

Reliability analysis of XLPE cables

Mohammad Amin Nikkhah¹, Ramin Eslami²

¹ Head of GIS Laboratory, Sarv Nirou Shiraz Company, Affiliated to Nirou Trans Company, Shiraz, Iran
nikkhah@niroutrans.com

² Managing Director, Sarv Nirou Shiraz Company, Affiliated to Nirou Trans Company, Shiraz, Iran
r.eslami@niroutrans.com

Received: 21 April 2024

Revised: 10 July 2024

Accepted: 12 July 2024

Abstract:

High voltage equipment including transformers, generators and high voltage cables are among the most expensive equipment used in the power system, which imposes a lot of costs on the power grid in case of insulation failure. On the other hand, the outages caused by the failure of this equipment also leads to damage. Therefore, it is necessary to examine these equipments so that they can have good insulation endurance against overvoltages. On the other hand, the occurrence of overvoltages in the power grid is probable. The origin of these high voltages is due to the different switching that takes place in the power grid and is due to lightning. One of the important studies in the power system is reliability, which by conducting this study, the ability of this system to continue servicing subscribers is determined. In order to increase the reliability of the power grid, the reliability of the equipment used in it should be among the high voltage insulations. Accordingly, in this paper, the reliability of high voltage cross-linked polyethylene cables is investigated. In order to study the reliability of high voltage cables, the effects of environmental conditions on these insulations should be investigated. Accordingly, in this paper, the failure rate of high voltage cross-linked polyethylene cables is not considered constant, but the effect of environmental changes on the failure rate of these cables is considered. Arrhenius law is used to investigate the effect of temperature increase on high voltage insulations. In this law, the failure rate of high voltage cross-linked polyethylene cables is calculated in terms of the working temperature of the insulation. In order to determine the working temperature of the insulation, it is necessary to calculate the amount of equipment losses. The losses of electrical equipment also depend on the current passing through the conductors. Therefore, in this paper, the failure rate of cross-linked polyethylene cables and consequently their reliability in different environmental conditions are obtained.

Keywords: Cross-linked polyethylene cables, High voltage insulations, Arrhenius Law, Failure Rate, Operating Temperature, Reliability.

Corresponding Author: Mohammad Amin Nikkhah

Corresponding Author Address: Sarv Nirou Shiraz Company, Affiliated to Nirou Trans Company, Iran

آنالیز قابلیت اطمینان کابل‌های با عایق پلی‌اتیلن کراس‌لینک شده

محمد امین نیک خواه^۱، رامین اسلامی^۲

۱-مسئول آزمایشگاه GIS، شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

nikkhah@niroutrans.com

۲-مدیر عامل، شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

r.eslami@niroutrans.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

چکیده:

تجهیزات فشار قوی شامل ترانسفورماتور، ژنراتور و کابل‌های فشارقوی از جمله گران قیمت‌ترین تجهیزات به کار رفته در سیستم قدرت می‌باشند که در صورت خراب شدن عایقی آن‌ها هزینه‌های زیادی را بر شبکه قدرت تحمیل می‌کنند. از طرف دیگر قطعی ایجاد شده به خاطر خرابی این تجهیزات نیز منجر به خسارت می‌گردد. بنابراین لازم است که این تجهیزات مورد بررسی قرار بگیرند تا در برابر اضافه ولتاژها بتوانند از استقامت عایقی خوبی برخوردار باشند. از طرف دیگر بروز اضافه ولتاژها نیز در شبکه قدرت محتمل می‌باشد. منشا این اضافه ولتاژها هم به خاطر کلیدزنی‌های مختلفی است که در شبکه قدرت صورت می‌گیرد و هم به خاطر بروز صاعقه می‌باشد. یکی از مطالعات مهمی که در سیستم قدرت صورت می‌گیرد قابلیت اطمینان است که با انجام این مطالعه میزان توانایی این سیستم در تداوم سرویس دهی به مشترکین مشخص می‌گردد. به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه قدرت بایستی قابلیت اطمینان تجهیزات به کار رفته در آن از جمله عایق‌های فشار قوی بالا باشد. بر همین اساس در این مقاله مطالعه قابلیت اطمینان کابل‌های فشار قوی با عایق پلی‌اتیلن کراس‌لینک شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان عایق‌های فشارقوی بایستی تاثیراتی که شرایط محیطی بر این عایق‌ها دارند بررسی گردد. بر همین اساس در این مقاله نرخ خرابی عایق‌های فشارقوی ثابت در نظر گرفته نمی‌شود؛ بلکه اثر تغییرات شرایطی محیطی بر نرخ خرابی این عایق‌ها در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی تاثیر افزایش دما بر عایق‌های فشارقوی از قانون آرسنیوس استفاده می‌شود. در این قانون نرخ خرابی کابل‌های فشارقوی با عایق پلی‌اتیلن کراس‌لینک شده بر حسب دمای کار عایق محاسبه می‌گردد. به منظور تعیین دمای کار عایق نیز لازم است تلفات تجهیز محاسبه گردد. تلفات تجهیزات الکتریکی نیز به جریان عبوری از هادی‌ها وابسته است. بنابراین در این مقاله نرخ خرابی کابل‌های فشارقوی با عایق پلی‌اتیلن کراس‌لینک شده و در نتیجه قابلیت اطمینان آن‌ها در شرایط محیطی مختلف به دست آورده می‌شود.

کلمات کلیدی: کابل‌های با عایق پلی‌اتیلن کراس‌لینک شده، عایق‌های فشارقوی، قانون آرسنیوس، نرخ خرابی، دمای کارکرد، قابلیت اطمینان.

