

شبیه‌سازی جریان انتشار میدانی به منظور تشخیص فشار داخلی کلیدهای خلأ

محمد رضوانی^{۱*}، اصغر اکبری^۲، سید محمد تقی بطحایی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مربی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲ و ۳- دانشیار، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۰۳)

چکیده: تشخیص وضعیت کلید فشار قوی خلأ در طول سرویس‌دهی آن اهمیت به‌سزایی در تعیین سلامت و طول عمر آن دارد. عامل اساسی در تعیین وضعیت کلید خلأ فشار درون محفظه قطع آن می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که افزایش فشار خلأ باعث از بین رفتن خاصیت عایقی و قابلیت قطع جریان کلید می‌شود. در دهه‌های اخیر انواع روش‌های شناسایی فشار داخلی مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند که براساس اثرگذاری پارامترهای مختلف می‌باشد. لیکن تاکنون یک روش راضی‌کننده و قابل اعتمادی که اطلاعاتی در ارتباط با حاشیه امنیت خلأ باقیمانده به‌دست دهد، یافت نشده است و روش‌های ارائه‌شده در مقالات، براساس انجام آزمایشات مختلف و نتایج تجربی می‌باشند. لذا در این مقاله مدل‌سازی جریان انتشار میدانی با استفاده از شبیه‌سازی پلاسمای ایجاد شده، از روش ذره در سلول به‌منظور تعیین ارتباط این جریان و فشار خلأ محفظه قطع انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از ضربه جریانی به‌همراه جریان انتشار میدانی در یافتن فشار خلأ درون محفظه قطع تأثیر به‌سزایی دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان انتشار میدانی، محفظه قطع، کلید خلأ، ذره در سلول، یونیزاسیون

۱- مقدمه

افزایش فشار محفظه قطع باعث از دست رفتن خاصیت عایقی کلید و قابلیت قطع جریان آن می‌گردد.

کلیدهای خلأ برای قطع و وصل جریان‌های زیاد عمدتاً در سطوح ولتاژ متوسط در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر به دلیل فقدان اثرات مخرب زیست محیطی، تمایل به استفاده از کلیدهای خلأ در سطوح ولتاژ فوق توزیع افزایش چشمگیری یافته‌است. دست‌اندرکاران سطوح ولتاژ فوق توزیع اغلب نیازمند داشتن اطلاعات بیشتری در خصوص وضعیت به‌روز تجهیزات فشارقوی در زمان سرویس‌دهی این ادوات می‌باشند [۱]. از این‌رو تشخیص وضعیت کلید خلأ در طول عمر آن اهمیت به‌سزایی در میزان استفاده از آن در سطوح ولتاژ بالاتر دارد. پارامتر مهمی که عملکرد کلیدهای خلأ را تحت تأثیر قرار می‌دهد فشار داخلی آن و به عبارت دیگر میزان خلأ در آن می‌باشد که می‌بایست در یک حد آستانه قرار داشته باشد تا عملکرد مطمئن کلید را تضمین نماید [۲].

افزایش فشار داخلی بیشتر از یک حد آستانه معین (10^{-4} - 10^{-2} Torr) نخست قابلیت قطع جریان اتصال کوتاه کلید را کاهش می‌دهد [۳]؛ و چنانچه فشار داخلی تا چند ده برابر افزایش یابد، سبب از دست رفتن خصوصیات عایقی محفظه قطع می‌شود که قابلیت اطمینان کلید را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیشتر کارخانه‌های تولیدکننده محفظه قطع از این حد آستانه فراتر رفته و قطع‌کننده‌های جدید با فشار گاز باقیمانده‌ای کمتر از 10^{-7} Torr (گستره خلأ خیلی زیاد) تولید می‌کنند. بنابراین این فشار گاز باقیمانده، معیاری برای کیفیت و قابلیت اطمینان می‌باشد.

همچنین یک حاشیه امنیت ایجاد می‌نماید که باید برای تمام زمان سرویس‌دهی کلید کافی باشد [۴].

۲- جریان انتشار میدانی^۳

قدرت دی‌الکتريکی زياد يکي از اصلي‌ترين نيازمندي‌هاي قطع‌کننده‌هاي خلأ مي‌باشد که نه فقط وابسته به پارامترهاي ماکروسکوپیک مانند جنس، شکل، فاصله دو کنتاکت و فشار گاز باقیمانده، بلکه به شرايط میکروسکوپیک سطوح کنتاکت نیز وابسته است. پروسه آماده‌سازی کنتاکت‌ها در طی فرآیند ساخت و همچنین عملکرد گذشته کنتاکت‌ها در کلید، پارامتر میکروسکوپیک سطح و فضای بين کنتاکت‌ها را تعيين مي‌کند [۳].

