

تعیین ریسک خطا در کنتاکت‌های کلیدهای قدرت گازی مبتنی بر تحلیل فازی رفتار مقاومت دینامیکی

محمد عبدالله^۱ علی اصغر رضی کاظمی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران - ایران

m.abdollah@email.kntu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

Razi.Kazemi@kntu.ac.ir

چکیده: کلیدهای قدرت نقش مهمی در حفاظت از سایر تجهیزات شبکه همانند ترانسفورماتورها و ژنراتورها ایفا می‌کنند و به همین دلیل، تعیین وضعیت آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از بخش‌های بسیار مهم کلید، محفظه قطع آن می‌باشد که شامل کنتاکت‌های ثابت و متحرک اصلی و آرک است. عملکرد کلیدهای قدرت تحت جریان‌های اتصال کوتاه و یا تعداد عملکرد زیاد در جریان‌های نامی، منجر به خرابی تدریجی بخش‌های داخلی محفظه قطع بر اثر ساییدگی یا حرارت زیاد ناشی از قوس تشکیل شده در محفظه قطع خواهد شد. ارزیابی این بخش از کلید به دلیل عدم دسترسی مستقیم به آنها دشوار می‌باشد. تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی، یکی از روش‌های موثر غیرمستقیم ارزیابی وضعیت کنتاکت‌های کلید قدرت می‌باشد. در این مقاله پس از انجام اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی بر روی یک کلید گازی، با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، تاثیر خوردگی‌های مختلف در کنتاکت‌ها بر روی منحنی مقاومت دینامیکی در نرم افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، با ارائه روش احتمالاتی فازی هوشمند، احتمال خرابی کنتاکت‌ها در قالب ریسک ارائه می‌شود. روش پیشنهادی، براساس نمونه واقعی اندازه گیری شده همور دارز یا بایرگرافتهونتا یجقابلقبولیاز خود نشان داده‌است.

کلمات کلیدی: کلید قدرت، مقاومت دینامیکی، تعیین وضعیت، کنتاکت اصلی و فرعی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی اصغر رضی کاظمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - سیدخندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق

الکتریکی، استقامت حرارتی مواد مورد استفاده در این کنتاکت‌ها در مقایسه با کنتاکت‌های اصلی بسیار بالا است.

در هنگام باز شدن کلید قدرت، این دو دسته کنتاکت، همزمان با یکدیگر شروع به حرکت می‌کنند ولی تا چند میلی‌ثانیه پس از باز شدن کنتاکت‌های اصلی ثابت و متحرک، کنتاکت‌های آرک متصل بوده و سپس از یکدیگر جدا می‌شوند. به همین دلیل، قوس الکتریکی بر روی کنتاکت‌های آرک متحرک و ثابت ظاهر می‌شود.

دمای قوس الکتریکی می‌تواند تا ۱۰۰۰۰ درجه کلون هم برسد [۷].

این دمای بسیار زیاد قوس، به‌مرور زمان موجب ذوب شدن کنتاکت‌ها مخصوصاً کنتاکت‌های آرک می‌شود و حتی بخشی از سطح کنتاکت آرک نیز بخار می‌گردد. از طرف دیگر، بر اثر عملکرد کلید قدرت و ساییدگی کنتاکت‌ها بر روی هم در اثر باز و بسته شدن کلید، بخشی از جرم کنتاکت کاسته می‌شود و سطح کنتاکت‌ها دچار خوردگی می‌شود. در برخی موارد حتی ممکن است اتصال کنتاکت آرک ثابت و متحرک قطع شود. تغییر در فیزیک کنتاکت‌ها، عملکرد صحیح کلید را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. مواردی چون افزایش زمان برقراری قوس، افزایش چگالی جریان در برخی نقاط کنتاکت و در پی آن گرم شدن بیش از حد مجاز کنتاکت‌ها ناشی از خوردگی سطح کنتاکت‌های آرک و کموتی شدن کامل جریان قوس بر روی کنتاکت آرک می‌تواند موجب کاهش قابلیت اطمینان کلید قدرت شود و در بدترین حالت، ممکن است باعث انفجار محافظه قطع کلید شود.

یکی از راهکارهای ارزیابی وضعیت محافظه قطع، باز نمودن آن و بازدید چشمی از وضعیت کنتاکت‌ها می‌باشد. اما در این روش، به‌علت حضور گاز SF_6 پرفشار در داخل این محافظه و احتمال برهم خوردن تنظیم فشار گاز پس از باز شدن، نیاز به صرف زمان و هزینه بالایی دارد. از دیگر روش‌های تعیین وضعیت کنتاکت‌های کلیدهای قدرت، تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی و استاتیکی می‌باشد.

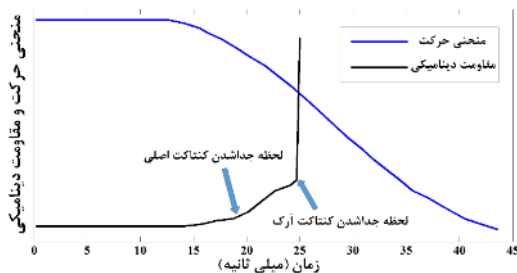
این موضوع با طرق متفاوت در مراجع متفاوت مورد بحث قرار گرفته است که خود نشان دهنده اهمیت موضوع است. در مرجع [۸] یک تجهیز مناسب و بروز برای انجام تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی معرفی شده است. در این مرجع، به جای استفاده از باتری برای تولید جریان DC، از خازن و شارژر جریان ثابت استفاده شده است. در مرجع [۹] به منظور انجام اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی برای کلیدهای مختلف گازی SF_6 ، یک روش جامع و دقیقی برای کلیدهای مختلف گازی SF_6 و تحت جریان‌های مختلف ارائه شده است. همچنین در مراجع [۱۰ و ۱۱] نویسندگان تأثیر برخی خوردگی‌ها و ایرادات مکانیکی کلید را در منحنی مقاومت دینامیکی گزارش کرده‌اند. در مرجع [۱۲]، تأثیر چند ایراد مکانیکی و وضعیت بد کنتاکت کلید را در چند مورد از اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی و منحنی بدست آمده از آن نشان داده است. در مرجع [۱۳]، از مقاومت دینامیکی جهت تعیین انواع خطاها با استفاده از الگوریتم فازی استفاده شده است.

