

تشخیص سائیدگی کنتاکت قوس کلید قدرت به کمک ارزیابی جریان قوس به هنگام جداسدن کنتاکت ها

نوید شفیعی^۱، پژمان پورمحمدیان^۲ و محمد خسروجردی^۳

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

1. shafiei_navid2008@yahoo.com

2. pourmohamadiyan@um.ac.ir

3. khosrojerdi.mohammad@yahoo.com

چکیده - در این مقاله به بررسی اثر میزان و شکل سائیدگی ناشی از قوس و تغییر مقاومت کنتاکت قوس به کمک نرم افزار اجزاء محدود می پردازیم. در این راستا پروفیل های محتمل سائیدگی ناشی از گرما، آسیب های مکانیکی و چگالی بالای موضعی قوس را شبیه سازی کرده و با شبیه سازی نقطه به نقطه جا به جایی کنتاکت متحرک به روی کنتاکت ثابت، تغییرات مقاومت کنتاکت ها را محاسبه می کنیم. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده این واقعیت است که در سائیدگی با شکل های مختلف مقاومت کنتاکت به چه میزان و با چه روندی افزایش خواهد یافت. این امر کمک بزرگی جهت دسترسی سریع تر و ارزان تر به وضعیت کنتاکت قوس بوده و به نوعی عمر باقیمانده کلید را نیز قابل تخمین می سازد. کلید واژه- سائیدگی و مقاومت کنتاکت، جریان قوس، کلیدهای قدرت، روش های تخمین و شناسایی

و سائیدگی کنتاکت و تشکیل لایه اکسید بر آن و اثری که روی مقاومت دینامیکی دارند انجام گرفته است [۵و۶]. این مطالعات بیشتر تجربی بوده و کمتر در آنها از روابط ریاضی و شبیه سازی کمک گرفته شده است.

به هنگام باز و بسته کردن کنتاکت های کلید به منظور قطع و وصل جریان، قوس بین آنها شکل می گیرد. دمای بالای قوس سبب می شود که کنتاکت ها ذوب شده و ماده کنتاکت از سطح آن بخار شود. علاوه بر آن، اصطکاک حرکت کنتاکت متحرک بر روی کنتاکت ثابت باعث می شود بخشی از جرم کنتاکت ها کاسته شود. به این فرآیندها سائیده شدن کنتاکت گفته می شود. سائیدگی باعث تغییر در فیزیک کنتاکت شده و می تواند عملکرد کلید را تحت تأثیر قرار دهد، مثلاً باعث افزایش زمان برقراری قوس گردد، چگالی جریان را در نقاطی افزایش دهد، باعث گرم شدن بیش از اندازه کنتاکت گردد و در صورت پیشرفت ممکن است حتی باعث انفجار محفظه قطع کلید گردد. قسمت اول این مقاله ساختار کنتاکت کلید های فشار قوی و بالاخص ساختار کنتاکت کلید ۱۳۲ کیلو ولت SF6 را مورد بررسی قرار داده است. در قسمت دوم چند الگو برای سائیدگی در نظر گرفته شده و وقایعی که هر کدام از آنها در پی خواهند داشت مطرح شده است. در قسمت آخر نیز به کمک نرم افزار اجزاء محدود برای کنتاکت سالم و پروفیل های خوردگی، حرکت