میدان الکتريکی اعمال شده به سطوح کنتاکت‌ها پيچيده تر از میدان همگن ساختار الکترودی صفحه- صفحه می‌باشد. به‌دلیل شکل فاصله کنتاکت‌ها (کنتاکت‌ها، شيلدها، ...) همچنین به‌دلیل وجود فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هاي میکروسکوپي در سطح کنتاکت مقدار دقیق میدان الکتريکی سطحی E_M بیشتر از شدت میدان الکتريکی همگن E_{hom} می‌باشد [۵].

که v_{vac} ولتاژ اعمالی بين کنتاکت‌ها، d فاصله کنتاکت‌ها و β ضریب افزایش می‌باشند که البته β شامل دو مؤلفه می‌باشد:

$$E_M = \beta \cdot E_{hom} = \beta \frac{v_{vac}}{d} \quad (1)$$

(۱) β_{mac} ، ضریب افزایش میکروسکوپیک به‌دلیل فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هاي میکروسکوپیک در سطح کنتاکت می‌باشد.

(۲) β_{mic} ، ضریب افزایش ماکروسکوپیک به‌دلیل شکل شکاف کنتاکت و پتانسیل شناور شیلد میانی می‌باشد [۱].

$$E_M = \beta_{mic} \cdot \beta_{mac} \frac{v_{vac}}{d} \quad (2)$$

اولین التزام برای شروع شکست، منبعی از الکترون‌ها می‌باشد. از آنجایی که در محفظه خلأ، گازی وجود ندارد، تنها منبع الکترون سطح فلز به‌عنوان مثال فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هاي میکروسکوپیک در سطح کاتد می‌باشد. به‌طور معمول الکترون‌ها در فلز به دلیل سد پتانسیل ϕ_1 نگهداشته می‌شوند (شکل ۱).

از این‌رو الکترون‌ها تنها اگر انرژی لازم $\phi_1 = \phi + \mu$ را داشته باشند قادر به ترک سطح فلز می‌باشند. در این رابطه ϕ انرژی خروج

یکی از مهمترین دلایل این تحقیق فقدان ادوات شناسایی مناسب به‌منظور ارزیابی فشار داخلی محفظه قطع در کلیدهای خلأ در زمان سرویس‌دهی کلید می‌باشد. از این‌رو هدف اصلی در این نوشتار سنجش افزایش فشار از حد آستانه مورد نظر، از طریق روش‌هاي الکتريکی و بدون دسترسی به داخل محفظه کلید می‌باشد. دلیل استفاده از روش‌هاي الکتريکی عدم دسترسی به فضای درون محفظه قطع کلید به‌دلیل ایزوله بودن آن می‌باشد، که استفاده از ادوات معمول سنجش فشار را غیرممکن می‌سازد.

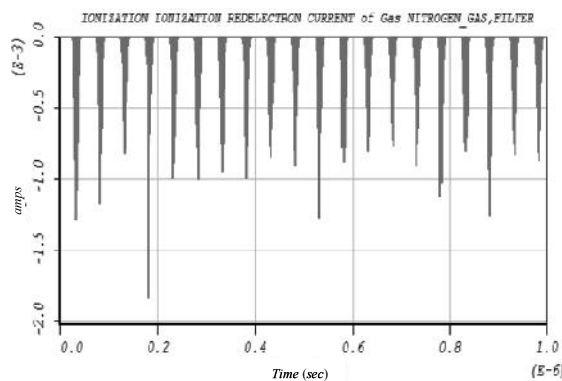
در دهه‌هاي اخير انواع روش‌هاي شناسایی فشار داخلی مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند که براساس اثرگذاری پارامترهاي مختلف می‌باشد. لیکن تاکنون یک روش راضی‌کننده و قابل اعتمادی که اطلاعاتی در ارتباط با حاشیه امنیت خلأ باقیمانده به‌دست دهد، یافت نشده است و روش‌هاي ارائه‌شده در مقالات، براساس انجام آزمایشات مختلف و نتایج تجربی می‌باشند. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری ولتاژ شکست [۵ و ۶]، قابلیت قطع جریان [۵ و ۶]، جریان‌هاي انتشار میدانی و قبل از شکست [۷-۱۰]، ولتاژ قوس [۱۱-۱۲]، تخلیه‌هاي الکتريکی و سیگنال‌هاي اشعه X [۱۳-۱۴] و امواج الکترومغناطیسی [۱۵-۱۷] می‌باشند که در مراجع مختلف ارائه شده‌اند. نکته مهم در تمامی مقالات عدم قطعیت نتایج می‌باشد. در هر مورد از روش‌هاي عنوان شده مدل کاملی برای اندازه‌گیری دقیق فشار درون محفظه وجود ندارد یا به‌عبارت دیگر ارتباط بين مقادیر اندازه‌گیری شده از هر روش و فشار مشخص نیست؛ به‌عنوان مثال در گیج‌هاي یونیزاسیون^۱ اندازه‌گیری خلأ که در کاربردهاي مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارتباط بين فشار و جریان اندازه‌گیری شده توسط رابطه $I=KP^n$ بیان می‌شود که با کالیبره کردن آن پارامترهاي K و n به‌دست خواهد آمد ولی در روش‌هاي بیان شده روابط مشابه وجود ندارد تنها در مرجع [۸] رابطه فشار درون محفظه قطع و زمان میرا شدن جریان انتشار میدانی داده شده است که این رابطه $\tau_{0.5} \cong \frac{k}{p}$ نیز در محدوده‌اي وسیع برای مقادیر k صادق می‌باشد. لذا هدف اصلی در این مقاله مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان انتشار میدانی با استفاده از روش شبیه‌سازی PIC به‌منظور تعیین رفتار این جریان می‌باشد. در ابتدا لازم است که رفتار عایق الکتريکی در خلأ با اعمال میدان الکتريکی بررسی شود تا با استفاده از آن بتوان جریان انتشار میدانی را مدل‌سازی نمود.