کلیدهای قدرت فشارقوی، از تجهیزات بحرانی شبکه قدرت محسوب می‌شوند که وظیفه اصلی آن‌ها، جدا کردن قسمت آسیب‌دیده شبکه قدرت از سایر قسمت‌ها در هنگام بروز خطا می‌باشد. بدین ترتیب، کلیدها مانع از آن می‌شوند که خطا و خاموشی در شبکه گسترش یابد و سایر قسمت‌های شبکه نیز دچار آسیب شود. به بیانی می‌توان عنوان کرد که کلید قدرت یک تجهیز الکترومکانیکی می‌باشد که وظیفه مهم حفاظت از شبکه قدرت و افزایش قابلیت اطمینان آن را در پی عملکرد رله‌ها بر عهده دارد. با توجه به نقش بسیار مهم کلیدهای قدرت، این تجهیزات بایستی در مواقع لزوم، به‌سرعت و به‌طور صحیح عمل کنند [۳-۱]. پایداری سیستم قدرت، رضایت مشترکین شبکه از عرضه انرژی الکتریکی، کیفیت و پایداری انتقال انرژی بستگی به نوع عملکرد کلید دارد. بدین ترتیب، قابلیت اطمینان کلیدهای قدرت موضوع بسیار مهمی می‌باشد و بایستی مورد توجه قرار بگیرد تا تعداد خطاهای کلید و خاموشی‌های بی‌مورد کاهش یابد. هرچقدر تعداد دفعات بازدید از کلید قدرت و تعمیرات آن با برنامه‌ریزی بهتری صورت پذیرد، طول عمر و قابلیت اطمینان کلید قدرت افزایش می‌یابد و موجب کاهش هزینه تعمیرات و جایگزینی آن می‌شود [۴-۶].

به‌طور کلی اجزای تشکیل‌دهنده یک کلید قدرت به سه بخش اصلی مکانیزم عملکرد، محافظه قطع و قسمت‌های کنترلی تقسیم می‌شوند. محافظه قطع تحت ولتاژ فشارقوی می‌باشد. در هنگام عملکرد کلید قدرتی به منظور قطع جریان و در پی آن، بروز پدیده قوس، خاموش کردن قوس در داخل محافظه قطع کلید قدرت که بخش نازل و کنتاکت‌ها در داخل آن قرار گرفته‌اند و توسط ماده خاموش‌کننده (عمدتاً گاز SF_6) انجام می‌گیرد. عبور جریان در یک کلید قدرت گازی SF_6 از طریق دو دسته کنتاکت موازی انجام می‌گیرد. در واقع سیستم هدایت جریان کلید قدرت، از دو دسته کنتاکت تشکیل شده است:

۱. کنتاکت‌های اولیه، یا در واقع همان کنتاکت‌های اصلی می‌باشند که در زمان بسته‌بودن کلید قدرت در حالت عادی، وظیفه هدایت جریان را بر عهده دارند. این کنتاکت‌ها، مقاومت بسیار ناچیزی دارند و سطح آن‌ها نیز توسط نقره پوشیده شده است. طراحی این کنتاکت‌ها به‌گونه‌ای است که در هنگام هدایت جریان نامی بار، دمای آن‌ها خیلی افزایش پیدا نمی‌کند و یک محدوده مجاز دارد.
۲. کنتاکت‌های ثانویه، که کنتاکت‌های آرک نیز نامیده می‌شوند به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در هنگام قطع جریان به هر دلیلی، قوس الکتریکی ایجاد شده بر روی این کنتاکت‌ها ظاهر می‌شود. این کنتاکت‌ها از جنس تنگستن-مس می‌باشند. به دلیل حرارت بالای ناشی از ایجاد قوس

دیگر، به علت مبهم بودن موج مقاومت دینامیکی بدست آمده، خیلی مورد استفاده قرار نگرفته است. در این تست، همانند تست اندازه‌گیری مقاومت استاتیکی، به دو سر کنتاکت‌ها، یک منبع جریان DC متصل می‌شود. در حالی که جریان از کنتاکت‌های کلید عبور می‌کند، کلید شروع به باز شدن می‌کند و به‌صورت همزمان ولتاژ دو سر کنتاکت‌ها نیز توسط اسیلوسکوپ نشان داده‌شده، اندازه‌گیری می‌شود. از تقسیم لحظه‌ای افت ولتاژ اندازه‌گیری شده بر مقدار جریان اعمال شده، مقاومت لحظه‌ای کنتاکت‌های کلید همانند شکل ۲ بدست می‌آید. همان‌طور که گفته شد، در برخی حالات خوردگی، براحتی و از روی منحنی بدست آمده از تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی، نمی‌توان حالت خوردگی را متوجه شد.



شکل (۲): یک نمونه مقاومت دینامیکی اندازه‌گیری شده با جریان ۲۰۰ آمپر [۱۴]

۳- ارائه نتایج شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مقاومت کنتاکت‌ها تحت عبور رایج متفاوت

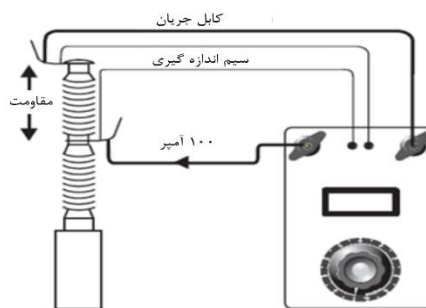
با شبیه‌سازی دینامیکی محفظه کلید قدرت مبتنی بر روش اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزار COMSOL، اثر انواع خطاهای متفاوت در محفظه قطع کلید بر مشخصه مقاومت دینامیکی مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی در حالت مرجع با نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی راستی آزمایی شده است. پس از بررسی صحت مدل معرفی شده، انواع مختلف خوردگی بر روی کنتاکت‌های اصلی و آرک کلید نمونه ایجاد شده است و تأثیر هر کدام از این خوردگی‌ها بر روی ویژگی‌های منحنی مقاومت دینامیکی، بررسی شده است و تغییرات منحنی در هر حالت نسبت به کلید سالم مشخص شده است. در پایان، با تعریف مشخصه‌های مناسب و تحلیل پرفایل‌های مقاومت دینامیکی در خرابی‌های متفاوت، الگوریتمی جهت تعیین نوع خرابی کلید قدرت ارائه شده است.

