

تأثیر مدل‌های PWM بر روی جریان‌های سکوی اتصال موتور AC و ولتاژهای

محور

چکیده

این مقاله مسائل ولتاژ محور موتور القائی AC، جریان جاری از طریق سکوی اتصال موتور و مسائل جریان تخلیه الکتریکی دورن سکوه‌های اتصال هنگام عملکرد تحت موج سینوسی خالص و منابع مبدل پهنای پالس تغییر یافته (PWM) را مورد تحقیق و بررسی قرار می‌دهد. تجارب اخیر نشان می‌دهد که منابع ولتاژ PWM با شیب امواج جلویی، به‌ویژه افزایش بزرگی مسائل الکتریکی فوق، منجر به فرسایش مواد سکوی اتصال موتور و شکست مکانیکی اولیه، می‌شود. نوشته‌های قبلی اشاره به این دارند که مسائل ولتاژ محور- جریان سکوی اتصال تحت عملیات موج سینوسی 60Hz، غالباً از لحاظ الکترومغناطیسی القاء شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد PWM این مسائل یکسان، اکنون غالباً یک پدیده الکترواستاتیکی هستند. یک مدل سیستمی برای شرح این پدیده مشخص و بسط داده شده است. ساخت و آزمایش موتور القایی حفاظت شده الکترواستاتیکی (ESIM)، این مدل را تغییر می‌دهد و همچنین راه‌حل ممکن برای مسئله جریان سکوی اتصال تحت عملکرد PWM است.

۱. مقدمه

جریانات سکوی اتصال و ولتاژهای محور تحت عملکرد موج سینوسی 60Hz از سال ۱۹۲۴ مسئله شناخته شده‌ای بوده است [۱-۳]. مشخصات مقاومت ظاهری این سکوی اتصال عمدتاً نتیجه جریان سکوی اتصال را تعیین می‌کند که جریانی برای بزرگی ولتاژ محور ارائه شده و شکل موج حاضر خواهد بود. تعدادی از بررسی‌ها نشان داده‌اند که ۳۰٪ از تمام شکست‌های موتور عمل کرده با ولتاژ موج سینوسی 60Hz به دلیل نقصان جریان سکوی اتصال هستند [۴]. تمام ماشین‌های چرخشی به طور بالقوه مسئله جریان سکوی اتصال را دارند که آیا DC است یا AC، و آیا HP دارای اندازه بزرگ یا کوچک است. این ماشین‌های چرخشی دارای سه منبع اصلی ولتاژ هستند - القاء الکترومغناطیسی، الکترواستاتیک جفت شده از منابع داخلی یا الکترواستاتیک جفت شده از منابع خارجی.

القاء الکترومغناطیسی از سیم‌پیچی استاتور (قسمت ثابت ماشین) برای محور روتور (قسمت گردنده ماشین) توسط Alger [۱] شناخته شده و در ماشین‌های محور طولانی بیشتر رایج است. ولتاژ محور ناشی از عدم تقارن‌های میدان مغناطیسی در شکاف هوایی است که مربوط به طراحی ماشین عملی هستند. اغلب موتورهای القایی طوری طراحی شده‌اند که حداکثر ولتاژ محور برای زمینه چارچوب کمتر از 1V_{rms} با محدودیت‌های عملی توصیه شده، باشند [۵]. ولتاژهای محور القاء شده موجب گردش جریان سکوی اتصال در مسیر دایره ای از محور، بوسیله طرف A سکوی اتصال واقع شده در زمین، بوسیله چارچوب استاتور، بوسیله طرف B سکوی پرتاب واقع شده در زمین و پشت محور، می‌شود. این ولتاژ محور القاء شده اگرچه بزرگی کمی دارد، چون مقاومت

ظاهری مسیر چرخشی کم است، بوسیله دو سکوی اتصال موتور موجب جریان سیار بالایی می شود. موتورهای القایی امروزی کمتر از ۲۵۰HP دارای سکوهایی اتصال واقع شده بر روی زمین هستند اما ولتاژ محور وضعیت ثابت حداقل شده‌ای برای مقادیر خیلی کوچک را دارد. با این حال، در طول شرایط توقف و آغاز گذرا در سرتاسر خط AC، عدم تقارن مغناطیسی به صورت ولتاژ محور افزایش یافته ظاهر می شود، موجب گردش جریان سکوی اتصال و کاهش عمر می شود [۴]. این گردش جریان سکوی اتصال گذار برای خط موتورهای آغاز شده شدیداً تغییر یافته است. راه حل الکترومغناطیسی سستی برای ولتاژ محور القاء شده در قاب‌های بزرگ برای جدا کردن انتهای سکوی اتصال غیرمحرک است. این ولتاژ محور را کاهش نمی دهد بلکه بیشتر موجب جریان سکوی اتصال می شود.

ولتاژ محور القاء شده الکترواستاتیکی ممکن است در هر موقعیتی که انباشتگی بار روتور بتواند رخ دهد، موجود باشد. اتصال‌های گردنده کمربند، هوای یونیزه شده گذرنده بر روی تیغه‌های فن روتور یا سرعت بالای هوای گذرنده بر روی تیغه‌های فن روتور مانند توربین بخار، مثال‌هایی از این دست هستند [۶]. راه حل الکترواستاتیکی برای حفظ فریم و محور در همان پتانسیل بوسیله نصب برس زمینه محور برای کاهش تقویت الکترواستاتیکی و کاهش ولتاژ به $400-700$ mV، است. این مقدار برای اینکه موجب خسارت جریان سکوی اتصال جهت گردش شود، کافی نیست.

ولتاژ محور جفت شده الکترواستاتیکی از منابع روتور خارجی، همچون یک محرک ثابت در ژنراتور توربینی، ممکن است و از لحاظ تاریخی با کاربرد برس زمینه محور، حل شده است [۶].

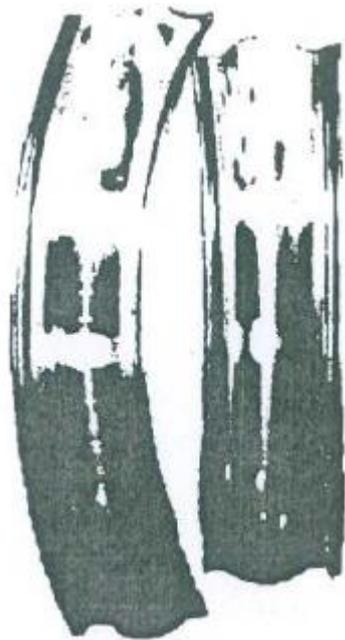
ولتاژ محور جفت شده الکترواستاتیکی از منابع استاتور خارجی، همچون مبدل PWM، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

A. تئوری موجود در خصوص جریان سکوی اتصال با خط AC

بزرگی ولتاژ محور معمولاً با استفاده از یک شاخص احتمال جریان سکوی اتصال که نتایج است، اندازه گیری شده است. این بزرگی و گذر جریان الکتریکی بوسیله سکوی اتصال است در نهایت موجب آسیب مکانیکی می شود [۷]. آسیب سکوی اتصال ناشی از جریان الکتریکی، بوسیله حضور چال ها یا سوختگی شیارهای متقاطع درون دوران سکوی اتصال، مشخص شده است. سوراخ الکتریکی تا زمانی که سکوی اتصال ضریب اصطکاک خود را از دست دهد، افزایش بیشتر تلفات و تجزیه سطح سکوی اتصال، ادامه دارد. شیار نوعی موجب دنده ای مانند شکل که در دوران ظاهر می شود مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است. اشاره شده است که چگالی جریان محدوده تماس سکوی اتصال گوی با مسیر، فاکتور شناسایی بهتری برای امپرها پیک مجاز بدون چاله کنی یا شیار، است. اما، آنالیز این محدوده تماس مشکل است چون با سرعت و بار سکوی تماس، نوسان، روش نصب، چسبندگی و دمای روان کننده، تغییر می کند. مشهود است که افزایش این محدوده تماس متناسب با بار سکوی تماس افزایش یافته تقریباً تا قدرت ۱/۲، است [۸].