۳- شبیه‌سازی جریان انتشار میدانی

همان‌طور که از معادله Fowler-Nordheim مشاهده می‌شود، جریان انتشار میدانی به فشار خلأ وابسته نیست. به دلیل این‌که با اعمال میدان الکتریکی فشار قوی به فضای بین دو کنتاکت در کلید خلأ باعث برقراری جریان انتشار میدانی می‌گردد و این جریان باعث یونیزه‌شدن محیط می‌شود از این‌رو پلاسمایی ایجاد خواهد شد که شامل الکترون‌ها، یون‌های مثبت و گاز خنثی می‌باشد.

از این رو به منظور مطالعه تغییرات این جریان به‌ازای تغییرات فشار خلأ، ساختاری مطابق شکل (۳) در نرم افزار MAGIC Tool Suite تعریف می‌شود. این نرم‌افزار به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی پلازما با استفاده از روش PIC مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این ساختار کنتاکت‌ها از نوع کبالت-مس با تابع کار $\phi = 4/5$ و فاصله 0.5 cm از یکدیگر در نظر گرفته شده است. شعاع کنتاکت‌ها 5 cm می‌باشد.

در هر بار شبیه‌سازی با ثابت نگهداشتن دامنه و فرکانس ولتاژ اعمالی، فشار گاز خنثی پس‌زمینه در فضای شبیه‌سازی تغییر داده می‌شود و به‌ازای تغییرات فشار، جریان انتشار میدانی به‌دست می‌آید. در نرم‌افزار MAGIC با استفاده از تابع Emission High_Field می‌آید. در نرم‌افزار Fowler_Nordheim شبیه‌سازی می‌شود، اما به‌منظور بررسی اثر تغییر فشار درون محفظه قطع کلید خلأ بر جریان انتشار میدانی، در نرم‌افزار Magic باید از تابع دیگری به نام Ionization استفاده نمود؛ که با استفاده از این تابع می‌توان فشار خلأ درون محفظه را در مقدار دلخواه تنظیم نمود. تابع Ionization جریان به‌وجودآمده در اثر یونیزاسیون گاز خنثی پس‌زمینه درون محفظه را به‌دست می‌دهد. نکته‌ای که در استفاده از این دو تابع وجود دارد این است که نرم‌افزار جریان‌های خروجی آن‌ها را به تفکیک در خروجی ارائه می‌دهد که باید در به‌دست‌آوردن جریان نهایی، جریان‌های خروجی با هم جمع شوند. شکل (۲) جریان یونیزاسیون برای فشار 1 Millitorr را نشان می‌دهد.



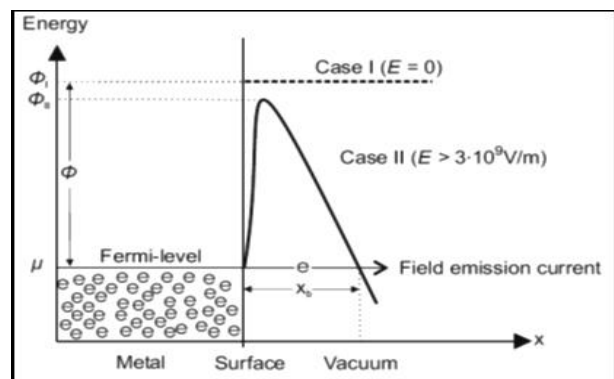
شکل ۲: جریان یونیزاسیون برای فشار 1 Millitorr با توجه به این‌که حد آستانه فشار در محفظه قطع کلید خلأ واقعی