برای انجام تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی، یک کلید ۲۴ کیلوولت گازی SF₆ مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ ساختار محفظه قطع کلید قدرت گازی SF₆ ۲۴ کیلوولتی را به همراه کنتاکت‌های اصلی و آرک نشان می‌دهد.

در تمام این مراجع، تمرکز اصلی بر چگونگی انجام اندازه‌گیری بوده است. با توجه به هوشمندسازی شبکه‌های برق تمایل بر استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در سطوح متفاوت همانند پایش تجهیزات قدرت بیش از پیش شده است. در صورتی که هیچ یک از تلاش‌های ذکر شده در بالا نتایج تحقیقات خود را در قالب یک الگوریتم معین عیب‌یابی ارائه ننموده‌اند. دلیل اصلی این امر می‌تواند این باشد که ارائه الگوریتم‌های هوشمند عموماً نیازمند مجموعه داده‌های زیاد است و از آنجایی که دسترسی و اعمال خرابی به محفظه قطع کلید دشوار است ایجاد چنین فضای داده‌ای به سختی امکان‌پذیر است. در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از نتایج شبیه‌سازی انواع خوردگی ممکن در کنتاکت‌های کلید قدرت توسط نرم‌افزار COMSOL، با استفاده از روش‌های زمانی، راهکاری برای بررسی منحنی‌های بدست آمده از تست و استخراج ویژگی‌های خاص هر منحنی بیان گردد. سپس، مبتنی بر نتایج بدست آمده ریسک خطا در کنتاکت‌های کلید قدرت بر اساس ویژگی‌های بدست آمده در قالب الگوریتم هوشمند احتمالاتی-فازی مورد بحث و بررسی قرار گیرد. در پایان این مقاله نیز سیستم عیب‌یابی پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- اندازه‌گیری مقاومت استاتیکی و دینامیکی

پیشنهاد تولیدکنندگان کلید قدرت برای ارزیابی وضعیت کنتاکت‌های آن، اندازه‌گیری مقاومت استاتیکی پس از یک تعداد عملکرد مشخص و یا پس از گذشت زمان مشخصی از لحظه حضور کلید قدرت در شبکه است. در این روش، فقط می‌توان در مورد وضعیت کنتاکت‌های اصلی کلید بحث نمود. در این روش، در حالتی که کلید کاملاً در وضعیت بسته قرار گرفته است، یک جریان DC به دو سر کنتاکت‌ها مطابق شکل ۱ اعمال می‌شود. مقدار این جریان در استاندارد IEC، ۵۰ آمپر و در استاندارد ANSI، ۱۰۰ آمپر می‌باشد. بر اثر عبور جریان، یک افت پتانسیل در دو سر کنتاکت‌ها ایجاد می‌شود که از تقسیم این مقدار ولتاژ بر مقدار جریان DC اعمال شده، مقدار مقاومت استاتیکی یا همان مقاومت کنتاکت‌های اصلی بدست می‌آید.



شکل (۱): مدار آزمایش مقاومت استاتیکی و دینامیکی

چندین سال است که اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی برای ارزیابی وضعیت کنتاکت‌های آرک معرفی شده است. حسن این روش آنست که نیازی به باز نمودن محفظه قطع کلید قدرتمی‌باشد. ولی از طرف

همچنین روابط اصلی الکترومغناطیسی حاکم بر کلید قدرت نیز بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۶]:

$$J = \sigma E + J_e \quad (3)$$

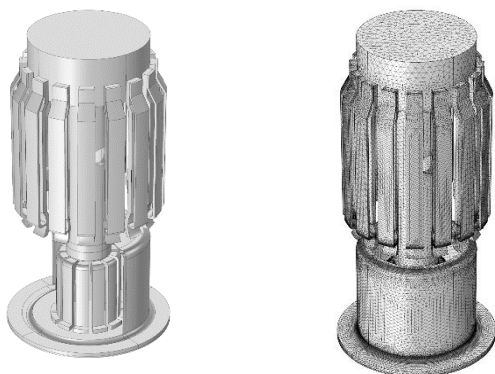
$$E = -\nabla V \quad (4)$$

در روابط فوق، σ هدایت الکتریکی (واحد S/m)، J_e چگالی جریان اعمال شده (واحد A/m²) و V ولتاژ (واحد V)، E میدان الکتریکی (V/m) می باشد.

سایر معادلات الکترومغناطیسی و معادلات انتقال حرارت و همچنین معادلات اتصال الکتریکی و حرارتی میان مجموعه کنتاکت های ثابت و کنتاکت های متحرک و عبور جریان الکتریکی از آن ها نیز در شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

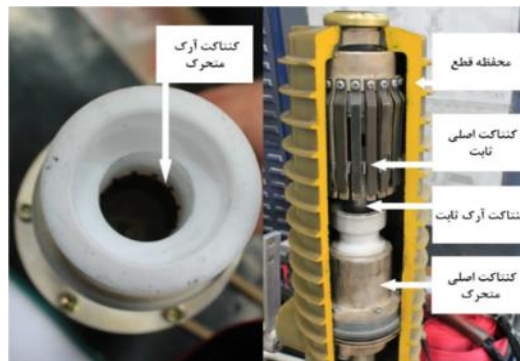
مشخصات اجزاء داخل محفظه کلید جهت انجام مطالعات مورد نیاز می باشد که نازل، محفظه و کنتاکت ها مهم ترین بخش های آن هستند. مشخصات دقیق هندسی کلید، از طریق باز کردن محفظه و اندازه گیری دقیق قطعات آن و یا از نقشه های مربوطه به دست آمده است. اجزاء کلید قدرت با توجه به مسائل حرارتی و مخصوصاً قوس الکتریکی از مواد متفاوتی تشکیل شده اند که با توجه به جنس مواد آن ها، خصوصیات مواد در نرم افزار وارد شد.