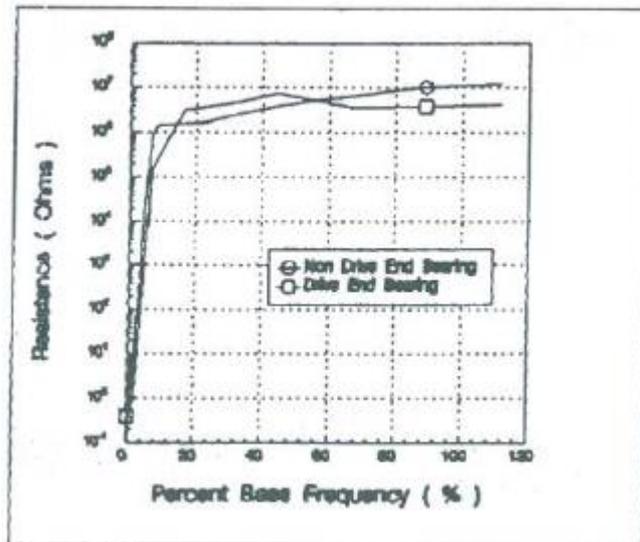
بدین سان، این موضوع برای مشخص کردن مقاومت ظاهری سکوی اتصال تحت شرایط بار مختلف جهت تعیین شدت (سختی) مسئله، مهم است. تماس سطحی به سه طریق ایجاد شده است:

فلز با فلز، تماس های سطحی شبه فلزی و تماس نقطه فلزی بوسیله سطوح عایق بندی شده الکتریکی مابین زبری سطح گوی و قاب.



شکل ۱. آرایش راهراه سکویهای اتصال موتور گرداننده ACC

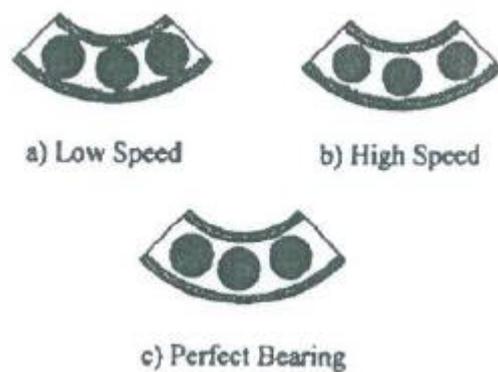
محدوده ناحیه تماس سکوی اتصال واقعی در حرکت کند یا در سکوی اتصال غیرچرخشی، بزرگ است و شامل بیشتر سطوح شبه فلزی است. نوار(غشاء) روان سازنده تنها ۵۰ انگستروم است ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) در صورتی که سطوح شبه فلزی دارای اکسیدهای فلزی $100-120 \text{ \AA}$ هستند. تأثیرات تونل زنی مکانیکی کوانتوم، جریان را قادر به گذر از منطقه تماس با مقاومت ماقبل (مقاومت ورودی مقاومت سری) کمتر از ۰/۵ اهم، می سازد. این موضوع بوسیله اندازه گیری مقاومت سکوی اتصال کند ساخته شده در سرعت های پایین در شکل ۲، مشهود است. [۷] اظهار می دارد که جریان بزرگ ممکن است از سکویهای اتصال غیرچرخشی، بدون آسیب گذر کند.



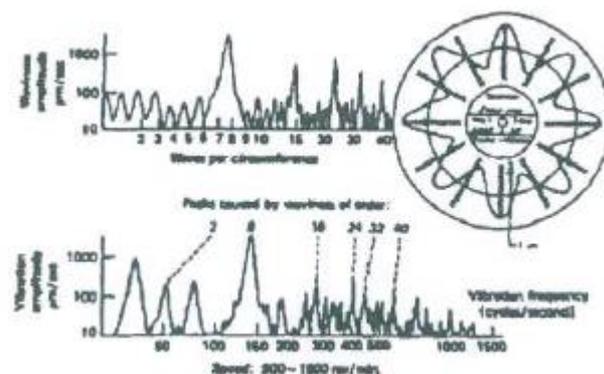
شکل ۲. مقاومت سکوی اتصال در مقابل سرعت

محدوده ناحیه تماس سکوی اتصال واقعی در سکوی اتصال چرخشی، کوچکتر و وابسته به زبری سطح سکوی تماس است. این محدوده تماس عمدتاً شامل سختی تماس شبه نقطه فلز گوی (توپ) با فلز قاب است، مانند آنچه در شکل ۳a برای عملکرد سرعت پایین نشان داده شده است. طول سختی تماس به طور نمونه در سرعت پایین ۱۰۰us و در سرعت بالا ۳۳us است. مقاومت ظاهری سکوی اتصال افزایش یافته با چرخش که در شکل ۲ نشان داده شده است، اشاره به این دارد که روان سازنده معرف یک غشاء عایق جزئی مابین گوی و قاب در سرعت‌های بیشتر از ۱۰٪ مجاز، است. زبری سطحی نوعی قابل و گوی از شکل ۴، مشاهده می‌شود که در محدوده ۱-۱۰ میکرون باشد، درحالی که غشاء روان سازنده نوعی ۲-۱/۰ میکرون وابسته به سرعت، مشخصات روان سازنده و اندازه کمتر بار، است [۷]. شکل ۵ رابطه مابین غشاء روغنی و زبری سطح در یک سکوی اتصال، نشان می‌دهد [۸]. درصد غشاء، زمان درصدی در هنگامی است که سطوح «تماس»

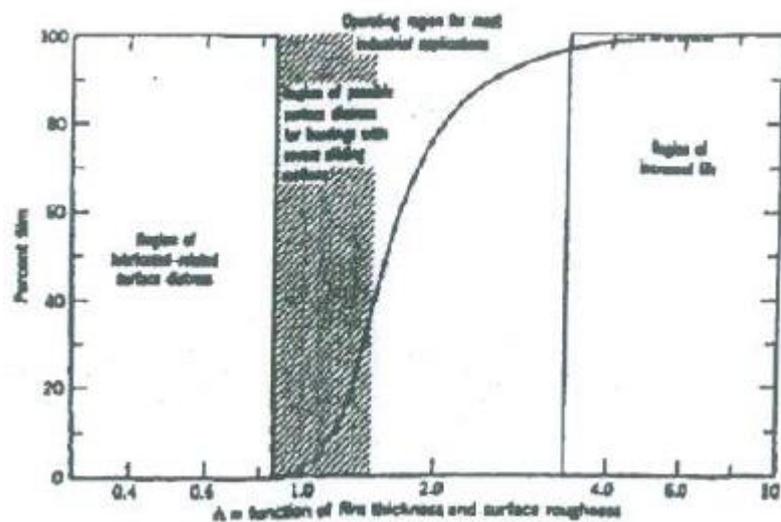
به طور کامل بوسیله روغن یا غشاء روان‌سازنده تفکیک شده‌اند، در صورتی که گاما، رابطه ضخامت غشاء روان‌سازنده برای مقدار rms زبری سطح تماس است. اغلب کاربردهای سکوی اتصال در محدوده گاما برابر با ۱ تا ۲، کار می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که سکوهای اتصال با کیفیت بالا مانند مقاومت ظاهری بالای ۸۰٪ زمان با غشاء روغنی، مانند یک خازن عمل می‌کند که آماده شارژ برای پتانسیل تفکیک است. سکوی اتصال دارای کیفیت پایین، مقاومت ظاهری پایین فلزی برای سطح تماس در اغلب اوقات خواهد داشت و در حضور روان‌سازنده دارای مقاومت بالا به عنوان قابی برای اتصال خازن عمل می‌کند که ممکن است تنها به صورت تصادفی نه در طول تماس پیک به نقاط گودی، شارژ شود.



شکل ۳. احتمالات تماس سخت [۸].



شکل ۴. طیف‌های حالت موجی و نوسانی از حلقه داخلی با تکیه بر حالت موجی [۸].



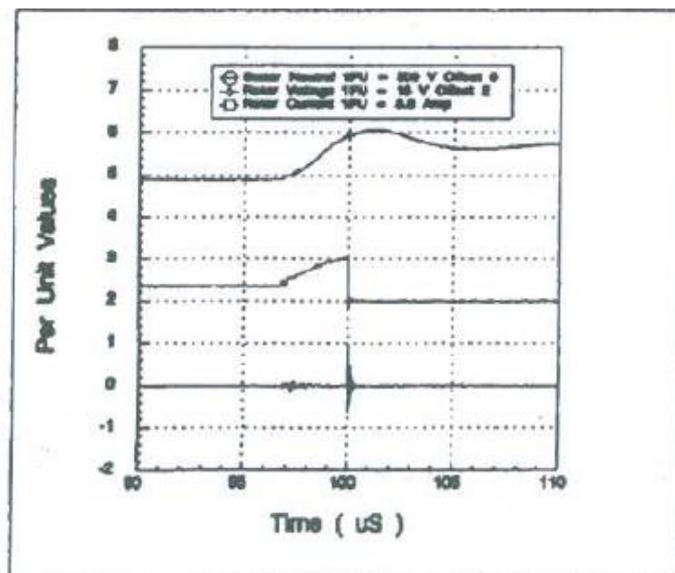
شکل ۵. نوار موجود در مقابل اشعه گاما برای یک سکوی اتصال [۸].