سطحی و انرژی الکترون‌ها در سطح فرمی^۱ در واحد eV است. در حضور میدان الکتریکی خارجی E اعمالی به سطح فلز، سد پتانسیل کمتر و محدودتر (ϕ_{II}) خواهد شد. برطبق مکانیزم تونلی مکانیک کوانتوم، برای مقادیر شدت میدان الکتریکی زیاد $E \geq 3 \times 10^9 \text{ V/m}$ عرض سد پتانسیل محدود می‌شود که با احتمال مشخص الکترون‌ها در سطح فرمی^۳ می‌توانند از سد پتانسیل به فضای خلأ وارد شوند. این پدیده به عنوان انتشار میدانی شناخته می‌شود و اولین بار توسط Fowler and Nordheim در ۱۹۲۸ فرموله بندی گردید [۱]. شکل (۱) سد پتانسیل را بدون میدان الکتریکی خارجی $E \geq 3 \times 10^9 \text{ V/m}$ و همچنین با حضور این میدان خارجی را نشان می‌دهد. به دلیل وجود این میدان الکتریکی خارجی، سد پتانسیل برای الکترون‌ها در سطح فرمی به مقدار x_b محدود می‌شود. امکان این‌که یک الکترون از درون سد پتانسیل عبور کند وابسته به عرض سد پتانسیل و همچنین میدان الکتریکی می‌باشد.

در ادامه چگالی جریان انتشار میدانی براساس معادله Fowler-Nordheim برای دماهای $300^\circ \text{K} \leq v$ داده می‌شود [۴].

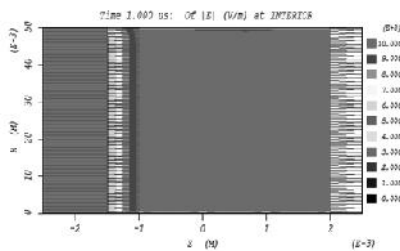
$$j_{of} = \left(\frac{1.54 \times 10^{-6} E_m^2}{\phi \times t_{(y)}^2} \right) \times e^{-\left(\frac{6.83 \times 10^9 \phi^{1.5} q_{(y)}}{E_m} \right)} \quad (3)$$

که در آن، j_{of} چگالی جریان انتشار میدانی برحسب A/m^2 ، E_m شدت میدان الکتریکی سطحی بر حسب V/m و ϕ انرژی خروج مربوط به سطح انتشار دهنده برحسب eV. توابع $t(y)$ و $v(y)$ وابسته به پارامتر میدان $y = \frac{\phi_I - \phi_{II}}{\phi}$ می‌باشند. در میدان الکتریکی خارجی قوی، سد پتانسیل یک کاهش رو به پایین در سطح فرمی $(\phi_I - \phi_{II} = \phi, y = 1)$ دارد، به بیان دیگر امکانی برای انتشار آزاد الکترون می‌باشد (شکل ۱).

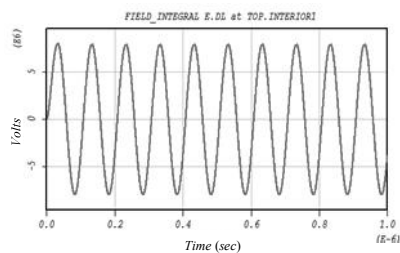


شکل ۱: مکانیزم تونلی مکانیک کوانتوم برای دو وضعیت با میدان خارجی و بدون آن [۱].

دوره تناوب موج سینوسی را با صرف زمان اجرای قابل قبول برنامه مشاهده نمود و همچنین به دلیل عدم وابستگی جریان انتشار میدانی به فرکانس (معادله (۳))، فرکانس ولتاژ سینوسی اعمالی ۱۰ MHz قرار داده شده است که با فرکانس انتخاب شده مدت زمان اجرای برنامه برای هر شبیه‌سازی به ازای فشار تنظیم شده از ۱۱۵ دقیقه تا ۱۹۰ دقیقه متغیر بود.



(الف)



(ب)

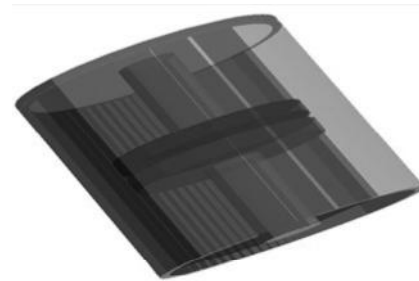
شکل ۴: (الف): منحنی تغییرات میدان الکتریکی اعمالی بین کنتاکت‌ها
(ب): منحنی تغییرات ولتاژ اعمالی

از آن جایی که به دلیل سینوسی بودن ولتاژ در هر نیم سیکل جای کاتد و آند با هم عوض می‌شود، در برنامه ورودی امکان انتشار برای هر دو کنتاکت در نظر گرفته شده است که در هر نیم سیکل از یکی از کنتاکت‌ها جریان انتشار می‌یابد. بنابراین جریان اندازه‌گیری شده باید ترکیب جریان اندازه‌گیری شده در آند و جریان اندازه‌گیری شده در کاتد باشد. همان‌طور که اشاره شد با تغییر فشار خلأ در نرم افزار با استفاده از تابع Ionization جریان یونیزاسیون به دست می‌آید که باید با جریان‌های جذب شده در کاتد و آند جمع شود. مجموع جریان جذب شده در آند و کاتد به همراه جریان یونیزاسیون، جریان انتشار میدانی نهایی را تشکیل می‌دهد، که در بخش بعدی این جریان برای فشارهای مختلف نشان داده می‌شود.