شماتیکی کلید قدرت در اندازه گیری مقاومت دینامیکی کلید قدرت سالم در شکل ۵ نشان داده شده است.



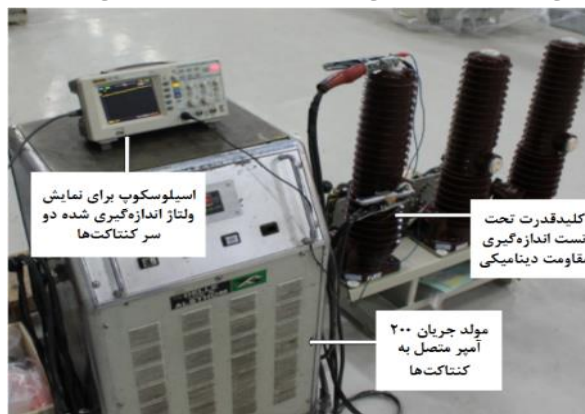
شکل (۵): شبیه سازی کلید قدرت سالم در نرم افزار کامسول

منحنی مقاومت دینامیکی حاصل از انجام شبیه سازی بر روی کلید قدرت سالم مورد مطالعه در جریان ۲۰۰ آمپر با منحنی مقاومت دینامیکی حاصل از اندازه گیری واقعی بر حسب مقدار حرکت در شکل ۶ نشان داده شده اند.



شکل (۳): ساختار داخلی محفظه قطع کلید ۲۴ کیلو ولت گازی SF₆ مورد مطالعه

شکل ۴ روش انجام تست اندازه گیری مقاومت دینامیکی را بر روی کلید مورد مطالعه نشان می دهد. برای تغذیه جریان از یک منبع جریان ۲۰۰ آمپری استفاده شده است. برای اندازه گیری افت پتانسیل دو سر کنتاکت ها نیز از یک اسیلوسکوپ با نرخ نمونه برداری ۲ GS/s استفاده شده است. به منظور بدست آوردن نتایج بهتر و دقیق تر، کلید قدرت بدون هیچگونه تغییرات در ساختار و در حضور گاز SF₆ و تنها با سرعتی کمتر از سرعت نامی خود (۱ متر بر ثانیه)، عمل می کند.



شکل (۴): انجام تست اندازه گیری مقاومت دینامیکی

معادلات اصلی لازم جهت حل مسئله در شبیه سازی انجام گرفته در نرم افزار کامسول شامل موارد زیر می باشد [۱۵]:

$$R_C = \frac{\rho \times \sqrt{\pi \times H_k}}{2 \times \sqrt{F_T}} \quad (1)$$

در این رابطه، ρ مقاومت ویژه ($\Omega \cdot m$)، H_k سختی کنتاکت، F_T مجموع نیروهای وارد بر کنتاکت (N) می باشد.

معادله مکانیکی حاکم بر ساختار کلید قدرت در حین عملکرد آن بصورت رابطه ۲ (قانون دوم نیوتن) می باشد [۱۶].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot FS + F_V \quad (2)$$

در این رابطه، F_V نیروی جرم در واحد حجم تغییر شکل یافته (N) و ρ چگالی جرم (kg/m^3) است. S تانسور تنش مرتبه دوم پیولا-کیرشهف و F گرادیان تغییر شکل است. u نیز جابه جایی مکانیکی (m) می باشد.

مطابق شکل ۷، بر اثر کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت، به دليل آنکه تغييری در کنتاكت‌های اصلی رخ نداده است، مکان کموتاسیون تغييری نمی‌کند. به دليل کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت، مکان قطع کنتاكت آرک (جایی که کنتاكت آرک کاملا باز می‌شود و جریان قطع می‌شود) کاهش می‌یابد. مقدار متوسط مقاومت کنتاكت آرک، کمی افزایش یافته است. سطح زیر نمودار در بخش اتصال کنتاكت آرک، کاهش می‌یابد زیرا ارتفاع کنتاكت آرک و در نتیجه بهای که کنتاكت آرک اتصال دارد، کاهش یافته است و در نتیجه مشخصه A_a نیز کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت اولیه کنتاكت آرک تغييری نکرده است.

بدین ترتیب، سایر خرابی‌ها به صورت قطع شدن اتصال کنتاكت‌های آرک، ساییدگی و خوردگی کنتاكت‌های آرک متحرک، ساییدگی و خوردگی کنتاكت‌های اصلی و ترکیب این خوردگی‌ها با یکدیگر شبیه‌سازی شده و منحنی مقاومت دینامیکی و مشخصه‌های این منحنی برای هر یک از حالات بیان شده نسبت به کلید سالم مقایسه شده است.

در یک مقایسه کلی می‌توان پارامترهای بدست آمده از انواع خوردگی‌های در نظر گرفته شده را مطابق جدول ۲ نشان داد.

جدول (۲): ویژگی‌های منحنی مقاومت دینامیکی کلید با خوردگی‌های متفاوت

شماره	نوع خرابی عمدی و وضعیت کنتاكت‌ها	A_a (mm* $\mu\Omega$)	P_a (mm)	P_c (mm)	R_{max} ($\mu\Omega$)
۱	سالم	۲۷۵/۱	۲۷/۶	۱۱/۱	۹۷۰/۸
۲	۵ میلی‌متر خوردگی کنتاكت آرک ثابت	۱۹۰	۲۲/۶	۱۱/۱	۱۰۶۰
۳	قطع ۲ انگشتی کنتاكت آرک متحرک	۳۲۶	۲۷/۵	۱۱/۱	۱۱۳۰
۴	۱ میلی‌متر خوردگی کنتاكت آرک متحرک	۳۰۴	۲۷/۵	۱۱/۱	۱۱۷۰
۵	۱.۵ میلی‌متر خوردگی کنتاكت اصلی	۳۰۵	۲۷/۵	۸/۳	۹۷۰/۸
۶	۱ میلی‌متر خوردگی همزمان کنتاكت آرک و اصلی	۳۰۸	۲۷/۵	۱۰/۳	۱۱۷۰
۷	۵ میلی‌متر کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت و ۱ میلی‌متر خوردگی کنتاكت آرک متحرک	۲۲۱	۲۲/۶	۱۱/۱	۱۹۱۰
۸	۵ میلی‌متر کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت و ۱ میلی‌متر خوردگی کنتاكت آرک متحرک و ۱.۵ میلی‌متر خوردگی کنتاكت اصلی	۲۳۰	۲۲/۶	۸/۳۴	۱۹۱۰
۹	۵ میلی‌متر کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت و قطع ۱ انگشتی کنتاكت آرک متحرک	۲۰۶	۲۲/۶	۱۱/۱	۱۱۶۰