بزرگی ولتاژ محور، تعیین می‌کند که جریان سکوی اتصال موجود در سکوه‌های اتصال با کیفیت پایین اغلب اوقات دارای تماس‌های سختی است یا سکوه‌های اتصال با کیفیت بالا از روان‌سازندهایی با مقاومت ظاهری پایین استفاده می‌کنند. ولتاژ محور بالا، پس از اینکه جریان سکوی اتصال از طریق نقاط زیادی به گردش درمی‌آید، موجب افزایش جریان و چاله‌ها یا حفره‌هایی در قالب می‌شود. در تماس نقطه‌ای برای درجه‌ای که این فلز ایجاد کننده حفره‌ها جذب می‌شود، و به موجب آن تجزیه ذرات فلز پوشیده شده به روان‌سازنده، ممکن است گرمایش رخ دهد. ولتاژ محور پایین، دامنه جریان کمتری دارد اما یافت شده که هنوز به دلیل تجزیه گریس موجب فرسایش چاله می‌شود.

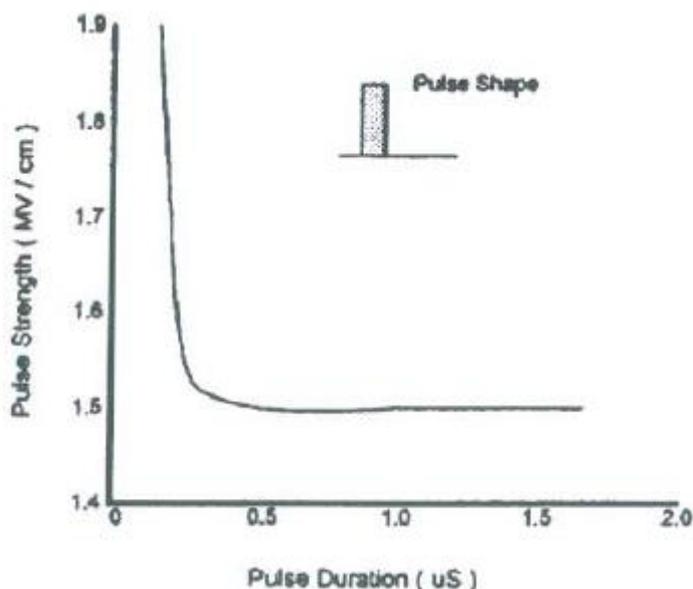
در سکوه‌های اتصال کیفیت بالا با گریس دارای مقاومت ظاهری بالا، اتصال خازن سکوی اتصال ممکن است در مدار مقاومت ظاهری پایین، هنگامی که میدان الکتریکی از قدرت تجزیه در نقاط سختی روان‌سازنده تجاوز می‌کند، تخلیه شود. آستانه ولتاژ تجزیه سکوی اتصال، $0/4$ ولت

است، چون قدرت میدان روغن معدنی (نفت)، 10^6 V/m است. در مواقعی ولتاژ خازن سکوی اتصال بوسیله اهداء ولتاژ محور شارژ شده، بیشتر از مقدار لازم (بیش از $0/4$ ولت) برای تجزیه گریس می شود ضربه جریان کمی بلند (نانوثانیه) از خازن غشاء روغنی بارشده درون سکوی اتصال جریان می یابد، مانند آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است. این پالس جریان تخلیه، اگر رخ دهد، منبعی عمده برای فرسایش سکوی اتصال است و معمولاً به صورت شیاری یا دستگاه تخلیه الکتریکی (EDM) به ما ارائه می شود. دهانه های دنده ای شکل ۱ از چاله های میکروسکوپی شکل گرفته اند که تحت گرمایش مکرر قاب تا دمای ذوب، نرم می شوند.

چندین نویسنده اظهار می دارند که ولتاژ محور کمتر از $0/3$ ولت، ایمن است، در صورتی که ولتاژ $0/5-1$ ولت ممکن است سکوی اتصال را تخریب کند. ولتاژ مرکز تجزیه سکوی اتصال چرخشی (هنگامی که جریان سکوی اتصال شروع به گردش می کند)، تحت ولتاژ منبع DC در اوج 700 mV بود.



شکل ۶. مشخصات شارژ خازنی EDM

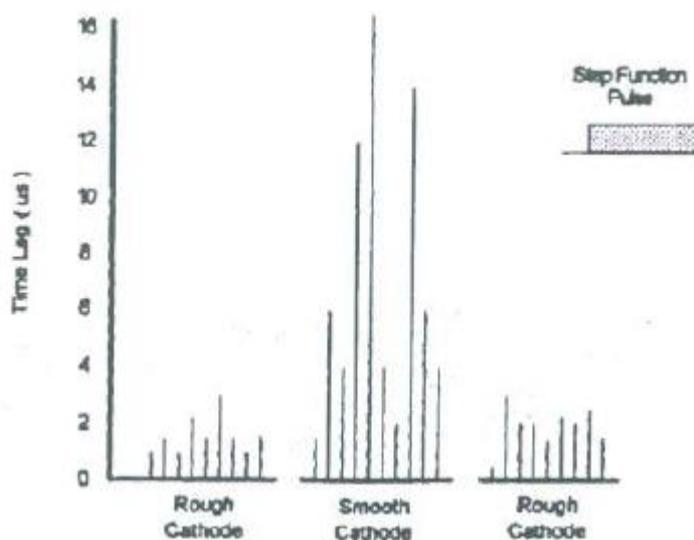


شکل ۷. استحکام دی الکتریکی افزایش یافته با منابع انگیزشی [۹].

B. تئوری پیشنهاد شده در خصوص جریان سکوی اتصال با مبدل های PWM

این آنالیز سکوی اتصال بر اساس وضعیت ثابت، فرکانس پایین و منابع ولتاژ محور dv/dt پایین بوده است. ما، نوسان مبدل PWM موجب شکل امواج منبع ولتاژ با فرکانس بالا می شود و dv/dt بالا در سرتاسر استاتور ختی برای قاب زمینه مؤثر است. این نشان مدهد که بخشی از این شکل موج به دلیل عمل تقسیم کننده خازن، همچنین به صورت ولتاژ محور روتور برای زمین است. آنالیز موج سینوسی قبلی برای عملکرد PWM اعمال می شود اما با این تغییر که ولتاژ مرز تفکیک ثابت تجربی در محور روتور به ۸-۱۵ ولت (شکل ۶) در مقابل 700mv برای همان سکوی اتصال نشان داده شده تحت عملکرد موج سینوسی 60Hz (شکل ۱۰). این افزایش با استفاده از نظریه تفکیک دی الکتریکی برای منابع ضربه، توضیح داده شده است [۹]. شکل ۷ نشان می دهد که قدرت تفکیک پالس هگزان (hexane) ($1.1 \times 10^6 \text{ v/m}$) به طور چشم گیری بیش از این مقدار ثابت برای

مدت زمان پالس شبه مرحله‌ای کوتاه، افزایش می‌یابد. مرز تفکیک ولتاژ سکوی اتصال نیز به عنوان تابعی از نسبت ولتاژ محور تغییر، افزایش می‌یابد [۱۰]. این سطح تفکیک افزایش یافته تحت عملکرد PWM نامناسب است چون نتیجه جریان‌های سکوی اتصال EDM در طول تخلیه سکوی اتصال، خیلی بیشتر از عملکرد موج سینوسی هستند. شکل ۸ نشان می‌دهد که سطوح زبر به نوعی مشاهده شده که در سکوی‌های اتصال تأخیر زمان آماری $3\mu s$ تا تفکیک دارند، که مطابق با مقدار اندازه‌گیری شده شکل ۶ است.



شکل ۸. تأثیر زبری سطحی بر روی تأخیر زمانی آماری برای تفکیک (شکست) [۹].

فرضیه‌ای است که سکوی‌های اتصال کیفیت بالای شکل ۵ (گاما=۲)، هنگام که موج سینوسی اعمال شده باشد، طول عمر مکانیکی بالایی ارائه می‌کند، اما ممکن است تحت عملکرد مبدل منجر به شکست جریان سکوی اتصال زودرس شود چون ضربه خازن اتصال سکوی اتصال ۸۰٪ برای ولتاژهای محور ضربه بالاتر، شارژ شده است. این در جریان‌های تخلیه EDM تخریبی بالاتر نتیجه

خواهد داد. سکوهای اتصال با کیفیت پایین شکل ۵ (گاما=۱)، هنگام بکارگیری موج سینوسی، طول عمر مکانیکی کمتری نشان داده‌اند، اما ممکن است واقعاً برای عملکرد مبدل بهتر باشند، چون جریان‌های EDM خازن مخرب، تنها در ۵٪ موارد رخ می‌دهد.