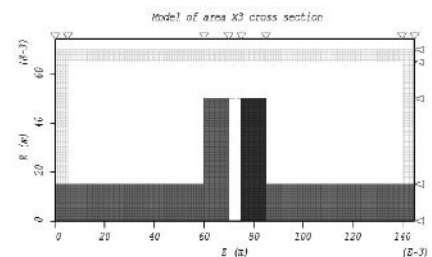
۴- ارائه نتایج

با اعمال ولتاژ مطابق شکل (۴-ب) بین دو کنتاکت جریان انتشار میدانی برقرار می‌شود که این جریان به‌ازای فشارهای خلأ

با توجه به این که حد آستانه فشار در محفظه قطع کلید خلأ واقعی ۱۰^{-۴} Millitorr می‌باشد و افزایش فشار از این مقدار آستانه باعث از دست رفتن خاصیت عیاقی در کلید خلأ می‌شود، لذا شبیه‌سازی جریان انتشار میدانی برای گستره خلأ ۱۰^{-۴} Millitorr انجام شده است که تغییرات جریان انتشار میدانی به‌ازای فشارهای مختلف مشاهده شود. در معادله (۳) جریان انتشار میدانی به‌صورت نمایی با میدان الکتریکی اعمالی وابسته است و نیز از آن جایی که در کلید خلأ واقعی میدان الکتریکی یکنواخت نیست از این‌رو جهت نزدیک کردن ساختار مدل‌سازی شده و ساختار واقعی محفظه قطع از یک ضریب به نام ضریب افزایش میدان (β) استفاده شده است.



نمای سه بعدی



نمای دو بعدی

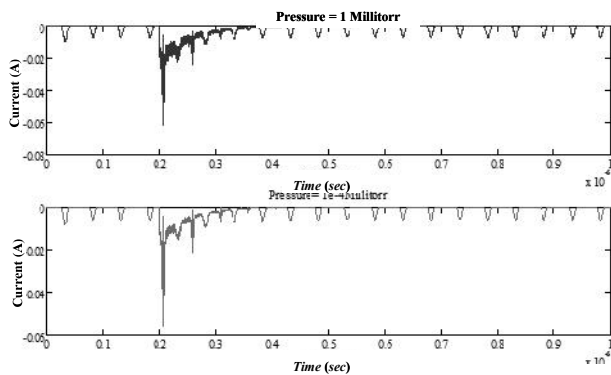
شکل ۳: ساختار سه‌بعدی (بالا) و دوبعدی (پایین) محفظه قطع مدل‌سازی شده

در شکل (۴-الف) منحنی تغییرات میدان الکتریکی بین دو کنتاکت در نرم‌افزار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میدان الکتریکی در فضای بین دو کنتاکت یکنواخت می‌باشد که عدم یکنواختی در ساختار واقعی از طریق اعمال ضریب β در معادله (۳) در ساختار مدل‌سازی شده جبران می‌شود. اما به دلیل اینکه در نرم‌افزار ضریب β در نظر گرفته نشده است، این مقدار در ولتاژ اعمالی لحاظ می‌شود، به‌گونه‌ای که ولتاژ اعمالی بین دو کنتاکت ۲۰ KV در کلید واقعی ضرب در ضریب افزایش میدان ($\beta=225$) می‌شود و ولتاژ اعمالی مطابق شکل (۴-ب) حاصل می‌شود. پله زمانی در برنامه شبیه‌سازی توسط خود نرم‌افزار انتخاب می‌شود و مقدار آن ۱.۶۸ پیکو ثانیه می‌باشد، از این‌رو برای این که بتوان نتایج مربوط به چند

از آن جایی که ارائه روشی برای اندازه‌گیری تغییرات فشار به‌ازای تغییر در جریان انتشار میدانی از اهداف این تحقیق می‌باشد و همان‌طور که نشان داده شد، جریان انتشار میدانی به‌تهایی تغییرات زیادی ندارد؛ لذا با الهام از مرجع [۸] روش دیگری جهت یافتن تغییرات فشار ارائه می‌شود. در این روش ابتدا با اعمال ولتاژ متناوب بین دو الکتروود، جریان انتشار میدانی برقرار می‌شود و بعد از گذشت چند سیکل ولتاژ، یک جریان ضربه‌ای بین کنتاکت‌ها اعمال می‌گردد.