۴- سیستم احتمالاتی فازی

تعیین وضعیت کلیدهای قدرت در سیستم‌های مبتنی بر اطلاعات پایش وضعیت یک تصمیم‌سازی قطعی نمی‌باشد. بدین منظور، جهت بررسی وضعیت کنتاكت‌های کلید قدرت از روی شکل منحنی مقاومت



شکل (۶): نتیجه اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی برای کلید ۲۴ کیلو ولت گازی SF₆ در حالت واقعی و شبیه‌سازی

همچنین در جدول ۱ پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی و انجام اندازه‌گیری واقعی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور تحلیل دقیق‌تر تغییرات رفتار مقاومت دینامیکی در برابر انواع خطاها، مشخصه‌های زیر مطابق منحنی شکل ۴ در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

R_{max} : مقدار ماکزیمم مقاومت اندازه‌گیری شده در تمام منحنی ($\mu\Omega$)

P_c : مکان باز شدن کنتاكت اصلی (mm)

P_a : مکان باز شدن کنتاكت آرک (mm)

A_a : سطح زیر منحنی مقاومت دینامیکی در ناحیه کنتاكت آرک نسبت به مکان حرکت ($mm * \mu\Omega$)

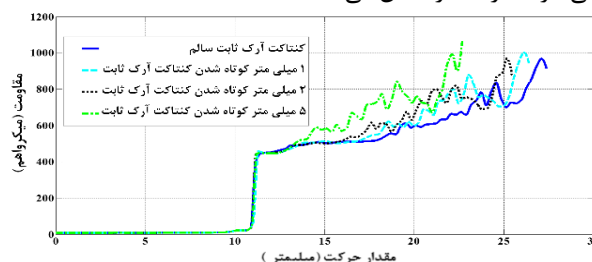
همانطور که از شکل ۶ و جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت، نتایج حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تقریباً به یکدیگر نزدیک هستند.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های بدست آمده از منحنی مقاومت

دینامیکی در دو حالت اندازه‌گیری واقعی و شبیه‌سازی

R_{max} ($\mu\Omega$)	P_c (mm)	P_a (mm)	A_a (mm* $\mu\Omega$)	
۱۰۰۰	۱۱/۱	۲۷/۶	۲۶۴/۹	اندازه‌گیری
۹۷۰/۸	۱۱/۱	۲۷/۶	۲۷۵/۱	شبیه‌سازی

پس از تایید صحت شبیه‌سازی انجام شده، خرابی‌های مختلف به صورت خرابی در کنتاكت آرک ثابت، خرابی در کنتاكت اصلی، خرابی در کنتاكت آرک متحرک کلید قدرت شبیه‌سازی شده و منحنی مقاومت دینامیکی مربوطه با منحنی مقاومت دینامیکی کلید سالم مقایسه شده است. این کار باعث می‌شود تا بتوان تأثیر خرابی‌های مختلف را بر روی منحنی مقاومت دینامیکی کلید بررسی نمود. به عنوان مثال شکل ۷، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه حالت کوتاه شدن کنتاكت آرک ثابت به مقدار یک میلی‌متر (۰/۸ درصد)، دو میلی‌متر (۱/۶ درصد) و پنج میلی‌متر (۴ درصد) را نشان می‌دهد.



شکل (۷): منحنی مقاومت دینامیکی برای کلید با کنتاكت آرک ثابت کوتاه شده نسبت به کلید سالم

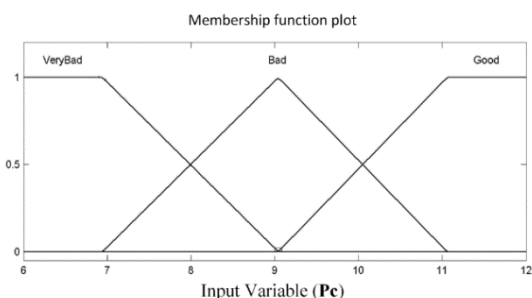
کاملاً خراب بوده و بایستی کلید حتماً از مدار خارج شده و کلید سالم در مدار قرار بگیرد.

به منظور اعمال الگوریتم پیشنهادی، در ابتدا باید شناخت صحیحی از وضعیت کلید تحت مطالعه داشت، یعنی بایستی محدوده‌ی تغییرات هریک از ویژگی‌های زمانی بیان شده فوق در وضعیت‌های سالم، هشدار و خطر مشخص گردد.

با استفاده از نتایج به دست آمده از منحنی مقاومت دینامیکی کلید با خوردگی‌های متفاوت در بخش قبل، می‌توان حدود تغییرات هریک از ویژگی‌های مورد نظر در وضعیت‌های هشدار و خطر را به دست آورد. بدین ترتیب با ترکیب تمام موارد فوق، می‌توان بر روی یک نمودار، وضعیت کلید را تعیین نمود که در کدام یک از حالات عادی، هشدار و خطر می‌باشد.

ورودی سیستم فازیو توابع عضویت هر یک به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک (P_c): مکانی که پس از شروع به باز شدن کلید قدرت، جریان از روی کنتاکت اصلی به روی کنتاکت آرک منتقل می‌شود، در سه حالت خیلی بد (یعنی کمتر از ۷ میلی‌متر پس از حرکت)، بد (بین ۷ تا ۱۱ میلی‌متر پس از حرکت) و خوب (۱۱ میلی‌متر پس از حرکت) به صورت شکل ۹ در نظر گرفته شده است.