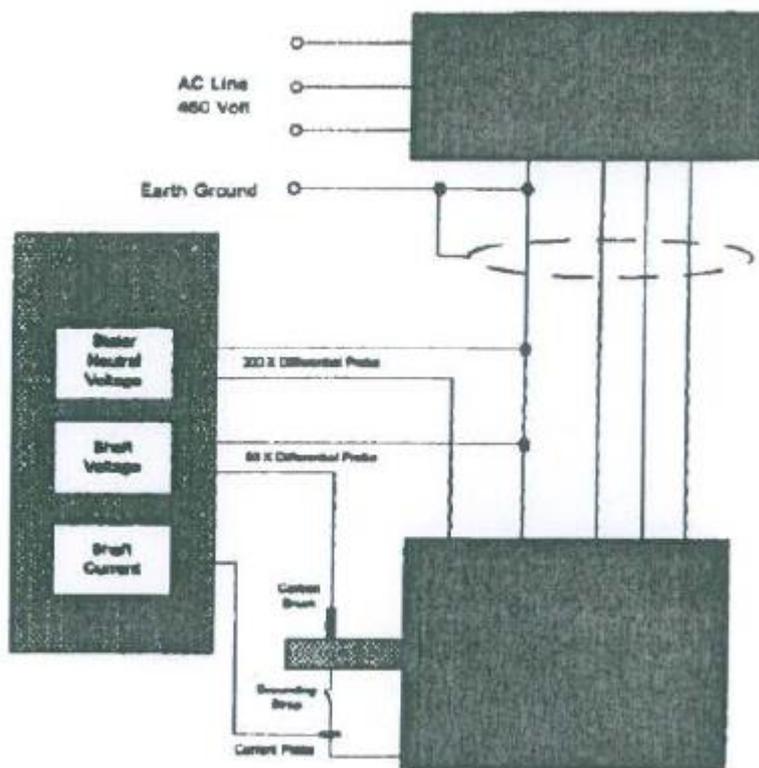
نتایج آزمایش موتور ۱۵HP (با سکوهای اتصال موتور متصل به زمین) تحت عملیات موج سینوسی حالت ثابت ۶۰Hz، هیچ مدرکی از وقوع جریان EDM نشان نداده است، به استثناء آغاز خط. نتایج آزمایش بر روی همان موتور تحت منابع ترانزیستور اتصال دوقطبی (BJT) و مبدل PWM ترانزیستورهای دوقطبی مدخل عایق‌بندی شده (IGBT)، شواهدی از EDM و شیار در پایه مداوم نشان داده‌اند.

II. تأثیر محرک‌های PWM بر روی جریان سکوی اتصال

A. آزمایش ساختار و تجهیزات

اندازه‌گیری مشارکت‌کننده‌ها در زبری سکوی اتصال برانگیخته شده بوسیله منبع ولتاژ PWM، نیازمند کشف علائم درون محیط شلوغ است. شناسایی این مشارکت‌کننده‌ها نیازمند ساختاری تجربی با ابزارهای آزمایش است که ایزولاسیون را انجام می‌دهند، اما با حساسیت یکسان. شکل ۹ تجهیزات آزمایش و ابزارهای بکار گرفته شده برای تحقیق و بررسی مقاله حاضر را نشان می‌دهد. این موتور، یک موتور القائی ۱۵ اسب بخار، ۴۶۰ ولت، ۸ قطبی بود. سکوهای محرک و غیرمحرک عایق‌بندی شده بودند. تسمه زمينه، سکوهای اتصال نرمال متصل شده به زمین را شبیه‌سازی کرده است. یک برس کربنی ولتاژ محور روتور را دریافت می‌کند. استاتور خشی برای اندازه‌گیری خشی

بودن استاتور جهت ولتاژ زمین، در دسترس بود. میله‌های ولتاژ بالا و یک تقویت‌کننده عایق، اندازه‌گیری‌های ولتاژ را انجام دادند و میله جریان، جریان تسمه زمینه را کشف کرد. یک نوسان‌سنج ساده دیجیتالی با آنالیزور پرتو جرم، فرکانس و اندازه پالس ولتاژها و جریان را نمایان ساخت.

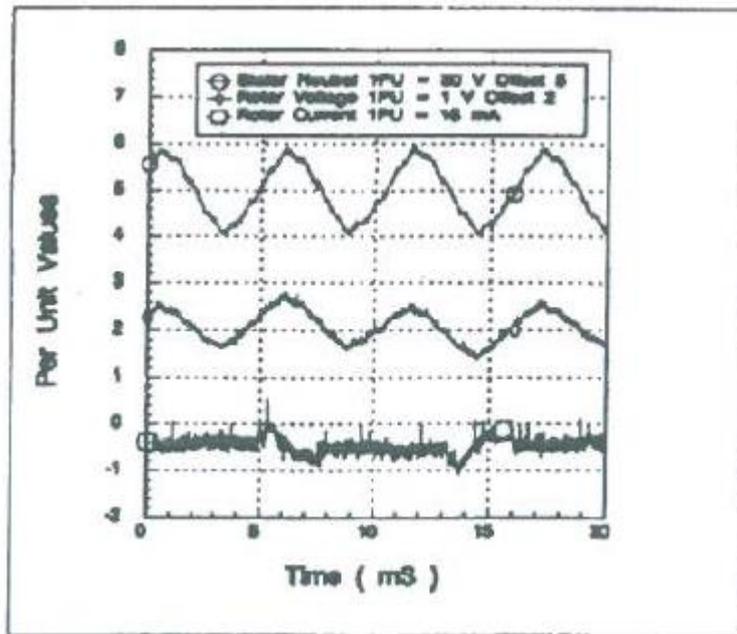


شکل ۹. آزمایش فیکسچر (منضمات) و تجهیزات.

B. سینوس عملکرد موج موتور القایی

جریان‌های میله و سکوی اتصال برای عملکرد موتورها از مبدل‌های منبع ولتاژ PWM، ویژه نیستند. Alger، جریان‌های محور و سکوی اتصال را در دهه ۱۹۲۰ مورد تحقیق و بررسی قرار داده است. محرک موتور القایی با موج‌های سینوسی، شرایط مرجع را مهیا کرده‌اند. اندازه‌گیری‌های استاتور خنثی برای زمین و روتور برای ولتاژهای زمین و جریان روتور، هنگام عملکرد ماشین القایی

در نبود بار و 6Hz، انجام شده است. نتایج این آزمایشات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جریان‌های EDM کشف نشده‌اند. ولتاژ استاتور خنثی 6۰ ولتی، ولتاژ روتور ۱ ولتی را برانگیخته، کاهش 6۰ به ۱. سطح ولتاژ محور روتور، بیش از انتهای استانداردها است.

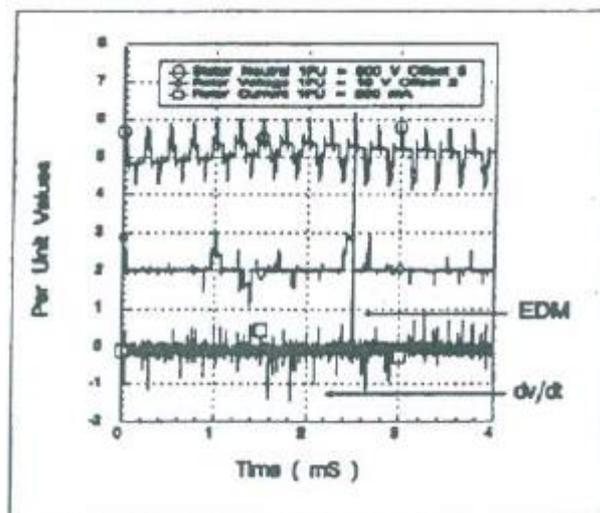


شکل ۱۰. عملیات خط AC.

C. شواهد برآده برداری تخلیه الکتریکی (EDM)

محدود کردن تعداد متغیرهای در جلوگیری از نتایج ناموجه از نتایج تجربیات ضروری است، به ویژه در هنگام بررسی تأثیرات مبدل‌های IGBT با فرکانس بالا. برای رسیدن به این مقصود: کابل جریان قوی به صورت طول ۱۰ پایی برای چهار هدایت کننده و پوسته افشان متصل به زمین در انتهای محرک، ثابت شده بود. فرکانس حامل 4KHz انتخاب شده بود. دریاچه‌های معمولی در ورودی یا خروجی گرداننده، قرار داده نشده بودند.