در مرجع [۸] از این جریان به‌عنوان جریان Arc polishing یاد شده است. جریان انتشار میدانی همراه با جریان ضربه‌ای به‌ازای فشار ۱ Millitorr و 10^{-4} Millitorr در شکل (۷) نشان داده شده است. در شکل (۸-الف) جریان‌های مختلف به‌ازای فشارهای خلأ مختلف در یک منحنی ارائه می‌شود. با توجه به شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود که حداکثر دامنه جریان ضربه‌ای متناسب با فشار خلأ می‌باشد به‌گونه‌ای که با افزایش فشار دامنه جریان نیز افزایش می‌یابد. شکل (۸-ب) منحنی تغییرات حداکثر دامنه جریان انتشار میدانی به‌همراه جریان ضربه‌ای را نشان می‌دهد که با انطباق یک منحنی خطی رابطه فشار و جریان به‌صورت رابطه (۴) خواهد شد.

$$I = 0.0044 * P + 0.057 \quad (4)$$

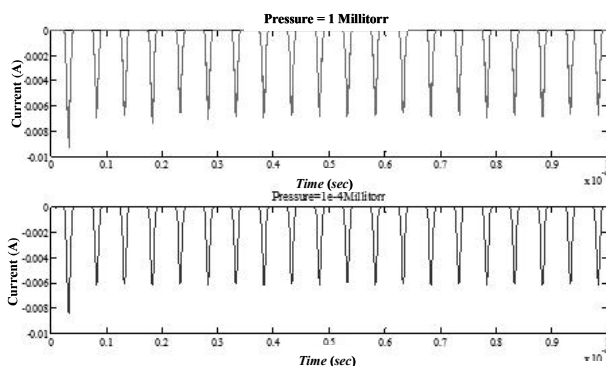


شکل ۷: جریان انتشار میدانی همراه با جریان ضربه‌ای به‌ازای فشار ۱ Millitorr (منحنی بالا) و 10^{-4} Millitorr (منحنی پائین)

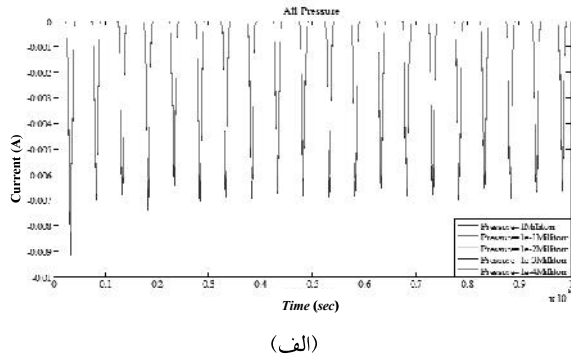
شکل (۹) منحنی ولتاژ اعمالی و جریان انتشار میدانی به‌دست آمده از نرم‌افزار را به‌صورت همزمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان در هر نیم سیکل ولتاژ وجود دارد که به‌دلیل تغییر کنتاکت موقعیت آند و کاتد در هر سیکل ولتاژ می‌باشد.

با مقایسه شکل‌های (۶ و ۸) مشاهده می‌شود که درصد تغییرات جریان انتشار میدانی به‌ازای تغییرات فشار خلأ در نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان انتشار میدانی به‌همراه جریان ضربه‌ای بیشتر است. این تغییرات برای جریان انتشار میدانی ۱۴/۴۶٪ و برای

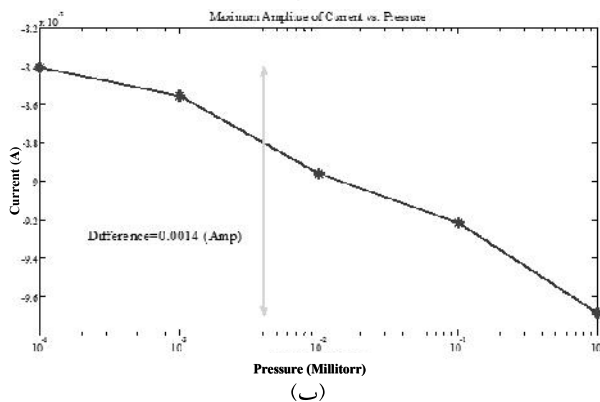
متفاوت به‌دست می‌آید. به‌عنوان نمونه جریان انتشار میدانی در فشار خلأ ۱ Millitorr و 10^{-4} Millitorr در شکل (۵) نشان داده شده است. در شکل (۶-الف) جریان‌های مختلف به‌ازای فشارهای خلأ متفاوت در یک منحنی ارائه می‌شود. همچنین حداکثر دامنه جریان انتشار میدانی برای گستره خلأ ذکر شده در شکل (۶-ب) نشان داده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود تغییرات جریان انتشار میدانی در گستره فشارهای خلأ ارائه‌شده زیاد نبوده و تغییرات جریان محسوس نیست.