شکل (۹): تابع عضویت مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک

۲- مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت آرک (R_{max}): با توجه به اینکه در لحظه قطع کلید و جد شدن کنتاکت آرک یک پرش ناگهانی تا مقدار بسیار زیاد مقاومت کنتاکت آرک را داریم. در اینجا دو بخش در نظر گرفته شده است: خرابی کنتاکت آرک (مقدار مقاومت بیش از ۱۰۵۰ میکرواهم) و سالم (مقدار مقاومت کمتر از ۱۰۰۰ میکرواهم). در شکل ۱۰، منحنی در نظر گرفته شده، نشان داده شده است.

دینامیکی، از روش احتمالاتی-فازی در محاسبه احتمال خرابی کنتاکت‌ها استفاده شده است. در واقع، با توجه به اینکه پس از انجام تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی و بدست آوردن مشخصه‌های بیان شده در بالا، در بیشتر موارد نمی‌توان به طور کاملاً مطمئن اذعان داشت که کلید در وضعیت خیلی بد قرار گرفته یا کلید در وضعیت سالم قرار گرفته است و به عبارتی تشخیص درصد ریسک عملکرد کلید یک امر نسبی می‌باشد، در این قسمت با استفاده از استنتاج فازی که یک روش احتمالاتی می‌باشد، احتمال سالم بودن یا خراب بودن کلید و میزان ریسک عملکرد آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

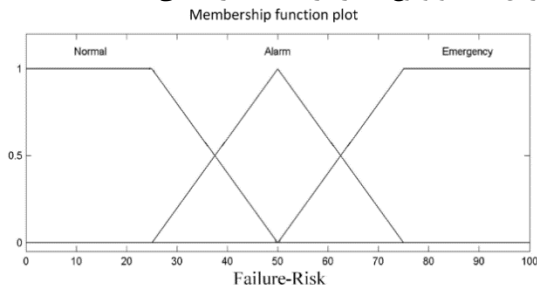
از شکل منحنی‌های به دست آمده در شبیه‌سازی تست اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی انواع خوردگی کنتاکت‌ها، ویژگی‌های زمانی آن‌ها یعنی مساحت زیر نمودار (A_a)، زمان قطع منحنی (P_a)، مقدار ماکزیمم دامنه مقاومت (R_{max}) و زمان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک (P_c)، به عنوان ورودی مسئله تعریف شده‌اند. سپس به ارزیابی شدت خطا در قالب تعریف ریسک خطا با استفاده از ترکیب این ویژگی‌ها پرداخته شده است. الگوریتم کلی روش فازی همانند شکل ۸ می‌باشد.



شکل (۸): الگوریتم روش فازی بکار رفته

در الگوریتم پیشنهاد شده در شکل ۸، سه وضعیت برای کنتاکت‌های کلید مورد مطالعه، در نظر گرفته شده است: سالم، هشدار و خطر. منظور از وضعیت سالم این است که کنتاکت‌ها در شرایط خوبی هستند و نیازی به بررسی دقیق‌تر کنتاکت‌های کلید و باز کردن محفظه قطع نمی‌باشد. در وضعیت هشدار، بهتر است کلید به صورت دقیق مورد بررسی قرار بگیرد و پس از ارزیابی شکل منحنی مقاومت دینامیکی و تشخیص نوع خوردگی، در صورت نیاز، محفظه قطع باز شده و کنتاکت‌ها تعویض شوند. در وضعیت خطر، کنتاکت‌های کلید

به صورت احتمالاتی تخمین زد. در اینجا سه وضعیت جهت توصیف کلید مبتنی بر این مشخصه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱۳، بدین ترتیب که، ریسک خطای عملکرد کلید شامل سه حالت خوب (یک عملکرد خوب در زمان عملکرد)، بد (وجود احتمال خطا در زمان عملکرد و ریسک عملکرد) و خیلی بد (یک عملکرد خیلی بد و احتمال قطع نکردن کلید و وقوع خطر در شبکه قدرت) می باشد.



شکل (۱۳): ریسک خطا در عملکرد صحیح کلید قدرت

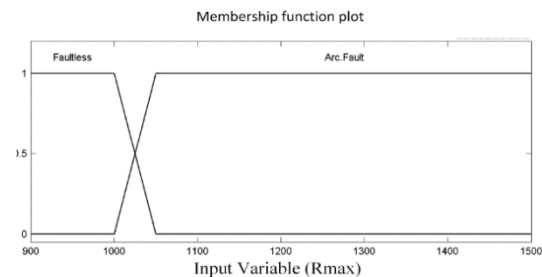
قوانینی حاکم جهت ارزیابی وضعیت کنتاکت های کلید قدرت در این الگوریتم استفاده شده است به این صورت است که:

- اگر مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک یا مساحت زیر منحنی در ناحیه آرک یا مکان قطع در وضعیت خیلی بد بود، ریسک خطا در وضعیت اضطرار می باشد.
- اگر مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک در وضعیت بد باشد، ریسک خطا در وضعیت هشدار است.
- اگر مساحت در وضعیت بد باشد، ریسک خطا در وضعیت هشدار است.
- اگر مکان قطع در وضعیت بد باشد، ریسک خطا در وضعیت هشدار است.
- اگر مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک و مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت آرک و مساحت زیر منحنی ناحیه آرک و مکان قطع در وضعیت خوب باشند، وضعیت ریسک خطا در وضعیت عادی می باشد.
- اگر مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک و مساحت زیر منحنی ناحیه آرک و مکان قطع در وضعیت خوب باشند، ولی مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت آرک در وضعیت بد باشد، وضعیت ریسک خطا در وضعیت هشدار می باشد.

شروط بالا تمام حالات ممکن که در وضعیت ریسک خطا

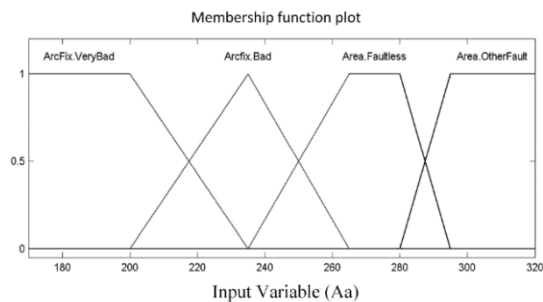
تأثیر می گذارند، در برمی گیرند.