آزمایشات بر روی سیستم محرکه شکل ۹ اجرا شده‌اند. استاتور خنثی برای ولتاژ زمین، محور روتور برای ولتاژ زمین و جریان تسمه سکوی اتصال، نمایش داده شده بودند. شکل ۱۱ نتایج تجربی در هنگام عملکرد محرک AC در ولت‌های مجاز در هرتزها و 48Hz را نشان می‌دهد. این استاتور خنثی برای ولتاژ زمین، نمونه نوعی در شکل موجی چرخه حامل مربوط به مبدل‌های منبع ولتاژ PWM را نشان می‌دهد. اما ولتاژ روتور پروفایل کامل متفاوتی را نشان می‌دهد. اکثر اوقات، این روتور به زمین متصل شده است، اما گاهی این روتور، استاتور خنثی برای ولتاژ زمین را دنبال می‌کند. سپس خیلی ناگهانی، ولتاژ روتور متلاشی می‌شود، ایجاد یک پالس جریان می‌کند. شکل ۶، طرحی توسعه یافته از تخلیه EDM است. چون استاتور برای ولتاژ خنثی افزایش می‌یابد، ولتاژ روتور نسبت به مشخصات بار ظرفیت، واکنش نشان می‌دهد. در واقع، ولتاژ روتور به مقداری پانزده برابر بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده در زمان بکارگیری امواج سینوسی، افزایش می‌یابد. به جای تخلیه بار، ضربه‌ای از جریان با ولتاژ روتور همزمان با فروپاشی، رخ می‌دهد.



شکل ۱۱. عملیات محرکه AC.

تعداد سکویهای اتصال از عملکرد موتورهای بر روی محرک‌های AC و موارد عمده AC، حذف شده بودند. سکویهای اتصال برای اثبات شیار EDM آزمایش شده بودند. شکل ۱ مثال‌هایی از سکویهای اتصال از موتورهای بکار رفته در محرک‌های AC پس از بخش‌بندی را نشان می‌دهد. این شیار کاملاً مشخص است. قاب سکوی اتصال بیرونی در سمت چپ، تخلیه EDM تصادفی را نشان می‌دهد. قابل بیرونی در سمت راست، قلم‌زنی (حک) سطح قابل به طور مداوم را نشان می‌دهد.

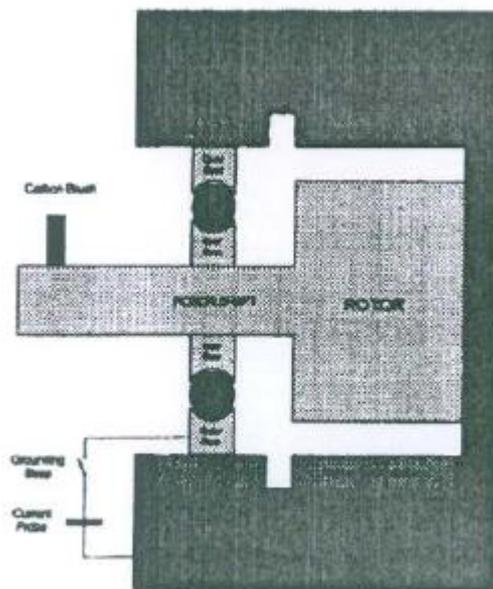
جریان سویچینگ (قطع و وصل) dv/dt نرمال، در محدوده صدها میلی آمپر است و با افزایش در پتانسیل روتور اتفاق می‌افتد. بررسی مقالات تکنیکی، نتیجه‌ای در خصوص تأثیرات این جریان نسبتاً کوچک، نشان نمی‌دهد. اما جریان بزرگ ناشی از فروپاشی سریع ولتاژ روتور بزرگ، گمان می‌رود که موجب EDM شود. مقدار EDM نشان داده شده، بوسیله تسمه زمینی الحاق شده و مقاومت ظاهری نوسان آن، محدود شده است. جریان سکوی اتصال یک سیستم محرک استاندارد ممکن است بوسیله مقاومت ظاهری گردش کوتاه سکوی اتصال، محدود شده باشد. این جریان، سبب، مدل‌سازی و کنترل آن، مرکز توجه مابقی این مقاله است.

III. مدار معادل برای جابجایی سکوی اتصال و جریان‌های EDM

A. مدل

شکل ۱۲ ساختار فیزیکی این موتور آزمایشی را نشان می‌دهد. هم انتهای محرک و هم غیرمحرک روتور با یک پوسته نگهدارنده سکوی اتصال عایق‌بندی شده، تجهیز شده بود، که

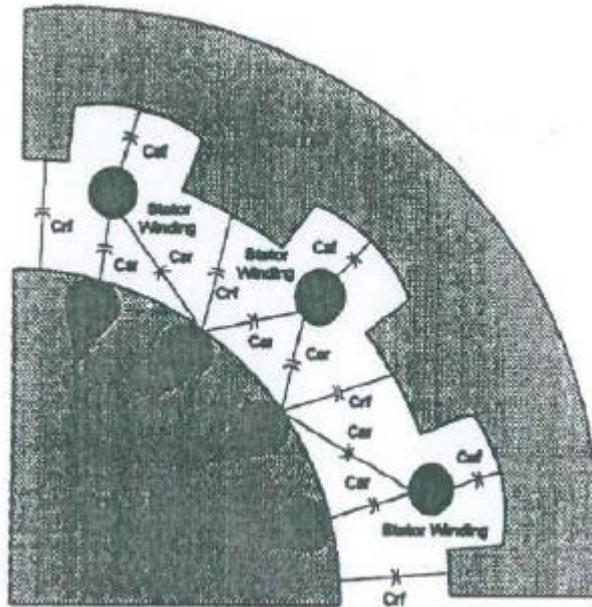
سکوهای اتصال روتور را از قالب موتور، جدا کرده است. که اندازه‌گیری ولتاژ روتور مدار باز را ارائه کرده، و هنگام کوتاه شدن بوسیله تسمه زمینی، مونتاژ یک سکوی اتصال واقعی را شبیه‌سازی می‌کند. به علاوه، این تسمه زمینی، مکانیسمی برای اندازه‌گیری سکوی اتصال برای جریان زمین را ارائه می‌کند. شکل ۱۲ یک برس کربنی برای اندازه‌گیری ولتاژ روتور و راه‌حل‌های تحقیقی برای مسئله جریان سکوی اتصال EDM را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. ساختار فیزیکی موتور آزمایشی.

این موتور ۴۸ استاتور و ۶۴ میله روتور داشت. شکل ۱۳ اتصال خازنی مناسب برای توسعه این مدل را نشان می‌دهد. این استاتور برای ظرفیت خازنی قابل (C_{sf}) ، یک عنصر توزیع شده نشان دهنده اتصال خازن برای قابل در امتداد طول رساناهای استاتور، است. برای تحقیقات بیشتر، اتصال مغناطیسی استاتور و روتور، کافی است. اما با ارائه dv/dt بالا با وسایل قدرتی مدرن، بررسی

اتصال خازنی را نمی‌توان نادیده گرفت. بنابراین، استاتور برای ظرفیت خازنی روتور (C_{tr}) و روتور برای ظرفیت خازنی قابل (C_{ft}) نیز شامل این موضوع می‌شوند.



شکل ۱۳. اتصال خازنی موتور.

این سکویهای اتصال، غشاء روان سازنده و پوسته عایق، ترکیبی از ظرفیت‌های خازنی، مقاومت‌های ظاهری و مقاومت ظاهری غیرخطی ارائه می‌کنند، شکل ۱۴. ابتدا مقاومت ظاهری قابل داخلی و خارجی موجود است. سپس، بسته به ساختار فیزیکی، سکوی اتصال شامل n گوی به صورت موازی است؛ هر گوی مقاومت ظاهری مؤثری دارد ($R_{ball,r}$). به علاوه، هر گوی در غشاء روان‌سازنده فرو برده شده است؛ بنابراین، هر گوی دو ظرفیت خازنی ($C_{ball,r}$) وابسته به گوی برای قاب‌های داخلی و خارجی ارائه می‌کند. بخش گوی مدل سکوی اتصال، بنابراین شامل n ترکیب موازی ($C_{ball,r}$) و ($R_{ball,r}$) است. مابین گوی‌ها، قاب‌های داخلی و خارجی بوسیله روان‌سازنده تفکیک شده‌اند، که به شکل حامل‌های دی‌الکتریکی درمی‌آیند. بنابراین، یک مقاومت خازنی

$(C_{gap,r})$ مابین هر دو جفت گوی، در نتیجه n خازن موازی، شکل گرفته است. مقاومت ظاهری

غیرخطی $(Z_{L,r})$ برای نابهنجاری‌ها و موارد تصادفی سکوی اتصال، محاسبه می‌شود.