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد امین نیک خواه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

۱- مقدمه

سیستم قدرت از سه قسمت اصلی تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده است که وظیفه آن رسانیدن توان الکتریکی تولیدی نیروگاه‌ها به محل مصرف‌کنندگان می‌باشد. در این سیستم جریان الکتریکی از هادی‌ها می‌گذرد و تجهیزات زیادی به مانند ژنراتورهای واقع در نیروگاه‌ها، ترانسفورماتورها، سوئیچگیرها، تجهیزات مختلف اندازه‌گیری واقع در پست‌ها، خطوط انتقال و کابل‌ها به منظور انتقال توان الکتریکی بایستی در سیستم قدرت حضور داشته باشند. در کنار هادی‌هایی که بایستی جریان الکتریکی را از خود عبور داده و از نیروگاه به محل بار برسانند، عایق‌های مختلف نیز دارای اهمیت می‌باشند و وظیفه عایق نمودن هادی‌ها نسبت به بدنه، زمین و سایر قطعات را برعهده دارند. همانگونه که هادی‌ها باید کمترین مقاومت الکتریکی را داشته باشند تا بتوانند جریان بیشتری را از خود عبور دهند، عایق‌ها نیز بایستی بیشترین مقاومت را داشته باشند تا اجازه عبور جریان الکتریکی را ندهند. بنابراین برای اینکه سیستم قدرت بتواند وظیفه تامین بار مشترکین را به خوبی انجام دهد هادی‌های با کمترین مقاومت و عایق‌های با بالاترین مقاومت بایستی در سیستم قدرت به درستی کار خود را انجام دهند. همین درست انجام دادن وظیفه محوله، مفهوم قابلیت اطمینان است؛ چرا که قابلیت اطمینان یعنی اینکه یک تجهیز کار خود را به درستی انجام دهد.

نیاز به قابلیت اطمینان بالا در سیستم قدرت نیز بسیار مهم شده است. این امر به دلیل این است که مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی دیگر نمی‌توانند قطعی برق را حتی برای مدت زمان‌های کوتاه تحمل کنند. از دید مصرف‌کنندگان انرژی برق بایستی برق تحویلی توسط شرکت‌های برق استانداردهای کیفیت توان را داشته باشد تا منجر به خرابی تجهیزات برقی آن‌ها نگردد و قابلیت اطمینان آن نیز بالا باشد. قابلیت اطمینان بالا نیز مستلزم این است که تجهیزات واقع در شبکه قدرت قابلیت اطمینان بالا داشته باشند تا قطعی برق در شبکه کمتر از مقدار مجاز باشد. بنابراین با توجه به اهمیت قابلیت اطمینان سیستم قدرت، بایستی قابلیت اطمینان تجهیزات مختلف موجود در آن از جمله عایق‌های فشارقوی در حد مطلوب باشد. عایق‌های فشارقوی نیز در بسیاری از تجهیزات گران‌قیمت شامل ترانسفورماتورهای قدرت، ژنراتورهای تولیدکننده برق، موتورهای ولتاژ متوسط و کابل‌های فشارقوی استفاده می‌شوند. خرابی این تجهیزات علاوه بر اینکه منجر می‌شود خسارت‌های زیادی بر شبکه برق تحمیل گردد و بایستی با صرف هزینه زیاد این تجهیزات تعمیر یا جایگزین گردند سبب قطعی برق نیز می‌شود. در کشورهای پیشرفته دنیا که بازارهای برق دارند، قطعی برق برای مصرف‌کننده حقی ایجاد می‌کند که به موجب آن بایستی شرکت برق به مصرف‌کننده جریمه قطعی برق پرداخت کند؛ زیرا بسیاری از مصرف‌کنندگان به مانند کارخانه‌های کاغذسازی و ... در صورتی که برقشان قطع شود متحمل خسارت زیاد می‌گردند؛ چرا که در این کارخانه‌ها بسیاری از فرایندها پشت سر هم انجام می‌شود و در صورت قطع برق و انجام نشدن یک فرایند ممکن است موجب خراب شدن خیر کاغذ گردد که این امر سبب وارد آمدن خسارت بر صاحبان کارخانه کاغذسازی می‌گردد و شرکت برق باید این خسارت را جبران نماید. جریمه قطعی برق نسبت به قیمت برق بسیار بیشتر است و بر همین اساس شرکت‌های برق تلاش می‌کنند با صرف هزینه، قابلیت اطمینان سیستم قدرت را بهبود ببخشند تا قطعی برق در شبکه تحت مدیریت آن‌ها کاهش یابد. با توجه به اهمیت قابلیت اطمینان تجهیزات فشار قوی، تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی در این زمینه انجام شده است. در [۱] آنالیز قابلیت اطمینان مقره‌های کامپوزیتی با در نظر گرفتن آستانه خرابی دارای عدم قطعیت صورت گرفته است. در [۲] به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان عایق کاغذ آغشته به روغن از مدل توزیع احتمال وایبال استفاده شده است. در [۳] مشخصه ولتاژ زمان را معرفی کرده و روش ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورماتور پر شده از روغن را برای برای کلاس ولتاژی که به صورت غیرموثر زمین شده است را بیان می‌کند. در این مقاله به منظور تعیین شرایط تست ولتاژ استقامت فرکانس قدرت درازمدت ارزیابی قابلیت اطمینان به روش توزیع وایبال استفاده شده است. در [۴] چگونگی تعیین ولتاژ شکست بحرانی و انحراف معیار استاندارد از داده‌های احتمال شکست که مبتنی بر توزیع وایبال است بیان شده است. در [۵] ولتاژ شکست بحرانی مربوط به انواع مختلف مقره‌های فشارقوی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله مقره‌های مختلف شامل مقره‌های اویزی پلیمری با قطب‌های فایبرگلاس و مقره‌های با پین چینی و قطب‌های فایبرگلاس مورد بررسی قرار گرفته است. در [۶] نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوط به ولتاژ شکست بحرانی مقره‌های فشارقوی آورده شده است. در [۷] مشخصات شکست

عایقی و جریان شکست بحرانی مقره‌های کامپوزیتی ۱۱۰ کیلوولت در محیط‌های آلوده و یخ زده مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۸] فرایند پیری عایق‌های الکتریکی و قابلیت اطمینان آن‌ها در شبکه‌های هیبرید DC و AC مورد مطالعه قرار گرفته است. بروز تخلیه جزئی در عایق‌ها سبب کاهش عمر مفید آن‌ها می‌شود. در [۹] ارزیابی قابلیت اطمینان عایق‌های فشارقوی با استفاده از توزیع وایبال انجام شده است. در [۱۰] آنالیز قابلیت اطمینان و پیش‌بینی عمر کابل‌های با عایق که در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم مورد استفاده قرار می‌گیرند انجام شده است. در [۱۱] مدل‌های فرسوده شدن مقاومت عایقی مربوط به کابل-هایی که بر روی آن‌ها عایق اکستروود می‌شود مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله کابل‌های قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است و به منظور مدل‌سازی از خواص پیری حرارتی کابل استفاده می‌شود. مقاله [۱۲] روش‌های تشخیص تخلیه جزئی در کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده را مورد بررسی قرار داده است تا بتواند عمر باقیمانده این کابل‌ها را تعیین نماید. در این مقاله کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده در معرض ولتاژهای DC قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه چندانی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده انجام نشده است نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر خواهد بود:

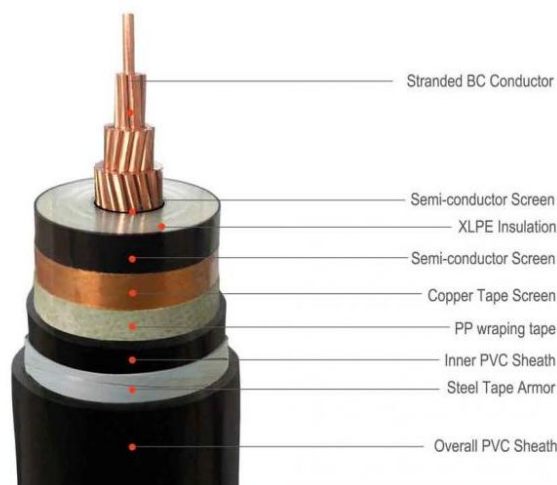
- یک مدل قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل مارکوف برای کابل‌های پلی اتیلن کراس لینک شده به دست آورده می‌شود.
- تاثیر تغییرات جریان عبوری از کابل و همچنین تاثیر تغییرات دمای محیط بر نرخ خرابی و دسترس پذیری کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده تعیین می‌گردد.

در این مقاله هدف مطالعه قابلیت اطمینان کابل‌های فشار قوی با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده می‌باشد. بر همین اساس بخش‌بندی این مقاله به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم کابل‌های فشار قوی با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده معرفی می‌شوند. بخش سوم تکنیک مطالعه قابلیت اطمینان عایق‌های الکتریکی را در شرایط محیطی مختلف بیان و در بخش چهارم شبیه‌سازی تحقیق آورده می‌شود. بخش پنجم نیز از تحقیق نتیجه‌گیری می‌کند.

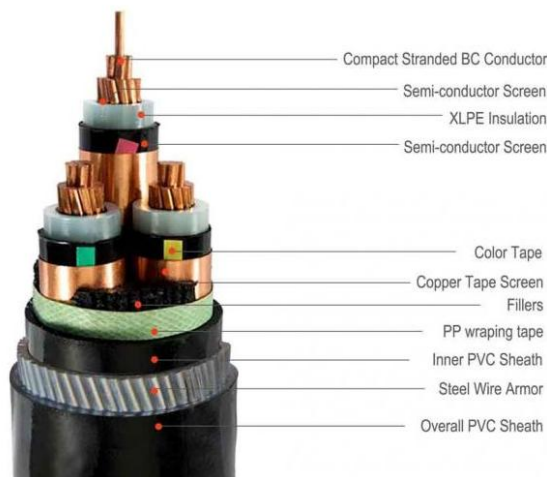
۲- کابل‌های فشار قوی با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده

بطور کلی مواد به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از هادی‌ها، نیمه هادی‌ها و عایق‌ها. از بین این سه دسته، عایق‌ها دارای مقاومت الکتریکی زیادی هستند و بنابراین هدایت الکتریکی آن‌ها بسیار پایین است. بسیاری از فلزات هادی جریان الکتریکی هستند؛ به این معنا که الکترون‌های آزاد در آن‌ها زیاد بوده و این الکترون‌ها می‌توانند به راحتی در طول ماده در هر جهت جابه‌جا شوند. مواد عایقی به شکل‌های جامد، مایع و گاز می‌باشند. به مواد عایقی، دی الکتریک هم گفته می‌شود. این مواد به الکتریسیته اجازه نمی‌دهند که از طریق آن‌ها عبور کند. زمانی که این مواد در معرض یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرند پلاریزه می‌شوند که می‌توان از این خاصیت عایق‌ها در خازن‌های الکتریکی استفاده کرد. خازن‌های الکتریکی در مدارهای جریان مستقیم به مانند عایق عمل کرده، اجازه عبور جریان را نمی‌دهند، اما در مدارهای جریان متناوب به دلیل اینکه پلاریته آن‌ها عوض می‌شود، جریان می‌تواند از خازن عبور کند. همانگونه که گفته شد، عایق‌ها هم به صورت جامد، هم مایع و هم گاز وجود دارند. از جمله عایق‌های جامد می‌توان به سرامیک و چینی که بطور گسترده در مقره‌ها استفاده می‌شوند اشاره نمود. پلاستیک‌ها از دیگر عایق‌های جامد هستند که پلی کلراید ونیل از جمله این مواد عایقی می‌باشد و در ساختار کابل‌ها و سیم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیشه نیز از جمله عایق‌های جامد می‌باشد که در ساختار مقره‌ها کاربرد دارد. میکا نیز یک عایق جامد است که علاوه بر مقاومت الکتریکی مناسبی دارد هدایت حرارتی مناسبی نیز دارد و در خازن‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر عایق‌های جامد می‌توان به رزین که کاربرد زیادی در ترانسفورماتورهای نوع خشک دارد، پلی اتیلن، پلی اتیلن کراس لینک شده و تفلون که کاربرد زیادی در کابل‌ها و مفصل کابل‌ها دارند و لاستیک اشاره نمود. کاغذ نیز از جمله عایق‌های جامد است که به صورت آغشته به روغن به کار می‌رود. عایق‌های مایع نیز کاربرد زیادی در سیستم قدرت دارند که مهمترین آن را می‌توان روغن ترانسفورماتور دانست که در ترانسفورماتورهای نوع روغنی کاربرد زیادی دارد. عایق‌های گازی نیز به مانند هوا و گاز هگزاfluorاید گوگرد کاربرد زیادی در کلیدهای قدرت و سوئیچگیرها دارند. در پست‌های با عایق گازی تمامی هادی‌ها در محفظه‌ها و لوله‌هایی که از گاز هگزاfluorاید گوگرد پر شده‌اند قرار گرفته-