در شکل های ۱۴ تا ۱۷، درصد ریسک خطای عملکرد کلید را برحسب محدوده ویژگی های به دست آمده از منحنی مقاومت دینامیکی، به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



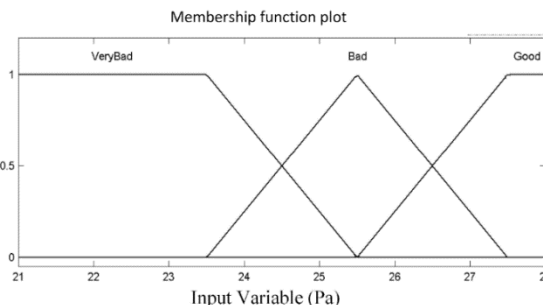
شکل (۱۰): تابع عضویت مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت آرک

۳- مساحت زیر منحنی در قسمت مربوط به کنتاکت آرک (A_a): مساحت زیر منحنی معیار بسیار خوبی برای تشخیص خرابی کنتاکت آرک مخصوصاً کوتاه شدن کنتاکت آرک می باشد. در اینجا مساحت زیر منحنی به ۴ بخش به صورت شکل ۱۱ تقسیم شده است. در صورتی که مقدار مساحت ناحیه زیر کنتاکت آرک بین ۲۶۰ تا ۲۸۰ میکرواهم در میلی متر باشد، می توان کلید را در وضعیت خوب قرار داد.



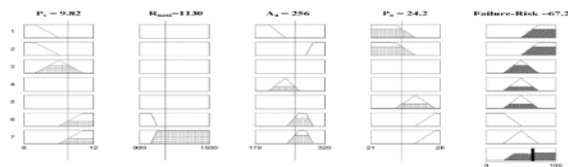
شکل (۱۱): تابع عضویت مساحت زیر منحنی مقاومت دینامیکی در بخش کنتاکت آرک

۴- مکان قطع کنتاکت آرک (P_a): مکان قطع کنتاکت شدیداً به وضعیت کنتاکت آرک بستگی دارد. در اینجا سه حالت برای مکان قطع کنتاکت آرک به صورت شکل ۱۲ در نظر گرفته شده است. وضعیت خیلی بد برای قطع در کمتر از ۲۳/۵ میلی متر پس از حرکت و وضعیت خوب برای قطع در ۲۷/۵ میلی متر پس از حرکت تعریف می شود.



شکل (۱۲): تابع عضویت زمان قطع کنتاکت آرک

شایان ذکر است که تمام اعداد بالا قطعی نیست و مطابق با واقعیت به صورت فازی این محدوده ها تعریف شده است. با توجه به ورودی های فوق، می توان وضعیت کلید و ریسک خطای کلید را



شکل (۱۸): درصد ریسک خطا بر حسب تغییر توابع عضویت ورودی

۵- ارزیابی الگوریتم در یک نمونه عملی

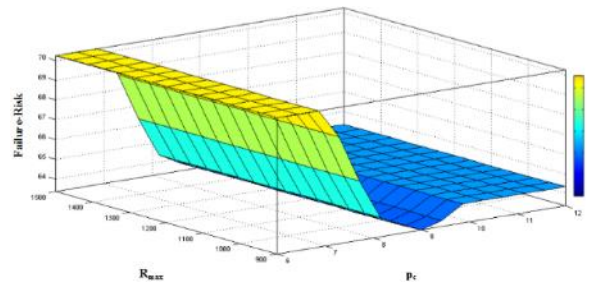
به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم، یک نمونه اندازه گیری شده برای کلید مطابق شکل ۱۸ به دست آمده است. جدول ۳ نشان دهنده اطلاعات شکل ۱۸ می باشد. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در صورتی که مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک $9/82$ میلی متر باشد (یعنی در وضعیت بد)، مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت آرک 1130 میکرو اهم باشد (یعنی در وضعیت کنتاکت آرک معیوب)، مساحت زیر منحنی مقاومت دینامیکی در ناحیه کنتاکت آرک 256 میلی متر در میکرو اهم باشد (یعنی در وضعیت کوتاه شدن کنتاکت آرک بد) و مکان قطع کنتاکت آرک $24/2$ میلی متر باشد (در وضعیت بد)، ریسک خطای کلید $67/2$ درصد بوده و ماندن کلید در خط، خیلی ایمن نبوده و نزدیک به محدوده اضطراری می باشد.

جدول (۳): مثالی از تشخیص ریسک خطای کلید قدرت

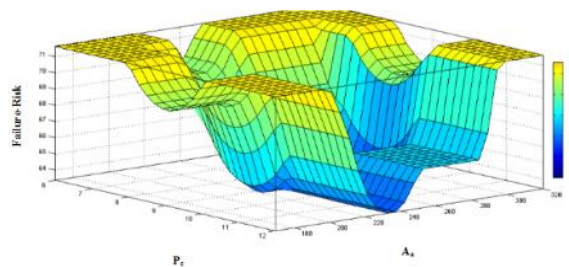
P_c (mm)	R_{max} ($\mu\Omega$)	A_a ($mm * \mu\Omega$)	P_a (mm)	
9.82	1130	256	24.2	ورودی سیستم فازی
				ریسک خطای کلید بر اساس سیستم فازی
				67.2%