۱- مقدمه

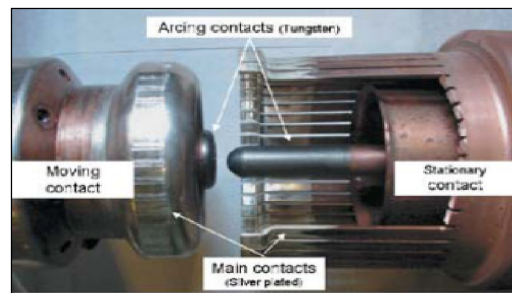
کلید قدرت ابزاری برای تغییر آرایش سیستم، محافظت خطوط انتقال و تجهیزات نصب شده در سیستم قدرت در شرایط عادی و نیز در برابر خطاهایی مانند اضافه جریان و اتصال کوتاه است. کلید قدرت تحت تنش های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی دچار خرابی می شود بنابراین نیازمند نگهداری و تعمیرات کوتاه مدت و بلند مدت می باشد. از طرفی هزینه پیاده سازی و بازدید کامل از کلید بسیار بالاست بنابراین تشخیص خطای کلید و مشخص نمودن وضعیت آن به کمک روش هایی کم هزینه تر و سریع تر مانند کمک گرفتن از کمیات قابل سنجش در این زمینه مفید خواهد بود [۱].

یکی از روش های متداول تشخیص عیب کلید قدرت نصب سنسور های صوتی و لرزشی در قسمت هایی مانند محفظه قطع و مدار کنترل کلید می باشد. در این روش سیگنال های بدست آمده را تحلیل کرده و با سیگنال های مرجع مقایسه می نمایند [۲،۳و۴]. کاربرد این نوع تشخیص برای خطاهایی است که تغییر کمتری در مسیر جابه جایی کنتاکت و زمان عملکرد ایجاد می کنند. از طرفی این روش بیشتر برای تشخیص خطا های مکانیکی بوده و ایرادات بسیار ریز کنتاکت را آشکار نمی سازد. برخی تحقیقات نیز در زمینه تغییرات نامطلوب، نظیر شکستگی

کنتاکت ها تا قبل از باز شدن را شبیه سازی کرده و در هر مرحله مقاومت کنتاکت ها را محاسبه می کنیم.

۲- ساختار کنتاکت کلید های فشار قوی

کلید های فشار قوی بسته به قدرت قطع کلید(جریان و زمان قوس) می توانند شامل یک یا دو جفت کنتاکت باشند. کنتاکت های نامی که باید بتوانند جریان نامی کلید را بدون گرم شدن اضافه از خود عبور دهند و کنتاکت های قوس که باید بتوانند جریان و گرمای قوس را بدون اینکه باعث خرابی آنها شود برای لحظاتی تحمل کنند. در کلید SF6 معمولا کنتاکت های نامی دنداندار بوده و در قسمت بالای کنتاکت قرار دارند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است کنتاکت های قوس در درون کنتاکت های ثابت و متحرک قرار داشته و حالت tulip و plug دارند که به هنگام جدا شدن قوس روی آنها شکل می گیرد.

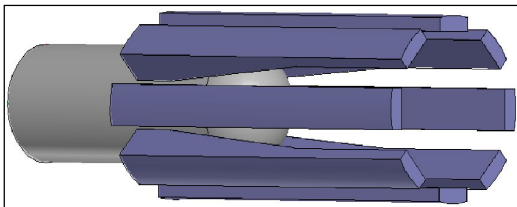


شکل ۱: کنتاکت کلید SF6 [۷]

در حالت عادی جریان از کنتاکت ثابت وارد شده و از کنتاکت های متحرک خارج می گردد. به هنگام بروز خطا و رسیدن فرمان قطع به کلید، کنتاکت های متحرک روی کنتاکت ثابت جا به جا شده و از یکدیگر فاصله می گیرند. در لحظه جدا شدن بین پنجه های کنتاکت متحرک و کنتاکت ثابت قوس برقرار می شود و سائیدگی را ایجاد یا آن را تشدید می کند.

۳- پروفیل های محتمل سائیدگی کنتاکت قوس

در این قسمت دو پروفیل محتمل از سائیدگی در کنتاکت کلید ناشی از برقراری قوس روی آن به همراه شکل آورده شده است. از آنجا که قوس ماهیتی تصادفی دارد و نمی توان مشخص کرد که در هر بار رخداد آن چگونه باعث سایش می شود، سائیدگی در این پروفیل ها متقارن فرض شده است. در هر پروفیل بصورت تجربی بیان می شود که سائیدگی چه اثری بر قوس و کارکرد کلید خواهد گذاشت. در شکل ۲ پروفیل کنتاکت سالم آورده شده است. در هر دو پروفیل فرض بر آن است که سائیدگی جرم یکسانی از کنتاکت را جدا می سازد.



