که دارند نسبت به سایر مبدلها برتری دارند. ولتاژ خروجی یکسوکننده‌ها علاوه بر مقدار DC مورد نظر حاوی هارمونیک‌هایی نیز می‌باشد. گاهی اوقات پالس‌های یکسوساز در ولتاژ شفت مشاهده می‌شوند. از جمله راهکارهای مقابله با این منبع تولید ولتاژ شفت می‌توان به زمین کردن شفت، اعمال فیلترهای متقارن در سمت DC یکسوساز و اجتناب از به وجود آمدن عدم تقارن در مدار تحریک اشاره کرد. از فیلترهای اکتیو سری و موازی در سمت DC یکسوساز هم برای رفع این مشکل استفاده می‌شوند. شکل (۱-۴) نشان‌دهنده این منبع تولید ولتاژ شفت می‌باشد [۴].

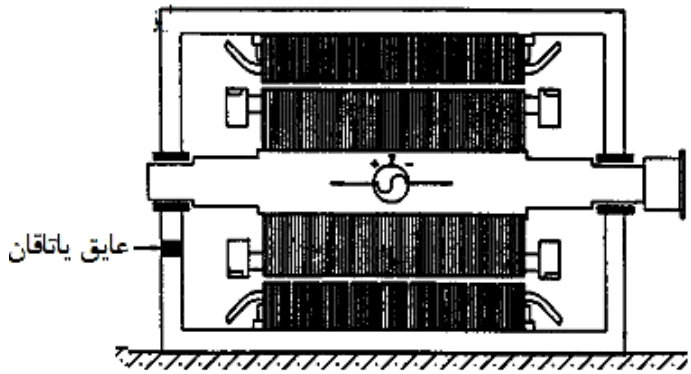


شکل ۱-۴: تولید ولتاژ شفت به علت اعمال منبع ولتاژ خارجی به سیم‌پیچی روتور

۱-۱-۴- عدم تقارن‌های مغناطیسی محتمل در سیم‌پیچی الکتریکی

اتصالات در لایه‌های استاتور و نیروی گریز از مرکز روتور از جمله عواملی هستند که باعث به وجود آمدن شار متغیر مغناطیسی می‌شوند. نحوه القا ولتاژ توسط این منبع بدین شکل است که با پیوند یافتن

حلقه‌ی شار مغناطیسی با شفت روتور، قاب مولد و یاتاقان، ولتاژ شفت تولید می‌گردد. این ولتاژ القایی سبب ایجاد جریان‌های زیاد و به تبع آن وارد شدن آسیب‌هایی جدی به حلقه‌هایی با مقاومت پایین می-شود. دو حالت وجود دارند که منجر به ایجاد ولتاژ از این منبع می‌شوند. در حالت اول ولتاژی بین دو انتهای شفت ایجاد می‌گردد و در حالت دوم شاری بین دو انتهای شفت به وجود می‌آید. حالت اول نسبت به حالت دوم بیشتر مشاهده می‌شود و ناشی از عدم تقارن‌های موجود در ماشین‌های الکتریکی به علت تلورانس‌های به وجود آمده در زمان تولید می‌باشد. لذا ولتاژ شفتی ناشی از این منبع و با درجات مختلف روی اکثر ماشین‌های الکتریکی وجود دارد. این ولتاژ ناشی از شار مغناطیسی کوچکی است که از شفت عبور می‌کند و بین دو انتهای آن ولتاژی به وجود می‌آورد. از آنجایی که منبع دارای امپدانس کوچکی است جریان زیادی از یاتاقان‌ها، قاب ماشین و پایه عبور می‌کند و نهایتاً با بازگشت به انتهای دیگر شفت مسیر خود را تکمیل می‌کند. راه‌حل مقابله با جریان یاتاقان‌ها، عایق کردن قسمت بیرونی یاتاقان است به نحوی که جریان چرخشی متوقف شود. این راه‌حل باعث حذف ولتاژ شفت نمی‌شود ولی تا هنگامی‌که مسیر برگشت با عایق مسدود شده باشد کل زنجیره نسبت به این منبع تولید ولتاژ محافظت می‌شود.



شکل ۱-۵: ولتاژ شفت تولید شده در ماشین‌های الکتریکی به واسطه عدم تقارن‌های مغناطیسی موجود در سیم‌پیچی الکتریکی – ایجاد ولتاژ بین دو انتهای شفت مولد

در حالت دوم شاری به صورت محوری در طول شفت، یاتاقان و پوسته ایجاد می‌گردد و نهایتاً مسیر این شار تولید شده، همان‌طوری که در شکل (۱-۶) هم نشان داده شده است، از طریق یاتاقان دیگر بسته می‌شود. شار محوری که در این قسمت به وجود می‌آید به علت آمپر دورهایی که با شفت مولد پیوند پیدا می‌کنند و یا فاصله هوایی غیریکنواخت تولید می‌گردد. به منظور جلوگیری از به وجود آمدن ولتاژهای