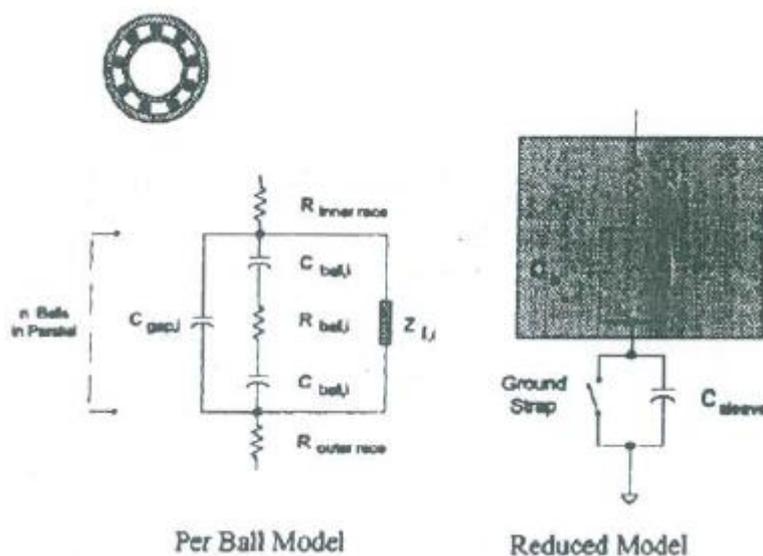
ترکیب این اجزاء مستقل موجب کاهش مدل سکوی اتصال می‌شود، که متناسب با مدل‌های

محرک موتور بکار گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها و آنالیزها است. این مدل کاهش یافته شامل مقاومتی

ظاهری (R_b) در مجموعه‌ای با ترکیب موازی از مقاومت خازنی مؤثر (C_b) و مقاومت ظاهری

غیرخطی (Z_l) است. سرانجام، پوسته عایق دنباله‌ای از مقاومت خازنی (C_{steeve}) اضافه می‌کند که

هنگامی که تسمه متصل به زمین بکار می‌رود، کوتاه شده است.



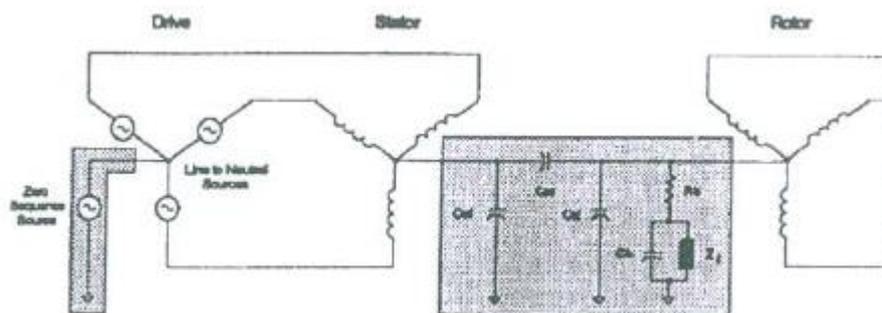
شکل ۱۴. مدل‌های سکوی اتصال موتور.

از ترکیب مدل سکوی اتصال با یک مدل مبدل / موتور ساده، مدل شکل ۱۵ حاصل می‌شود.

در اینجا، مبدل به صورت سه خط برای ولتاژهای ختشی با یک ختشی برای منبع توالی صفر زمین،

مدل‌سازی شده است. این مدل اجازه می‌دهد که ولتاژهای مبدل به صورت مثبت، منفی و

مجموعه‌ای متوالی صفر، آزمایش شود. این موتور به صورت دو مجموعه از سیم‌پیچ‌های سه مرحله‌ای نمایش داده شده است؛ یکی برای سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور. اتصال خازنی از استاتور به قاب، در وضعیت خنثی سیم‌پیچ استاتور بزرگ شده است و اتصال خازنی مابین استاتور و روتور، شبکه‌های توالی صفر استاتور و روتور را به هم وصل می‌کند. سرانجام، این روتور برای ظرفیت خازنی قابل و سکوی اتصال، مسیرهایی به زمین از محور روتور ارائه می‌کند، در اینجا بوسیله وضعیت خنثی روتور نمایش داده شده است.

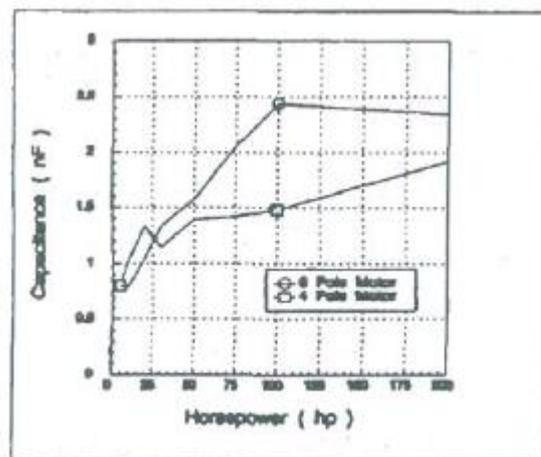


شکل ۱۵. مدل مبدل/موتور.

B. توضیحی برای دلیل جابجایی سکوی اتصال و جریان‌های EDM

از آزمایش مدل سکوی اتصال در مفهوم نتایج آزمایش نشان داده شده در شکل ۱۱، اهمیت مقاومت ظاهری غیرخطی Z_1 ، مشهود است. چون خازن سکوی اتصال به طور نرمال در هنگام تغییرات ولتاژ استاتور، یک dv/dt یا جریان جابجایی نشان می‌دهد، جریان dv/dt ظاهری بوسیله مقاومت ظاهری ارائه شده بوسیله مدل شکل ۱۵ با Z_1 مساوی با مقدار کم غیر صفر، محدود شده است. این متناظر با سکوی اتصال در یک موقعیت مقاومت ظاهری پایین مابین گوی بیرونی و درونی است. اما، گاهی سکوی اتصال، غشاء روان سازنده را به حرکت درمی‌آورد، که به روتور

اجازه پیگیری ولتاژ منبع با مدت زمان تصادفی را می‌دهد. این شرایط متناظر با افزایشی اساسی در Z_1 است. هنگامی که Z_1 متلاشی می‌شود، بازتاب موقعیت سکوی اتصال برتر یا تفکیک غشاء، خازن C_b تخلیه شده و جریان EDM رخ می‌دهد، با جریان سکوی اتصال محدود شده بوسیله مقاومت ظاهری روش معمولی یا توالی صفر. بنابراین، این مقاومت ظاهری سکوی اتصال، در اصل آماری و وابسته به موقعیت گوی‌ها، شرایط سکوی اتصال و روان سازنده آن، است.



شکل ۱۶. ظرفیت خازنی قاب- روتور (چرخان)- محاسبه شده.

C. مقادیر پارامتر مدل

ورودی‌های مدل شکل ۱۵ شامل سکوی اتصال مناسب و پارامترهای موتور، و تابع نیروی ترتیب صفر است. محاسبات و آزمایشات، مقادیر پارامتر و ولتاژ منبع را ارائه کرده‌اند. برای محاسبه ظرفیت خازنی استاتور و روتور، دو رسانای موازی با تفکیک مساوی با مسافت مابین مراکز رساناها، آنالیز شده‌اند. این مقدار برای بازتاب عدد شکاف‌های استاتور و محدوده باز شکاف، تعدیل شده‌اند. برای برپایی روتور جهت ظرفیت خازنی قاب، روتور و استاتور به صورت

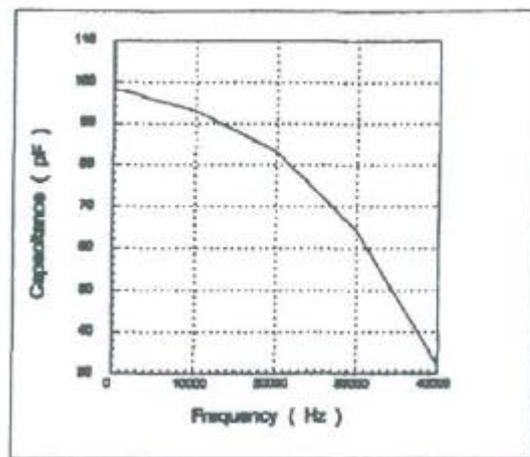
سیلندرهایی موازی با یک فاصله هوایی در نظر گرفته شده بودند. شکل ۱۶، C_{ij} را به عنوان تابعی از اسب بخار برای موتورهای ۴ و ۶ قطبی، نشان می‌دهد. ظرفیت خازنی غشاء سکوی اتصال با فرض ساختار کروی برای گوی نسبت به سطح قابل، محاسبه شده است. مقدار ویژه برای ظرفیت خازنی سکوی اتصال گوی، ۱۹۰ pf است [۱۱]. مقادیر محاسبه شده برای آزمایش موتور و سکوی اتصال در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. ظرفیت خازنی مدل موتور

	Calculated	Measured
Csr	100 pF	100 pF
Csf	-----	11 nF
Crf	1 nF	1.1 nF
Cb	200 pF	200 pF

آزمایشاتی برای مشخص کردن دقت محاسبات فوق انجام شده‌اند. با استاتور برانگیخته نشده و روتور قطبی شده برای موتور محرک، اندازه‌های ظرفیت خازنی موثر از روتور به قابل، با متر RLC در سرعت‌های مختلف انجام شده است. این آزمایشات به طور موافق ظرفیت خازنی ۱۴۰۰ pf را ارائه کرده‌اند. این مقدار معادل $C_{sr} // (C_{rj} + (C_{rj} // C_b))$ را ارائه می‌کند. اگرچه C_b وابسته به سرعت گردش است، تغییرناپذیری این اندازه‌گیری اشاره به غالب شدن C_{ij} دارد. C_{sf} ، بوسیله اندازه‌گیری ظرفیت خازنی از ترمینال‌های استاتور به قابل با روتور حذف شده، بدست می‌آید. برای مشخص کردن C_{sf} ، اندازه‌گیری‌هایی از ظرفیت خازنی موثر از ترمینال‌های استاتور به قاب با محور روتور و قاب متصل، انجام شده است. C_{sf} ، بوسیله کاستن C_{sf} بدست آمده است.