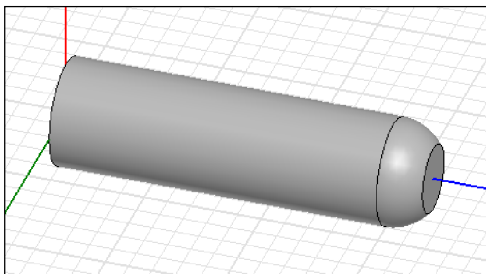
شکل ۲: کنتاکت سالم

۲-۱- ساختار کنتاکت های plug-tulip

این نوع کنتاکت مانند دیگر کنتاکت ها از دو قسمت ثابت و متحرک تشکیل شده است. قسمت متحرک از حداقل ۶ میلیه پنجه ای شکل (finger) تشکیل شده که در کنار هم حالت استوانه ای دارند و کنتاکت ثابت را در نقاطی در بر می گیرند. ساخت کنتاکت متحرک به این شکل سبب می شود که در حالت عادی چگالی جریان عبوری در نقاط مختلف کم باشد و از ذوب شدن کنتاکت در هنگام بسته بودن آن جلوگیری به عمل می آید. در شرایط خطا نیز به جای قوس با دمای بسیار بالا و چگالی جریان زیاد، قوس هایی با دمای کمتر خواهیم داشت که خاموش کردن آنها راحت تر بوده و کنتاکت کمتر دچار آسیب می گردد. کنتاکت ثابت نیز از یک استوانه و یک نیمکره در سر آن تشکیل می شود که نمونه ای از این کنتاکت ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۱- پروفیل اول سائیدگی

این نوع سائیدگی که در شکل ۳ نشان داده شده است طول کنتاکت را تحت تأثیر قرار می دهد. در این حالت فرض بر این است که قوس کشیده شده روی کنتاکت بیشتر در سر آن باعث تخییر ماده کنتاکت شده و با سایش این ناحیه طول کنتاکت کوتاه می گردد.



شکل ۳: پروفیل اول سائیدگی

در این رابطه R_F مقاومت ناشی از لایه اکسید، H سختی ماده کنتاکت، ρ مقاومت ویژه ماده و F نیروی بین کنتاکت هاست.

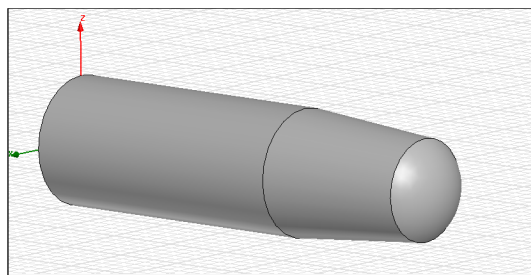
در شبیه سازی انجام گرفته از مقاومت ناشی از اکسید روی کنتاکت صرف نظر شده است چون در این حالت مقاومت تغییر نسبتاً بزرگی کرده و در طول نمودار مقاومت بر حسب جا به جایی، تقریباً در تمام نقاط خود را نشان می دهد در نتیجه اندازه گیری صحیح سائیدگی را ناممکن می سازد. همچنین نیروی وارد بر کنتاکت نیز در محاسبات وارد نشده است. نیروی ثابت وارده بین کنتاکت ها روند تغییرات مقاومت را دچار تغییرات متناقضی نمی کند. می توان انتظار داشت که در نواحی دارای سائیدگی نیروی فشار دهنده کنتاکتها کاهش یافته و در نتیجه شاهد افزایش مضاعفی در مقاومت کنتاکتها خواهیم بود. این مهم می تواند به عنوان حاشیه اطمینانی بر روش ارائه شده در این مقاله در نظر گرفته شود.