- اند. کابل‌ها نیز در کنار خطوط هوایی وظیفه انتقال توان الکتریکی را در شبکه قدرت بر عهده دارند. اگر خطوط هوایی را با کابل‌های زیر زمینی بخواهیم مقایسه کنیم مزایای زیر برای کابل‌های زیرزمینی قابل تصور است:
- با توجه به اینکه کابل‌ها در زیر زمین قرار می‌گیرند بر خلاف خطوط هوایی حریم زیادی ندارند و بنابراین هم فضای کمتری به منظور حریم در بر می‌گیرند و هم هزینه حریم کمتری دارند.
 - با توجه به اینکه کابل‌ها در زیر زمین مدفون می‌گردند و در معرض حوادث طبیعی نظیر باد، باران، برف، صاعقه، و طوفان نیستند قابلیت اطمینان سیستم کابل زیرزمینی نسبت به خطوط هوایی بیشتر است.
 - با توجه به اینکه کابل‌ها در زیر زمین قرار می‌گیرند ساختار شهرها با حذف خطوط هوایی زیباتر می‌شود.
- علی رغم مزایایی که در بالا برای کابل‌های زیرزمینی نسبت به خطوط هوایی نام برده شد، هزینه عیب‌یابی، تعمیرات و نگهداری سیستم کابل زیرزمینی نسبت به خطوط هوایی بیشتر است. زیرا برای تعمیرات و ... نیاز به حفر زمین می‌باشد. همچنین عیب‌یابی خطوط هوایی با چشم نیز قابل انجام است اما برای سیستم کابل زیرزمینی بایستی از تجهیزات خاص استفاده شود. در گذشته از کابل‌های با عایق روغن در سیستم قدرت استفاده می‌شد که به دلیل مشکلاتی که روغن داشت به تدریج کابل‌های روغنی کنار رفته‌و جای خود را به کابل‌های خشک دادند. در بین کابل‌های خشک نیز کابل‌هایی با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده به دلیل خواص خوب عایق پلی اتیلن کراس لینک شده به طور گسترده در سیستم‌های قدرت فشار متوسط و فشار قوی استفاده می‌شوند. در شکل (۱) ساختار کابل پلی اتیلن کراس لینک شده تکفاز و در شکل (۲) ساختار کابل با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده سه فاز نشان داده شده است. در ساختار کابل پلی اتیلن کراس لینک شده بر روی هادی یک لایه نیمه‌هادی داخلی قرار گرفته است تا توزیع میدان الکتریکی را یکنواخت کند. سپس عایق پلی اتیلن کراس لینک شده قرار گرفته است و بر روی آن لایه نیمه‌هادی خارجی قرار گرفته است. سپس نوار مسی قرار گرفته و بر روی آن شیلد قرار گرفته است که این لایه‌ها زمین می‌شوند. بعد از آن زره کابل که از جنس فلزی است و وظیفه حفاظت از کابل در برابر آسیب‌های خارجی را دارد قرار گرفته است. در نهایت پوشش از جنس پلی کلراید ونیل قرار دارد تا از نفوذ رطوبت به کابل جلوگیری کند. ساختار کابل پلی اتیلن سه فاز نیز به مانند کابل پلی اتیلن کراس لینک شده تکفاز می‌باشد؛ با این تفاوت که در ساختار کابل سه فاز، سه فاز در یک پوشش قرار گرفته و هر کدام از این کابل‌ها دارای هادی از جنس مس یا آلومینیوم، لایه نیمه‌هادی داخلی، عایق پلی اتیلن کراس لینک شده، لایه نیمه‌هادی خارجی و نوار مسی می‌باشند. این سه فاز درون درون یک شیلد قرار گرفته و درون آن برای پر کردن کابل از مواد عایقی استفاده می‌شود. سپس به دور شیلد لایه شیت که از جنس پلی کلراید ونیل داخلی پیچیده می‌شود، سپس به دور آن زره از جنس فولاد قرار گرفته و به دور آن نیز لایه پلی کلراید ونیل خارجی قرار می‌گیرد [۱۳].



شکل (۱): کابل پلی اتیلن کراس لینک شده تکفاز



شکل (۲): کابل پلی اتیلن کراس لینک شده سه فاز

۳- مطالعه قابلیت اطمینان کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده

قابلیت اطمینان هر سیستم به معنای این است که آن سیستم چقدر توانایی دارد کار خود را به درستی انجام دهد. بنابراین قابلیت اطمینان عایق‌های الکتریکی به معنای این است که یک عایق تا چه حد می‌تواند عایق بماند و اجازه عبور جریان الکتریکی را ندهد و به عبارت دیگر خراب نشود. بطور کلی بر اساس اینکه عایق چند بار می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد دو نوع عایق وجود دارد: یکی عایق‌هایی که اگر دچار شکست عایقی شوند دیگر بایستی جایگزین شوند و امکان استفاده مجدد از آن‌ها وجود ندارد. عایق‌های جامد از این نوع عایق‌ها هستند. نوع دوم عایق‌هایی هستند که اگر دچار شکست عایقی شوند می‌توانند دوباره استفاده شوند. عایق هوا از این نوع عایق است. بنابراین در مورد عایق‌های پارامترهای قابلیت اطمینان زیر را می‌توان تعریف نمود:

متوسط زمان تا خرابی: این پارامتر برابر با مدت زمانی است که طول می‌کشد تا اولین خرابی در عایق اتفاق بیفتد. در صورتی که عایق بتواند دوباره مورد استفاده قرار بگیرد متوسط زمان خرابی مقدار متوسط زمان‌هایی است که منجر به خرابی عایق شده است.

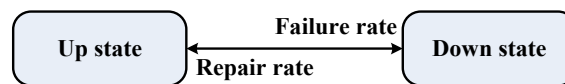
نرخ خرابی: نرخ خرابی برابر با تعداد دفعات خرابی در مدت زمان معین می‌باشد. برای عایق‌هایی که امکان تعمیر در آن‌ها وجود ندارد نیز این نرخ خرابی تعریف می‌شود. این پارامتر عکس متوسط زمان تا خرابی می‌باشد. به عنوان نمونه اگر متوسط زمان تا بروز خرابی ۴ ماه باشد، نرخ خرابی عایق به صورت ۳ بار خرابی در سال خواهد بود.