شکل ۱۷، C_{sr} را برای موتور آزمایش به عنوان تابعی از فرکانس، نشان می‌دهد. سرانجام، مقاومت ظاهری سکوی اتصال Z_1 ، به عنوان تابعی از سرعت گردش اندازه‌گیری شده است، این نتایج در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. این موارد در ترکیب با مقدار اندازه‌گیری شده برای C_b ، اجازه تعیین C_{rf} را می‌دهد.

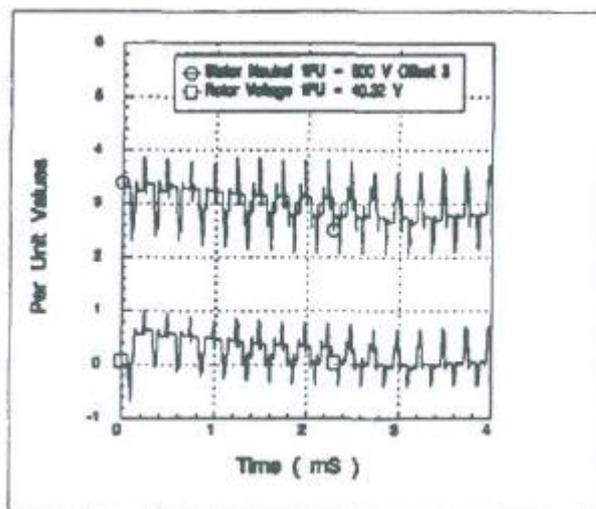


شکل ۱۷. ظرفیت خازنی روتور - پوسته (قسمت ثابت ماشین) - اندازه‌گیری شده.

بررسی مقادیر پارامتر شامل آزمایشاتی با تسمه زمینی پوسته عایق بر روی سکوی اتصال محرک و مدور در فرکانس‌های مختلف در نبود بار، بود. استاتور خنثی برای ولتاژ زمین و ولتاژ روتور برای زمین اندازه‌گیری شده بودند؛ ولتاژ استاتور از حالت خنثی سیم‌پیچی‌های استاتور و ولتاژ روتور از برس روتور، پیوست است. نتایج این آزمایشات در شکل ۱۸ نشان داده شده‌اند. با تسمه زمینی باز، ولتاژ روتور، درجایی که تسمه زمینی کار گذاشته شده بود، به طور واضح متفاوت از ولتاژ روتور شکل ۱۱ است. پیگیری استاتور برای ولتاژ خنثی بوسیله ولتاژ روتور، وجود مسیرهای توالی صفر را مانند آنچه در مدل شکل ۱۵ نشان داده شده، تایید می‌کند.

نسبت ولتاژ استاتور و روتور، وزن مناسب خازن‌های C_{sr} و C_{rf} در جدول ۱ را تایید

می‌کند.

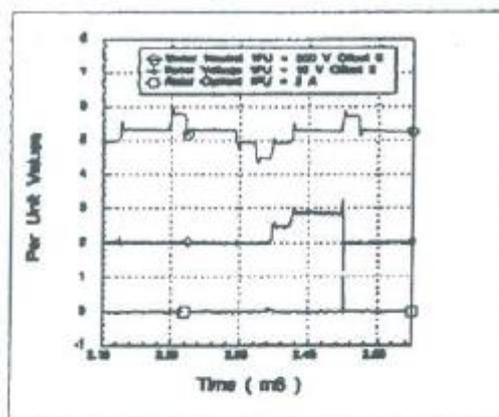


شکل ۱۸. عملیات محرکه AC- سکوی اتصال باز.

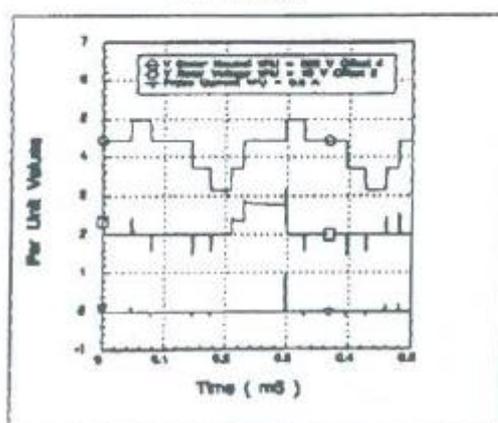
D. نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی و آنالیز اهداف، مدل شکل ۱۵ به تقریب توالی صفر کاهش یافته است، که بخش سایه‌دار شکل ۱۵ است. شبیه‌سازی‌ای با پارامترهای جدول ۱ برای مدل سکوی اتصال، ارائه شده است. این شبیه‌سازی ابزاری تحلیلی برای آزمایش تأثیرات شکل موج‌های PWM، بررسی مدل سیستم و پارامترها بوسیله همبستگی نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات تجربی و برای ارزیابی راه‌حل‌های مختلف برای EDM، ارائه کرده است. شکل ۱۹ بخش بسط‌یافته‌ای از شکل ۱۱ و شبیه‌سازی با استفاده از مدل ترتیب صفر را نشان می‌دهد. تابع نیرو برای شبیه‌سازی، استاتور خنثی برای ولتاژ زمین از نتایج تجربی بود. این خروجی‌ها شامل ولتاژ روتور و جریان میله، مانند آنچه نشان داده شده، است.

Experimental



Simulation



شکل ۱۹. تخلیه بار EDM (بالا) تجربی (پایین) شبیه‌سازی.

مقایسه نتایج این شبیه‌سازی با نتایج تجربی، توافق (هماهنگی) خوبی را نشان می‌دهد. Dv/dt

و جریانات EDM، نمایشگر نتایج تجربی هستند. افزایش سریع در ولتاژ روتور در نقطه تخلیه

EDM، در توافق خوبی با این اطلاعات است. برای بدست آوردن دقت، برآوردی از ماهیت Z_1 ،

لازم است. برای نتایج نشان داده شده در فوق، Z_1 به عنوان یک صفحه مدل‌سازی شده است

(شکل ۲)؛ مقاومت ظاهر بالا تا آستانه (مرز) ولتاژ مشاهده شده است؛ بنابراین ولتاژ محدود شده

است. این ولتاژ آستانه به طور تقریبی تعیین شده بود. مقدار مقاومت ظاهری در هنگام ردیابی ولتاژ،

از این نسبت تعیین شده است که ولتاژ روتور تجربی شکل ۱۹ کاشه یافته، در تطابقت خوبی با نتایج شکل ۲ بود.

محدوده‌ای که این شبیه‌سازی در پیش‌بینی واکنش مشاهده شده با شکست مواجه می‌شود، در واکنش موقعیتی به dv/dt و جریانات EDM رخ می‌دهد. آزمایش نزدیک نتایج تجربی، نوسان $12/5\text{MHz}$ در جریان اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد؛ اما، این نوسان در نتایج شبیه‌سازی ظاهر نمی‌شود. توضیحی برای این اختلاف، تکنیک اندازه‌گیری است. مقاومت ظاهری مشخصه تسمه زمین، فرکانس طبیعی را تغییر می‌کند و اختلافی در dv/dt و جریانات EDM بوجود می‌آورد.