عامل دیگری که بر مقاومت کنتاکت اثر می گذارد چگالی جریان و شکل قوسی است که پس از باز شدن کنتاکت ها و در لحظات اولیه آن رخ می دهد. در لحظات ابتدایی جدا شدن کنتاکت ها دو نقطه آخرین اتصال را تشکیل می دهند. در این حالت به دلیل عبور چگالی جریان بالا از نقطه ای کوچک گرمای زیادی ایجاد شده و اتصال را ذوب می نماید. با ذوب شدن این اتصال پلی بین دو کنتاکت ایجاد می گردد و در نمودار مقاومت کنتاکت بر حسب جابه جایی، تغییر شدیدی را شاهد خواهیم بود. در شکل ۵ افت ولتاژ ناشی از ایجاد پل مذاب برای کنتاکت با درصد مختلف ترکیب نقره و تنگستن نشان داده شده است. تغییر آنی ولتاژ مربوط به تشکیل پل بوده و تغییرات بعدی مربوط به حالت قوس گازی می باشد. در شکل ۶ نیز نمونه ای از اتصال آخرین نقاط و چگالی جریان عبور یافته از آنها را می توان مشاهده نمود. در این شکل چگالی جریان در نقاط قرمز رنگ به ۱۱۰ آمپر بر میلی متر مربع رسیده و مقاومت اندازه گیری شده ۲/۵ میلی اهم می باشد.

با کوتاه شدن کنتاکت قوس زمان همپوشانی کنتاکت کم شده و با کمتر شدن این زمان در صورت رسیدگی نکردن امکان انفجار محفظه قطع وجود دارد. ضمن اینکه زمان برقراری قوس بیشتر شده و در نتیجه روند سائیدگی افزایش می یابد.

۳-۲- پروفیل سائیدگی دوم

این پروفیل که در شکل ۴ آورده شده است بیانگر شکل گیری بیشتر قوس در قسمت های دیگر کنتاکت متحرک در مقایسه با سر کنتاکت است و سائیدگی در این نواحی را نشان می دهد. در این حالت با کم شدن سطح عبور جریان به هنگام گذر از نواحی سایش یافته و نیز افزایش مقاومت اتصال بین دو کنتاکت، تلفات افزایش یافته و باعث گرم شدن موضعی کنتاکت می گردد. این گرم شدن می تواند شکل گیری قوس را سرعت بخشد و سبب شود که انرژی قوس افزایش یافته و خاموش کردن آن را سخت تر نماید.