نرخ تعمیر: برای عایق‌هایی که امکان تعمیر آن‌ها وجود دارد برابر با تعداد تعمیرهای قابل انجام در مدت زمان معین می‌باشد. البته اگر متوسط زمان تعمیر مشخص باشد نرخ تعمیر عکس این زمان خواهد بود. به عنوان مثال اگر متوسط زمان تعمیر یک تجهیز یک روز طول بکشد نرخ تعمیر آن ۳۶۵ تعمیر در سال خواهد بود. بنابراین مدل قابلیت اطمینان عایق‌ها را می‌توان به یکی از دو صورت نشان داده شده در شکل‌های (۳) و (۴) در نظر گرفت. در شکل (۳) مدل قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل مارکوف دو حالت نشان داده شده است که امکان تعمیر نیز برای این عایق وجود دارد. در این مدل احتمال سالم بودن یا همان دسترس‌پذیری از رابطه (۱) به دست می‌آید. به عبارت دیگر دسترس‌پذیری (A) از تقسیم نرخ تعمیر (μ) بر مجموع نرخ تعمیر و نرخ خرابی (λ) به دست می‌آید [۱۴].

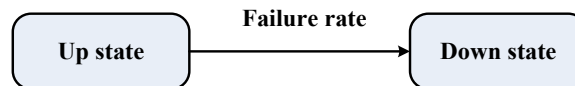
$$A = \text{availability} = \frac{\text{repairrate}}{\text{repairrate} + \text{failurerate}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (1)$$

در صورتی که مدل قابلیت اطمینان مربوط به عایق بر اساس مدل نشان داده شده در شکل (۴) باشد، یعنی امکان انجام تعمیر وجود نداشته باشد، می‌توان احتمال خراب شدن عایق در مدت زمان مشخص (t) را بر اساس رابطه ۲ بدست آورد:

$$P(\text{down state}) = \lambda t \quad (2)$$



شکل (۳): مدل مارکوف دو حالت با امکان انجام تعمیر



شکل (۴): مدل مارکوف دو حالت بدون امکان انجام تعمیر

یکی از مهمترین پارامترهایی که بر نرخ خرابی عایق‌ها تاثیر می‌گذارد دمای کارکرد عایق می‌باشد. بر همین اساس در این مقاله تاثیر دمای کارکرد عایق بر نرخ خرابی آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قانون آرسنیوس تاثیر دمای کار عایق بر نرخ خرابی آن را به صورت رابطه زیر بیان می‌کند [۱۵]:

$$\lambda = \lambda_0 e^{-\frac{Ea}{k}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (3)$$

در رابطه فوق λ نرخ خرابی عایق در دمای T ، λ_0 نرخ خرابی عایق در دمای T_0 ، Ea انرژی فعالسازی عایق و k ثابت بولتزمن می‌باشد. دماهایی که در این رابطه قرار داده می‌شود بایستی بر حسب کلوین باشد. رابطه بین دما بر حسب کلوین و سانتیگراد به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$T(K) = T(C) + 273 \quad (4)$$

کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده که به اختصار XLPE نامیده می‌شوند و این عبارت مخفف کلمات cross linked poly ethylene می‌باشد کاربرد زیادی در صنعت برق دارند. این کابل‌ها در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع در سطح ولتاژهای ۱۱ کیلوولت، ۲۰ کیلوولت، ۳۳ کیلوولت، ۶۳ کیلوولت و ۱۳۲ کیلوولت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سطح انتقال نیز کابل‌های پلی اتیلن کراس لینک شده می‌توانند در ولتاژهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت مورد استفاده قرار بگیرند. به منظور بالا بردن استقامت عایقی این کابل‌ها و همچنین اینکه این کابل‌ها بتوانند دمای بالاتری را تحمل کنند در عایق پلی اتیلن علاوه بر ایجاد پیوندهای طولی، پیوندهای عرضی نیز ایجاد شده است. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر مسئله حریم خطوط هوایی و زیبایی ساختار شهرها مطرح است و از طرف دیگر امکان نصب تیرهای هوایی برق در شهرها وجود ندارد استفاده از کابل‌های زیرزمینی در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع بسیار متداول شده است. به علاوه در مکان‌هایی که انتقال انرژی الکتریکی بخواهد از مسیرهای دریایی عبور کند نیز گزینه کابل‌های زیرزمینی بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. این کابل‌ها در کف دریا قرار گرفته و مشکلات نصب تیرهای برق در درون دریا را ندارند. برای بالا بردن استقامت عایقی و استفاده از کابل در سطح ولتاژهای بالاتر کافی است که ضخامت لایه پلی اتیلن کراس لینک شده کابل که همان لایه عایق کابل می‌باشد را افزایش دهیم. البته علاوه بر این لایه عایق، لایه‌های دیگری نیز در کابل وجود دارد. لایه‌های نیمه‌هادی کار یکنواخت کردن توزیع میدان الکتریکی و جلوگیری از بروز تخلیه‌های جزئی را بر عهده دارند و لایه زره به منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمه به کابل مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه برای اینکه موجودات دریایی به مانند کوسه کابل‌ها را آسیب نرسانند از پوشش زره فولادی در کابل‌ها استفاده می‌شود. همچنین پوشش‌های از جنس پلاستیک که بر خارجی‌ترین لایه کابل قرار می‌گیرد به خاطر این است که از نفوذ رطوبت به درون کابل در هنگام بارش باران و برف و ... جلوگیری کند. این کابل‌ها کاربرد زیادی در صنعت برق دارند و دیگر کابل‌های روغنی به دلیل مشکلات روغن نظیر نشتی روغن کمتر استفاده می‌شوند.

دمای کار کابل‌های فشار قوی به دو دلیل ممکن است تغییر کند: یکی تغییر دمای محیط می‌باشد و دیگری افزایش دمایی که ناشی از تلفات حرارتی در هادی کابل می‌باشد. با توجه به اینکه عمده کابل‌هایی که امروزه در صنعت برق مورد استفاده قرار می‌گیرد کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده می‌باشد در این بخش از تحقیق این کابل‌ها مورد مطالعه قرار گرفته

است. دمای کار این کابل‌ها نیز از رابطه (۵) به دست آورده می‌شود [۱۶]. در این رابطه I جریان عبوری از کابل، T_a دمای محیط و T دمای کار کابل، R مقاومت هادی‌های کابل در ماکزیمم دمای کار، W_d تلفات عایقی کابل و T_1, T_2, T_3 و T_4 مقاومت‌های حرارتی بین لایه‌های مختلف کابل می‌باشد. وجود این مقاومت‌های حرارتی در بین لایه‌ها سبب افزایش دمای کابل می‌شود. در این رابطه n تعداد هادی‌های موجود در کابل و λ_1 و λ_2 تلفات توان بین لایه‌های مختلف کابل می‌باشد. با به دست آمدن دمای کار کابل‌های پلی اتیلن کراس لینک شده در دماهای محیط مختلف و جریان الکتریکی متفاوت به کمک قانون آرسنیوس نرخ خرابی کابل به دست می‌آید.