شکل ۵: جریان انتشار میدانی در فشار خلأ ۱ Millitorr (منحنی بالا) و 10^{-4} Millitorr (منحنی پائین)



(الف)



(ب)

شکل ۶: (الف): جریان‌های مختلف به‌ازای فشارهای خلأ متفاوت (ب): حداکثر دامنه جریان انتشار میدانی فشارهای خلأ متفاوت

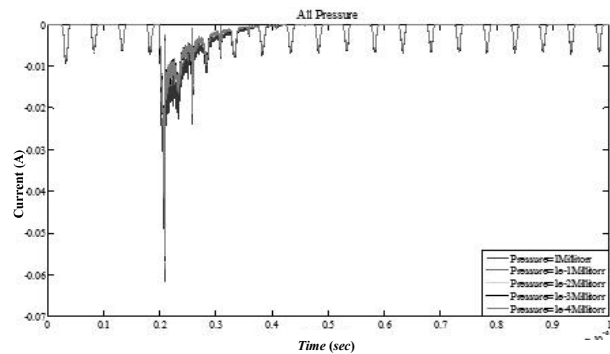
۵- نتیجه‌گیری

در شبیه‌سازی انجام شده جریان انتشار میدانی به‌ازای تغییرات مختلف فشار خلأ درون محفظه قطع کلید خلأ از دو روش به‌دست آمد. با بررسی نمودارهای مختلف مربوط به جریان های به‌دست آمده، مشخص گردید که تغییرات جریان انتشار میدانی وابسته به تغییرات جریان یونیزاسیون بوده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده، مشاهده شد که به‌ازای تغییرات مختلف فشار درصد تغییرات جریان انتشار میدانی در روش دوم بیشتر است که این نتایج به‌دلیل وابستگی زیاد جریان یونیزاسیون به تغییرات فشار می‌باشد به‌گونه‌ای که به‌ازای فشار های پایین این جریان به صفر میل می‌کند.

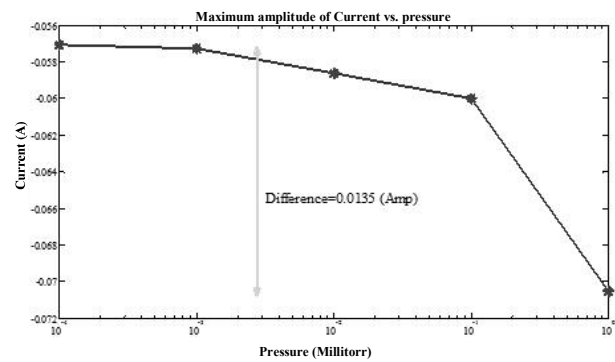
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با طراحی مدار مناسب برای اندازه‌گیری جریان انتشار میدانی حاصل از اعمال هم‌زمان فشارقوی سینوسی و ضربه می‌توان فشار داخلی محفظه قطع را تعیین نمود.

۶- مراجع

- [1] P. G. Slade, "The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application," CRC Press, 2008.
- [2] R. V. Latham, "High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis," Academic Press, 1981.
- [3] P. G. Slade and E. D. Taylor, "Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced (0.2 um-40um) electrical contacts," IEEE trans. components and packaging technologies, vol. 25, pp. 390 - 396, 2002.
- [4] R. V. Latham, "High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice," Academic Press, 1995.
- [5] G. C. Damstra, R. P. P. Smeets, and H. B. F. Poulussen, "Pressure estimation in vacuum circuit breakers," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, pp. 198-201, 1995.
- [6] F. R. Frontzek and D. Konig, "Methods for internal pressure diagnostic of vacuum circuit breakers," 18th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, 1998.
- [7] M. Koochackzadeh and V. Hinrichsen, "Diagnostics of the vacuum condition in medium voltage vacuum circuit breakers," Electrical Insulation (ISEI), pp. 728-731, 2008.
- [8] F. R. Frontzek and D. Konig, "Measurement of emission currents immediately after arc polishing of contacts Method for Internal-pressure Diagnostics of Vacuum Interrupters," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol.

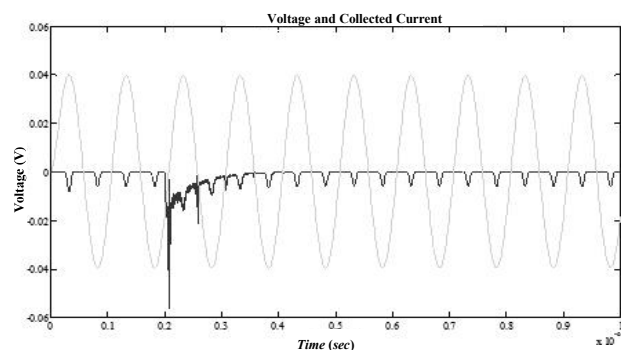


(الف)



(ب)

شکل ۸: (الف): جریان‌های مختلف به‌ازای فشارهای خلأ مختلف (ب): منحنی تغییرات حداکثر دامنه جریان انتشار میدانی به‌همراه جریان ضربه‌ای



شکل ۹: منحنی ولتاژ و تراز اعمالی و جریان انتشار میدانی بدست آمده از نرم‌افزار به‌صورت هم‌زمان

جریان انتشار میدانی به‌همراه جریان ضربه‌ای ۲۱/۸۱٪ می‌باشد. افزایش تغییرات دامنه جریان در روش دوم به‌دلیل یونیزاسیون فضای بین دو کنتاکت در زمان اعمال جریان ضربه‌ای بین فضای دو کنتاکت می‌باشد که البته میزان یونیزاسیون وابستگی زیادی به فشار خلأ موجود در محفظه قطع دارد.

- Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 87-90, 2008.
- [16] L. T. Falkingham, R. Reeves, C.H. Gill, and S. Mistry, "Studies in inverse magnetron discharges of vacuum interrupters: part2-variation in magnetic field," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 214-217, 2010.
- [17] M. Huiyong and Y. Wang, "Studies of online monitoring of the pressure in vacuum interrupters," Power Systems Conference and Exposition, pp. 1851-1855, 2006.
- [18] F. Xing-ming, D. Guang-bo, H. Zhi-Chao, L. Xu-dong, Z. Xin, and Z. Ji-yan, "A smart system for vacuum interrupts inner pressure on-line condition monitor based on Zigbee," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 142-145, 2010.
- [19] H. Mao, G. Chang, X. Zhu, and Y. Wang, "On-line monitoring of pressure in vacuum interrupters," IEEE trans. Dielectric and Electrical Insulation, vol. 14, pp. 179 -184, 2007.
- [20] Z. Ziyu, J. Xiuchen, and J. Zhijian, "Study on internal pressure measurement of vacuum interrupter," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 775-778, 2000.
- [21] M. Koochackzadeh, V. Hinrichsen, R. Smeets, and A. Lawall, "Field emission currents in vacuum breakers after capacitive switching," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, pp. 910-917, 2011.
- [22] M. Koochackzadeh, V. Hinrichsen, R. Smeets, and A. Lawall, "The impact of capacitor bank inrush current on 28, pp. 700-705, 1993.
- [9] S. V. Sydorenkov, A. S. Baturin, and E. P. Sheshin, "Field emission method of pressure dynamics registration in vacuum interrupters," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 568-571, 2002.
- [10] F. R. Frontzek, D. König, and R. Heinemeyer, "Electrical methods for verifying internal pressure of vacuum interrupters after long-time service," IEEE Trans. on Electr. Insulation, vol. 28, pp. 635-641, 1993 .
- [11] W. F. H. Merck, G. C. Damstra, and R. J. B. Gruntjes, "Estimation of vacuum condition in vacuum circuit breakers," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 506-509, 1998.
- [12] W. E. H. Merck, G. C. Damstra, C. E. Bouwmeester, R. J. B. Gruntjes, "Methods for estimation of the vacuum status in vacuum circuit breakers," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no. 4, pp. 400-404, 1999.
- [13] H. Saito, Y. Matsui, and M. Sakaki, "Discharge Properties in Low Vacuum and Vacuum Monitoring Method for Vacuum Circuit Breakers," Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp. 181-184, 2006.
- [14] M. Kamarol, S. Ohtsuka, M. Hikita, H. Saitou, and M. Sakaki, "Determination of gas pressure in vacuum interrupter based on partial discharge," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 593-599, 2007.
- [15] L. T. Falkingham, R. Reeves, C. H. Gill, and S. Mistry, "Studies in Inverse Magnetron Discharges of vacuum Interrupters-Part1-variations in electric field,"

Simulation of field emission current in order to diagnosis internal pressure of vacuum interrupters

M. Rezvani*, A. Akbari, S. M. T. Bathaee

* K. N. T. University of Technology

(Receive: 2015/06/01, Accept: 2015/08/03)

Abstract

Condition monitoring of vacuum circuit breaker is one of the important factor to determine its life time. Internal pressure of vacuum interrupter is the main parameter of vacuum circuit breaker conditioning .Rise of internal pressure exceeding a certain threshold value cause's loss of current switching capability and electric insulating properties. In recent decades many internal pressure determining methods have been researched to evaluate the influences of different parameters. Although most of them are based on experimental tests but none of them was a satisfying and reliable method to give enough information about residual vacuum pressure. Thus, the field emission current is modelled and simulated in this paper using plasma modelling by particle in cell (PIC) method in order to determine the relation of current and vacuum pressure. The simulation results demonstrate that pulsed current with field emission current used for diagnosis vacuum pressure of vacuum interrupter.

Keywords: Field emission current, Vacuum Interrupter (VI), Vacuum circuit breaker, Particle in cell (PIC), Ionization

* Corresponding Author Email: mohammad.rezvany@gmail.com