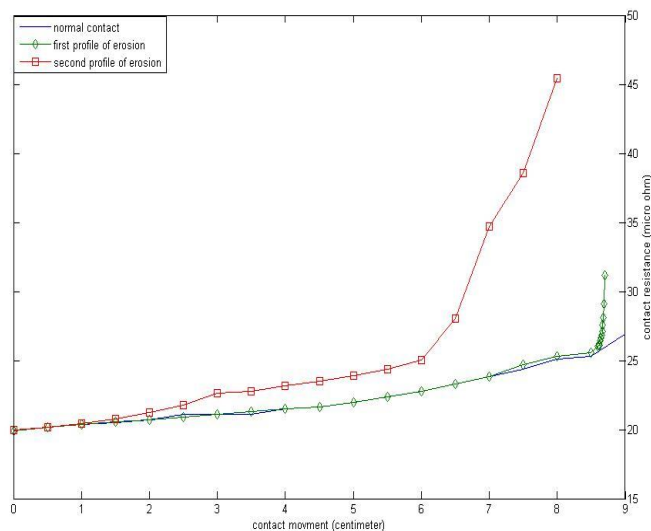


شکل ۴: پروفیل دوم سائیدگی

۴- ارتباط بین مقاومت کنتاکت و پروفیل های سائیدگی

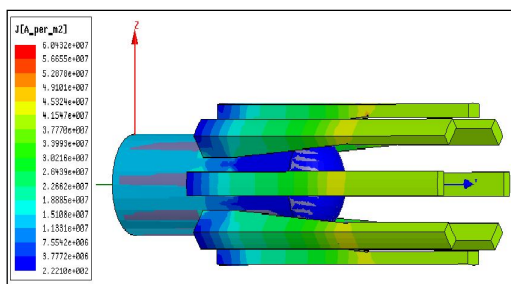
در این قسمت اثر هر پروفیل سائیدگی بر مقاومت اتصال بین کنتاکت های ثابت و متحرک قبل از باز شدن کنتاکت ها و ایجاد قوس را به کمک پیاده سازی سائیدگی در نرم افزار اجزاء محدود بررسی می کنیم. همانطور که می دانیم مقاومت کنتاکت به عواملی مانند نیروی اعمالی به دو کنتاکت، سطح اتصال مؤثر، مقاومت ویژه ماده تشکیل دهنده کنتاکت و لایه اکسید تشکیل شده روی آن بستگی دارد [۸]. با توجه به رابطه مستقیمی که بین نیروی وارده به کنتاکت و سطح اتصال مؤثر وجود دارد می توان مقاومت را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$R_T = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi k H}{F}} + R_F \quad (1)$$

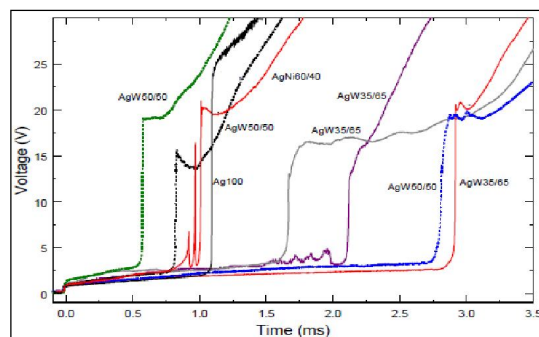


شکل ۸: تغییرات مقاومت کنتاکت های سالم و سائیده شده بر حسب جا به جایی کنتاکت متحرک

چگالی جریان عبوری از کنتاکت ها در وضعیت سائیده نشده از می تواند مشاهده کرد.



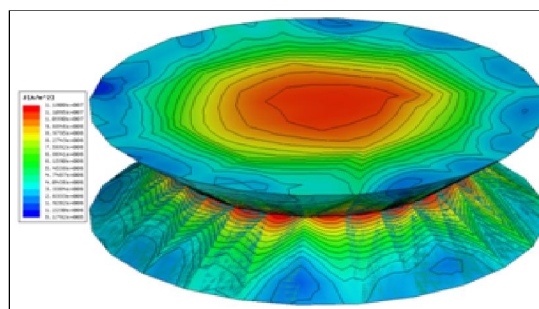
شکل ۷: چگالی جریان در کنتاکت سالم



شکل ۵: افت ولتاژ در لحظه جدایی کنتاکت ها [۹]

در ادامه پروفیل های سائیدگی را شبیه سازی کرده و در هر پروفیل، کنتاکت متحرک را حداکثر ۵ میلی متر روی کنتاکت ثابت جا به جا می نماییم. سپس با توجه به تلفات و جریان، مقاومت را محاسبه کرده ایم که نتایج این محاسبات در نمودار شکل ۸ آورده شده است.

با جا به جایی کنتاکت متحرک و جدا شدن آن از کنتاکت ثابت مقاومت اتصال بین دو کنتاکت در کل افزایش می یابد. این افزایش برای کنتاکت سالم و سائیده نشده در ۹ سانتیمتر جا به جایی حدود ۷ میکرو اهم می باشد. در حالت پروفیل اول خوردگی تغییرات مقاومت تا حدی پروفیل کنتاکت سالم را دنبال می کند و تغییرات از آنجایی شروع می شود که به سائیدگی کنتاکت ثابت می رسیم. در این مرحله مشاهده می شود که به ازای تغییر در جا به جایی حدود ۳ میلیمتر مقاومت تغییراتی حدود ۵ میکرو اهم را نشان می دهد.