۶- نتیجه گیری

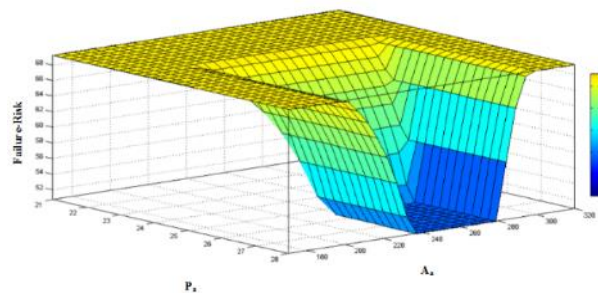
تست مقاومت دینامیکی یکی از راه های غیرمستقیم تعیین وضعیت کنتاکت های کلید قدرت مخصوصاً کنتاکت های آرک می باشد. این روش تست، روش نوینی در این زمینه نمی باشد اما تحلیل و تفسیر منحنی بدست آمده از این روش همچنان پیچیده است و تاکنون الگوریتم جامعی جهت ارزیابی هوشمند وضعیت کنتاکت ها ارائه نشده است. دلیل این امر سختی ایجاد پایگاه داده جامع مبتنی بر اندازه گیری تحت خطاهای گوناگون به دلیل عدم دسترسی مستقیم به کنتاکت های احاطه شده در گاز پرفشار است. در این مقاله، کلید قدرت در شرایط اندازه گیری مقاومت دینامیکی، شبیه سازی شده است و به دنبال آن تأثیر انواع خوردگی های متداول بر منحنی مقاومت دینامیکی ارائه شده است. سپس به منظور تشخیص درصد ریسک خطای عملکرد کلید قدرت، از سیستم احتمالاتی فازی استفاده شده است. بر اساس این روش، پس از انجام اندازه گیری مقاومت دینامیکی، مشخصه های



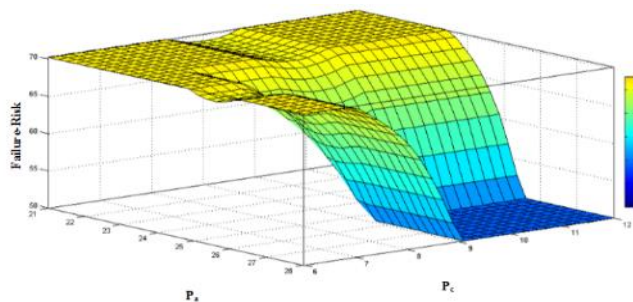
شکل (۱۴): درصد ریسک خطا با در نظر گرفتن مقدار مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک و مقدار ماکزیمم مقاومت کنتاکت



شکل (۱۵): درصد ریسک خطا با در نظر گرفتن مقدار مساحت زیر منحنی و مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک



شکل (۱۶): درصد ریسک خطا با در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی مقاومت دینامیکی و مکان قطع کنتاکت آرک



شکل (۱۷): درصد ریسک خطا با در نظر گرفتن مکان انتقال جریان از کنتاکت اصلی به کنتاکت آرک و مکان قطع کنتاکت آرک

بدین ترتیب، پس از به دست آوردن منحنی مقاومت دینامیکی و به دست آوردن ویژگی های مورد نظر در این منحنی، درصد ریسک خطا را می توان به صورت شکل ۱۸ بدست آورد.

- Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), 2014.
- [11] A. A. Bhole and W. Z. Gandhare, "An overview of dynamic contact resistance measurement of HV circuit breakers," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, June 2016, Volume 97, Issue 2, pp 219–226.
- [12] N.S.Sodha, Sanjeev Singh, S.Victor, R.K.Tyagi, "Condition Assessment of EHV class Circuit Breakers using Dynamic Contact Resistance Measurement Technique," *Cigre*, Paris 2012.
- [13] M. Khoddam, J. Sadeh, P. Pourmohamadiyan, "Assessing Circuit Breaker's Electrical Contact Condition through Dynamic Resistance Signature Using Fuzzy Classifier," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 57-67, 2017.
- [14] M. Laundry, A. Mercier, G. Ouellet, C. Rajotte, J. Caron, M. Roy, and F. Brieki, "A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers," *2005/2006 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Exhib.*, pp. 1–8, 2006.
- [15] J. Paulke, H. Weichert, and P. Steinhäuser, "Thermal simulation of switchgear," *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 434–439, Sep. 2002.
- [16] COMSOL. (2010). COMSOL Multi physics Documentation, [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>

موردنظر یعنی مساحت زیر منحنی مقاومت دینامیکی در ناحیه آرک، مکان قطع کنتاکت اصلی، مکان قطع کنتاکت آرک و مقدار اولیه مقاومت کنتاکت آرک، از منحنی مقاومت دینامیکی استخراج می‌گردد و به‌عنوان ورودی سیستم فازی در نظر گرفته می‌شوند. سپس با اعمال قوانین حاکم بر سیستم فازی، درصد ریسک عملکرد خطای کلید در سه ناحیه عادی، هشدار و خطر تعیین می‌گردد تا نسبت به عملیات لازم جهت نگهداری و تعمیرات کلید قدرت در شبکه، اقدام مناسب صورت پذیرد.

سپاسگزاری

از زحمات آقای مهندس فرساد و علیمحمدی و مدیریت شرکت پارس سوئیچ در فراهم نمودن شرایط اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [۱] محمد عبدالله، تعیین وضعیت کنتاکت‌های کلیدهای قدرت گازی با استفاده از مشخصه مقاومت دینامیکی، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۵.
- [2] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, "Circuit breaker automated failure tracking based on coil current signature," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp.283-290, 2014.
- [3] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, "Data Mining of Online Diagnosed Waveforms for Probabilistic Condition Assessment of SF6 Circuit Breaker," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, pp.1354-1362, 2015.
- [4] A. A. Razi-Kazemi, "Applicability of auxiliary contacts in circuit breaker online condition assessment," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 128, pp. 53–59, Nov. 2015.
- [5] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, "Priority Assessment of Online Monitoring Investment for Power System Circuit Breakers — Part I: Qualitative-Quantitative Approach," *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 28, No. 2, pp. 928–938, 2013.
- [6] A. Bagherpoor, S. Rahimi, A. Razi-Kazemi and K. Niayesh, "Online Condition Assessment of Interruption Chamber of Gas Circuit Breakers Using Arc Voltage Measurement", *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1-1, 2016.
- [7] Niayesh K. and Runde, M.,: *Power Switching Components: Theory, applications and future trends*, Berlin: Springer, 2017.
- [8] Z. Stanistic, R. Neimanis, "A New Ultra Lightweight Method for Static and Dynamic Resistance Measurements", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 1-4, 2010.
- [9] M. Landry, O. Turcotte, and F. Brikci, "A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol.23, no.2, pp. 710-717, 2008.
- [10] R. de Souza, E. da Costa, A. de Oliveira, W. de V. Sousa and T. de Moraes, "Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance", *2014 IEEE PES Transmission &*