$$T = T_a + (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + (I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d) n T_2 + (I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d) n (T_3 + T_4) \quad (5)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

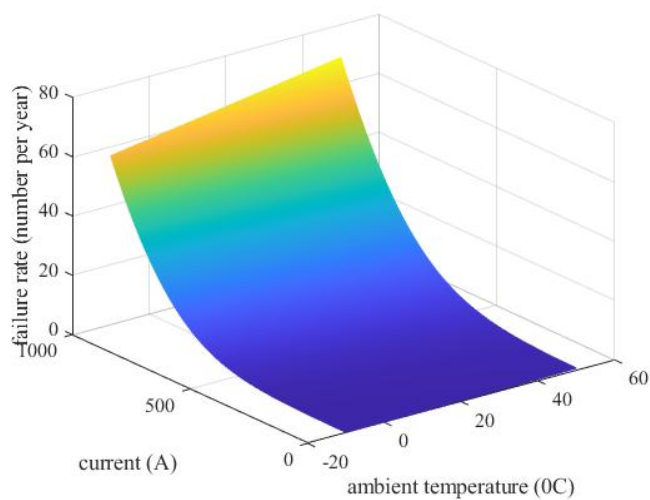
در این بخش از تحقیق به کمک کدنویسی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی صورت گرفته و تاثیر تغییر دمای محیط و جریان عبوری از کابل بر نرخ خرابی کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده مورد بررسی قرار گرفته است. یک کابل فشار متوسط با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت با مشخصات آورده شده در جدول (۱) مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱۷].

جدول (۱): مشخصات کابل مورد مطالعه

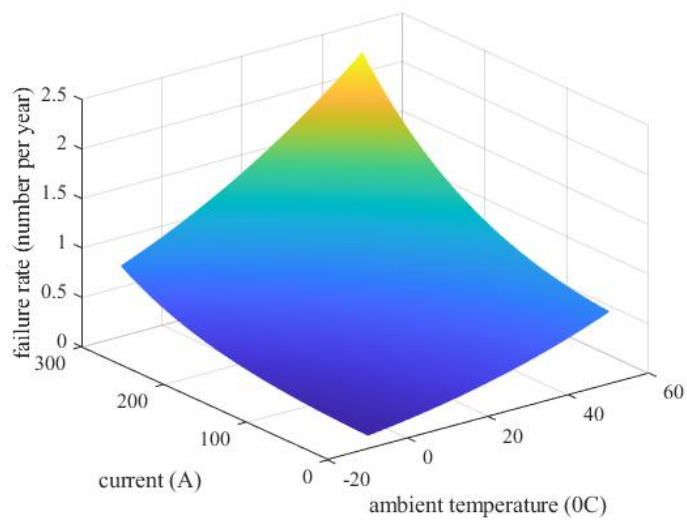
مقدار	مشخصات
۰/۲	انرژی فعالسازی کابل
۰/۴ خرابی در سال	نرخ خرابی در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد
۰/۰۰۰۰۸۶۱۷	ثابت بولتزمن
۰/۰۰۴	تانژانت دلتا
۰/۱۶۳۹۲ نانوفاراد بر متر	ظرفیت خازنی کابل
۲۷۶/۲ آمپر	جریان نامی کابل
۵/۲۷۵ میکرواهم بر متر	راکتانس کابل در فرکانس ۵۰ هرتز
۶۸۹/۶۴ میکرواهم بر متر	مقاومت سری کابل در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد
۸۵۶/۳۹۴۹۵ میکرواهم بر متر	مقاومت کابل در ماکزیمم دمای کار کابل
۸۷/۹۸ میکروژول	تلفات توان بین لایه اول و دوم
۴۶/۲۵ میکروژول	تلفات توان بین لایه دوم و سوم
۰/۹۰۷۹۸ کیلومتر بر وات	مقاومت حرارتی بین لایه اول و دوم
تقریبا صفر	مقاومت حرارتی بین لایه دوم و سوم
۰/۰۹۸۵۸۸ کیلومتر بر وات	مقاومت حرارتی بین لایه سوم و چهارم
۰/۰۸۱۷ کیلومتر بر وات	مقاومت حرارتی بین لایه چهارم و پنجم

بر اساس روابط بیان شده در قبل و با داشتن اطلاعات کابل مورد مطالعه، در این بخش از تحقیق، نرخ خرابی کابل با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده بر حسب دمای محیط و جریان عبوری از کابل محاسبه می‌گردد. در این تحقیق جریان کابل بین ۰ تا ۱۰۰۰ آمپر تغییر داده می‌شود و دمای محیط نیز بین ۱۰- تا ۵۰ درجه سانتیگراد تغییر داده می‌شود.

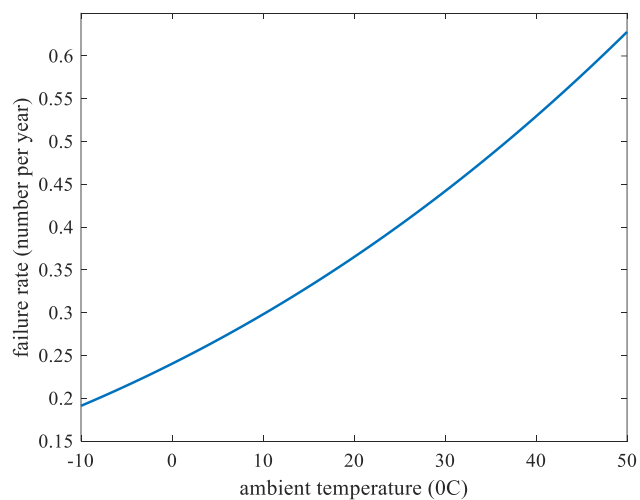
بر این اساس نرخ خرابی کابل محاسبه و در شکل (۵) رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن جریان عبوری از کابل نرخ خرابی کابل افزایش قابل توجهی دارد. البته با زیاد شدن دمای محیط نیز نرخ خرابی کابل افزایش می‌یابد. در شکل (۶) نیز نرخ خرابی کابل بر حسب دمای محیط و جریان کابل تا ۳۰۰ آمپر نشان داده شده است.