شکل ۶: چگالی جریان عبوری از آخرین نقطه اتصال کنتاکت ها

اما در شبیه سازی بدون در نظر گرفتن قوس الکتریکی، طول کنتاکت ثابت ۱۶/۲ سانتیمتر، حداکثر جا به جایی کنتاکت متحرک ۹/۵ سانتیمتر، جریان اعمالی ۲۰ کیلو آمپر بوده و کنتاکت متحرک دارای ۸ پنجه می باشد. همچنین جنس هر دو کنتاکت تنگستن در نظر گرفته شده است. در شکل ۷

این نگرش می تواند در تشخیص عیوب قسمت های دیگر کلید نیز مد نظر قرار گیرد و به کمک این پارامتر نیاز به تعمیرات زمان بر و پرهزینه کلید را به طرز چشمگیری کاهش داد.

مراجع

- [1] Michael Stanek, "Model-Aided Diagnosis for High Voltage Circuit Breakers", Vienna University of technology, Austria, Dissertation, 2000.
- [2] M. Runde T. Aurud L.E. Lundgaard G.E. Ottesen K. Faugstad, "Acoustic Diagnosis of High Voltage Circuit-Breakers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1306-1314, 1992.
- [3] M. Runde G.E. Ottesen B. Skyberg M. Ohlen, "Vibration Analysis for Diagnostic Testing of Circuit-Breakers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, 1816-1823, 1996.
- [4] M. Kezunovic Z. Ren G. Latisko D.R. Sevcik J.S. Lucey W.E. Cook E.A. Koch, "Automated Monitoring and Analysis of Circuit Breaker Operation," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No 3, pp. 1910-1918, 2005.
- [5] M. Landry, A. Mercier, G. Ouellet, C. Rajotte, J. Caron, M. Roy, and F. Briki, "A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers," in *Proc. CIGRE Session*, 2004, pp. A3-112.
- [6] M. Landry O. Turcotte F. Briki, "A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breakers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, pp. 710-716, 2008.
- [7] E. Nasrallah F. Briki S. Perron, "Make/Break Contacts In Power Circuit Breakers," Article from *Electric Energy T&D Magazine*, pp. 54-60, 2007.
- [8] R. D. Garzon, "Contact theory," in *High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002, pp. 198-210.
- [9] John J. Shea, "High Current AC Break Arc Contact Erosion," IEEE Holm Conference on Electrical Contacts - Holm, 2008.

در مورد پروفیل دوم سائیدگی تغییرات مقاومت قبل از رسیدن به ناحیه سائیده شده مشابه کنتاکت سالم و پروفیل اول سائیدگی است. به محض رسیدن به ناحیه سائیده شده مقاومت تغییر محسوسی داشته و با افزایش سائیدگی تغییرات شیب و اندازه مقاومت بیشتر می گردد بطوریکه در اواخر مسیر به ازای جا به جایی ۱/۵ سانتیمتر کنتاکت متحرک مقاومت حدود ۲۰ میکرو اهم افزایش می یابد.

۵- نتیجه گیری

امروزه با توجه به جایگزینی روشهای تشخیص عیوب تجهیزات قدرت و مانیتورینگ لحظه ای آنها به جای تعمیرات و نگهداری دوره ای، تشخیص نشانه های عیب قبل از رخ دادن آن امری واجب و ضروری است. در این راستا پارامتر مقاومت کنتاکت که بسیار حساس بوده و تقریباً با هر تغییری در کلید تغییراتی را از خود نشان می دهد می تواند نقش بسزایی داشته باشد.

در این مقاله اثرات دو پروفیل سائیدگی بر تغییرات مقاومت کلید مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که می توان به کمک بررسی منحنی مقاومت کنتاکت بر حسب جا به جایی کنتاکت نوع سائیدگی، محل و میزان آن را تخمین زد. با توجه به اینکه کنتاکت کلید نقش مهمی در کارکرد کلید دارد به نوعی می توان عمر باقیمانده کلید را نیز تخمین زد.