IV. موتور القاء حفاظت شده الکترواستاتیکی: راه‌حلی برای جریانات سکوی اتصال

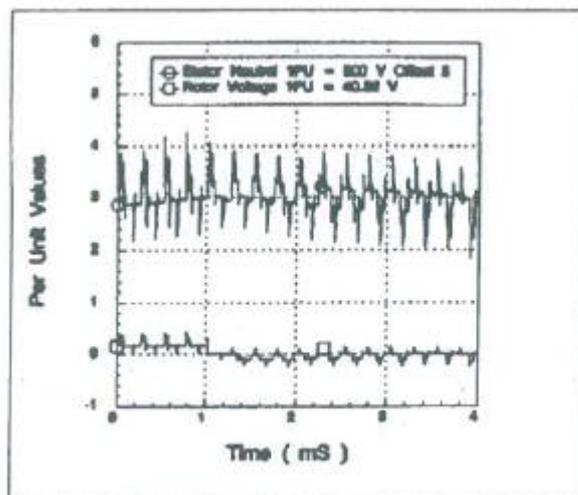
EDM

نتایج تجربی بخش قبلی، اشاره به تخلیه الکتریکی به عنوان مشارکت کننده اصلی در زبری سکوی اتصال، دارد. مدل سکوی اتصالی ارائه شده و با مدل مربوط به منبع الکتریکی و شبکه اتصال، متصل شده است. این مدل رفتار الکتریکی مشاهده شده را بازتاب می‌دهد، که نشان می‌دهد منبع زبری سکوی اتصال محرک PWM، حالت معمولی یا ولتاژ توالی صفر است.

با استفاده از مدل ارائه شده در فوق، وظیفه پیشنهاد راه‌حلی‌هایی برای تخلیه EDM، به سادگی به قطع کننده تخلیه ولتاژ منبع، مقاومت ظاهری اتصال، یا طراحی سکوی اتصال، تبدیل می‌شود. این سه محدوده طراحی برای تحقیقات در دسترس هستند.

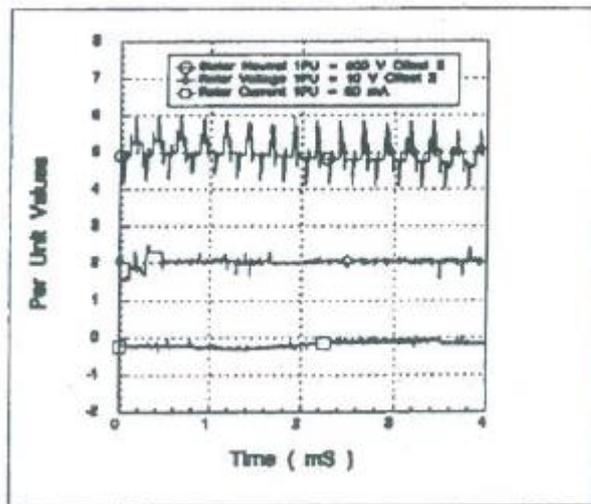
به دلیل اتصال خازنی از استاتور به روتور، به احتمال زیاد کاندید، مکانیسم اتصال برای استاتور به روتور - C_{sr} در شکل ۱۵- باشد. اگر یک پوشش الکترواستاتیکی مابین استاتور و روتور

قرار گرفته باشد؛ ظرفیت خازنی اتصال از استاتور به روتور خراب شده است؛ بنابراین باعث کاهش dv/dt و جلوگیری از پیگیری ولتاژ بوسیله روتور می‌شود. چون این ماشین القایی، از طریق القاء مغناطیسی گشتاور ایجاد می‌کند، وجود این پوشش بر روی دسته‌بندی خروجی موتور تأثیر نخواهد گذاشت. این پوشش بوسیله قرار دادن نوارهای فلزی مس چسبیده به هم ۱ اینچی کنار هم، برای پوشش محدوده شیار استاتور، ساخته شده است. این پوشش برای قابل موتور به زمین ساییده شده است.

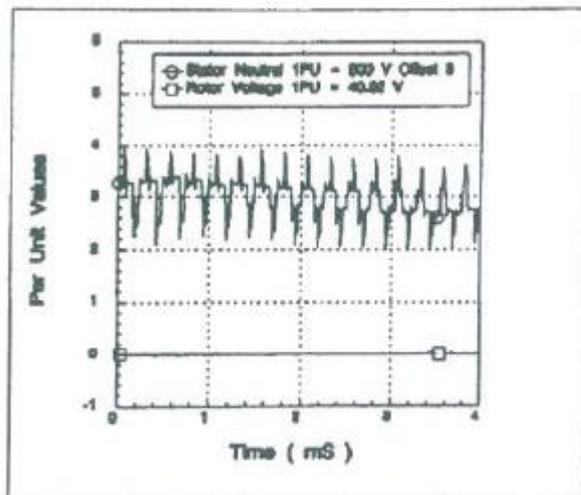


شکل ۲۰. پوشش قسمت ثابت ماشین - سکوی اتصال باز.

شکل ۲۰ این استاتور خنثی برای زمین و ولتاژ محور برای شرایط عملکرد برابر مانند آنچه در شکل ۱۸ آمده را نشان می‌دهد. با قرار دادن این پوشش، ولتاژ روتور پیک ۱۸ ولتی، هنگامی که تسمه متصل به زمین دور خارجی به صورت باز مدور شده، موجود است - در مقایسه با پیک ۴۰ ولتی شکل ۱۸، کاهش ۵۶ درصدی. با تسمه متصل به زمین (شکل ۲۱)، جریانات dv/dt ، از 500 ma به 50 ma کاهش یافته است. هیچ جریان EDMی کشف نشده است.



شکل ۲۱. پوشش پوسته- پوسته (جلد) کوتاه شده.

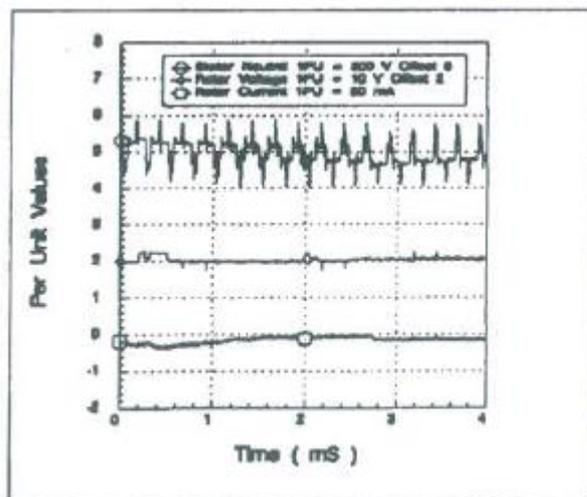


شکل ۲۲. پوشش کامل- سکوهاى اتصال باز.

با بکارگیری نوارهای مسی فلزی مانند آنچه در فوق نشان داده شده، پرتودهی روتور کاهش یافته برای سیم پیچی های استاتور در در تناسب دقیق بوسیله ولتاژ روتور، کاهش یافته است. بوسیله توسعه پوشش فارادی برای احاطه استاتور و سیم پیچها و تکثیر آزمایشات فوق، پوشش کاملاً

نزدیکی از ولتاژ روتور، مشاهده شده است. همانطور که نتایج شکل ۲۲ نشان می‌دهد، این ولتاژ روتور با تسمه متصل باز، در مقایسه با مورد بدون پوشش، تا ۹۸٪ کاهش یافته است. اتصال تسمه زمینی (شکل ۲۳)، جریان dv/dt صفر مجازی اندازه‌گیری شده و هیچ جریان EDM کشف نشده است.

نتایج تجربی نشان داده شده در فوق، جریانات سکوی اتصال را تایید می‌کند، هم dv/dt و هم EDM، عمدتاً بوسیله اتصال الکترواستاتیکی القاء شده‌اند. ظرفیت خازنی استاتور به روتور، توالی صفر یا منبع روش عادی از استاتور به روتور را متصل می‌کند. این سکوی اتصال، مسیر بازگشتی برای منبع روش معمولی ارائه می‌کند، بنابراین اجازه جریانات تخلیه EDM و dv/dt را ارائه می‌دهد.



شکل ۲۳. پوشش کامل - پوسته کوتاه شده.

۷. نتیجه گیری

این مقاله بررسی ای از زبری سکوی اتصال القاء شده به صورت الکتریکی برای ماشین های AC تحت عملکرد موج سینوسی با فرکانس پایین را ارائه کرده است. نظریه ای برای تفکیک دی الکتریکی روان سازنده تحت القاء PWM پیشنهاد کرده است. تخلیه یا جابجایی (dv/dt) جفت الکتروستاتیکی و جریانات ماشین تخلیه الکتریکی (EDM)، شناسایی شده و به صورت تقریبی اندازه گیری شده اند. مدل های الکتریکی ارائه شده و به طور تقریبی برای ولتاژ منبع، اتصال شبکه و سکوی اتصال، تغییر یافته اند. یک موتور القاء پوشش یافته الکتروستاتیکی شرح داده شده و به طور تجربی به عنوان راه حلی برای مسئله جریان سکوی اتصال، نشان داده شده است.

این مقاله تکنیکی و تجربیات نشان می دهد که موتورهای بارگیری نشده در سرعت بالا، بدترین مورد سناریو برای جریانات سکوی اتصال ارائه می کنند. به علاوه، کاربردهای مربوط به بارهای جفت شده، به دلیل مسیرهای موازی برای تخلیه الکتروستاتیکی، گرایش به ارائه این مسئله ندارند.