شکل (۵): نرخ خرابی کابل

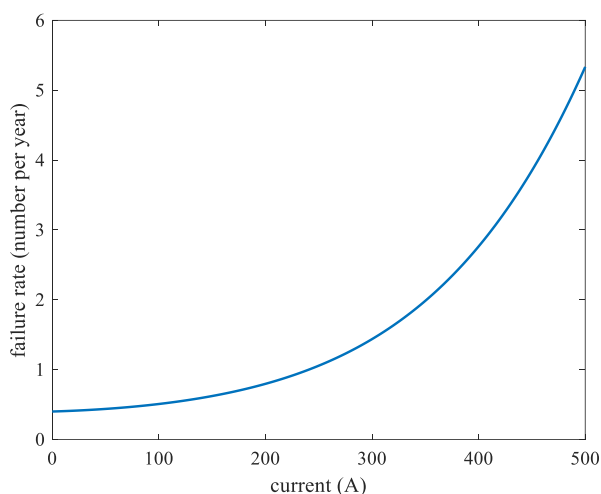


شکل (۶): نرخ خرابی کابل بر حسب دمای محیط و جریان کابل

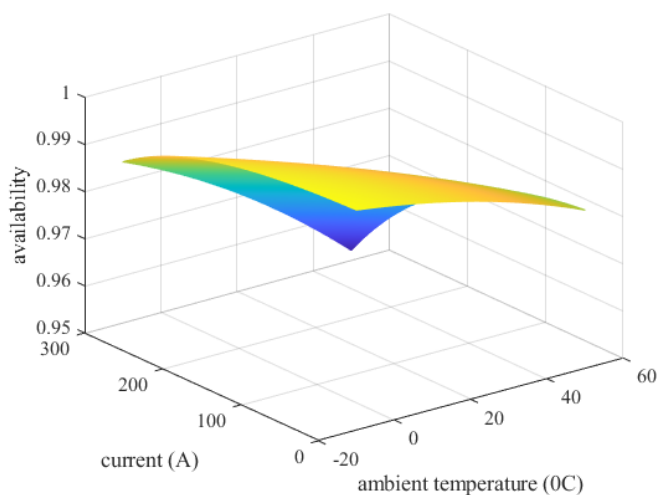


شکل (۷): نرخ خرابی کابل بر حسب دمای محیط

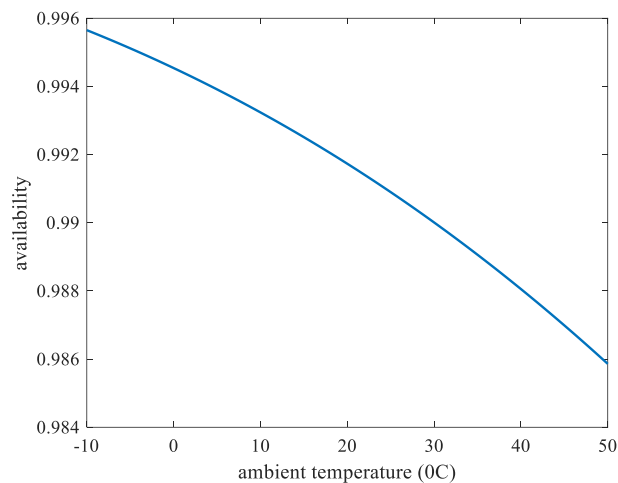
در این قسمت از تحقیق جریان کابل در مقدار نامی قرار داده شده و تغییرات نرخ خرابی کابل بر حسب دمای محیط محاسبه و در شکل زیر نمودار آن رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن دمای محیط، نرخ خرابی کابل نیز افزایش می‌یابد. حال دمای محیط را در مقدار ثابت ۲۵ درجه قرار داده و نمودار نرخ خرابی کابل بر حسب جریان را محاسبه می‌کنیم. نمودار مربوط به نرخ خرابی کابل بر حسب جریان عبوری از کابل نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۸) مشخص است تاثیر زیاد شدن جریان عبوری از کابل بر نرخ خرابی کابل بسیار بیشتر از تاثیر اضافه شدن دمای محیط می‌باشد. بنابراین به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان عایق کابل بایستی جریان عبوری از کابل در محدوده مجاز باشد. در این قسمت متوسط زمان تعمیر کابل ۲۰۰ ساعت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نرخ تعمیر کابل از تقسیم ۸۷۶۰ بر ۲۰۰ ساعت محاسبه می‌گردد که مقدار ۴۳/۸ بار در سال برای نرخ تعمیر کابل به دست می‌آید. به منظور محاسبه دسترس پذیری کابل کافی است نرخ تعمیر را بر مجموع نرخ خرابی و نرخ تعمیر تقسیم کنیم. بر اسن اساس دسترس پذیری کابل به ازای تغییرات دمای محیط و جریان عبوری از کابل محاسبه شده و در شکل‌های زیر رسم شده است. در شکل (۹) نمودار دسترس پذیری کابل بر حسب تغییر دمای محیط و جریان عبوری از کابل رسم شده است. در شکل (۱۰) دسترس پذیری کابل تنها بر حسب دمای محیط و در شکل (۱۱) دسترس پذیری کابل بر حسب جریان عبوری از کابل رسم شده است. همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است با زیاد شدن دمای محیط و جریان عبوری از کابل، دسترس پذیری کابل کاهش می‌یابد. البته تاثیر افزایش جریان عبوری از کابل نسبت به افزایش دمای محیط در کاهش قابلیت اطمینان کابل بیشتر است.



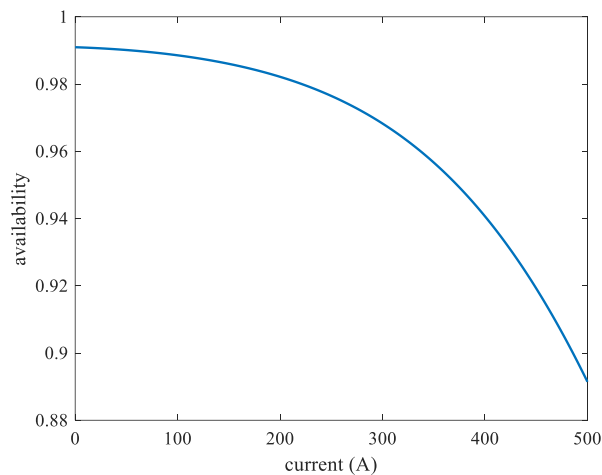
شکل (۸): نرخ خرابی کابل بر حسب جریان کابل



شکل (۹): دسترس پذیری کابل حسب جریان کابل و دمای محیط



شکل (۱۰): دسترس پذیری کابل حسب دمای محیط



شکل (۱۱): دسترس پذیری کابل حسب جریان کابل

۵- نتیجه گیری

در این مقاله قابلیت اطمینان کابل‌های فشار قوی با عایق پلی اتیلن کراس‌لینک شده با در نظر گرفتن اثر شرایط محیطی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اینکه تجهیزات فشارقوی از جمله گران قیمت ترین تجهیزات مورد استفاده در صنعت برق هستند در این تحقیق کابل‌های فشار قوی مورد مطالعه قرار گرفت. در کابل‌های فشارقوی عایق پلی اتیلن کراس لینک شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین قابلیت اطمینان عایق‌های پلی اتیلن کراس لینک شده مدل مارکوف دو حالتی برای این عایق‌ها در نظر گرفته شد. سپس تاثیر دمای کارکرد بر نرخ خرابی این عایق‌ها مطالعه شد. به منظور در نظر گرفتن تاثیر دمای کارکرد بر نرخ خرابی این عایق‌ها از قانون آرسنیوس استفاده شد. این قانون رابطه بین نرخ خرابی عایق را در دماهای کار مختلف تعیین می‌کند. در این رابطه، نرخ خرابی عایق با رابطه نمایی با دمای کار عایق رابطه دارد. به منظور تعیین دمای کار عایق‌ها نیز هم تاثیر دمای محیط و هم تاثیر جریان عبوری از کابل مد نظر قرار گرفت. در کابل‌های پلی اتیلن کراس لینک شده با توجه به لایه‌های کابل، مقاومت کابل و مقاومت حرارتی بین لایه‌های مختلف کابل، میزان افزایش دمای کابل محاسبه می‌شود و با به دست آمدن دمای کار تجهیز، بر اساس قانون آرسنیوس نرخ خرابی کابل به دست آورده می‌شود. در این مقاله به کمک نرم‌افزار متلب با در نظر گرفتن یک کابل فشار متوسط پلی اتیلن کراس لینک شده شبیه‌سازی انجام شده و چگونگی تغییر نرخ به دست آورده شد. در کابل‌های با عایق پلی اتیلن کراس لینک شده نرخ خرابی کابل بر حسب جریان عبوری از

کابل و دمای محیط محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که نرخ خرابی کابل هم به دمای محیط و هم به جریان کابل وابسته است اما میزان افزایش نرخ خرابی به دلیل افزایش جریان کابل قابل توجه‌تر از افزایش نرخ خرابی به دلیل افزایش دمای محیط می‌باشد. علاوه بر نرخ خرابی، دسترس‌پذیری کابل نیز بر حسب دمای محیط و جریان عبوری از کابل محاسبه شد که باز نشان داد دسترس‌پذیری کابل با زیاد شدن دمای محیط و جریان کابل کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور بالا نگه داشتن قابلیت اطمینان کابل بایستی جریان عبوری از این تجهیزات از مقدار نامی فراتر نرود و به همین دلیل است که در این تجهیزات رله‌های اضافه جریان گذاشته شده است تا در صورت زیاد شدن جریان این تجهیزات این رله‌ها به کلید قدرت دستور قطع تجهیز از مدار را بدهند.

References

مراجع

- [1] H. Shi, C. Wei, Z. Zhang, B. Liu, and Y. Wen, "The belief reliability analysis of composite insulators with uncertain failure threshold," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 100, pp. 453–470, Dec. 2021.
- [2] Z. He, Y. Wang, J. Li, S. Gong, and S. Grzybowski, "New Mixed Weibull Probability Distribution Model for Reliability Evaluation of Paper-oil Insulation," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 1, pp. 202–206, Jan. 2013.
- [3] J. Takami, T. Tsuboi, and S. Okabe, "Voltage-time Characteristics and Reliability Evaluation Method of Oil-filled Transformer for Non-effectively Grounded Voltage Class," *Denki Gakkai rombunshi. B, Denryoku, Enerugi Bumonshi/Denki Gakkai rombunshi. B, Denryoku, Enerugi Bumonshi*, vol. 127, no. 12, pp. 1299–1305, Jan. 2007.
- [4] G. Brown, "Determination of Critical Flashover Voltage and Standard Deviation from Flashover Probability Data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 3, pp. 189–194, Mar. 1969.
- [5] A. Sami and T. Mokdad, "Studying Critical Flash Over of Different Types of High Voltage Insulator," *Mağalla al-handasa al-wa-al-tiknūlūgiyā*, vol. 25, no. 6, pp. 815–827, Jun. 2007.
- [6] Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, and Ivo Uglešić, "Lightning Critical Flashover Voltage of High Voltage Insulators: Laboratory Measurements and Calculations," *International review of electrical engineering*, vol. 7, pp. 4321–4328, Jan. 2012.
- [7] M. Bi, Z. Yang, T. Jiang, X. Chen, and Y. Wang, "Study on Flashover Characteristic and Critical Flashover Current of icing and polluted 110kV Composite Insulators," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Sep. 2018.
- [8] G. Carlo Montanari, P. Morshuis, P. Seri, and R. Ghosh, "Ageing and reliability of electrical insulation: the risk of hybrid AC/DC grids," *High Voltage*, vol. 5, no. 5, pp. 620–627, Oct. 2020.
- [9] V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, "Evaluation of strand-to-strand capacitance and dissipation factor in thermally aged enamelled coils for low-voltage electrical machines," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 1170–1177, Oct. 2019.
- [10] T. V. Santhosh, V. Gopika, A. K. Ghosh, and B. G. Fernandes, "An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and Weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 170, pp. 31–44, Feb. 2018.
- [11] X. Ge, F. Fan, M. J. Given, and B. G. Stewart, "Insulation Resistance Degradation Models of Extruded Power Cables under Thermal Ageing," *Energies*, vol. 17, no. 5, pp. 1062–1062, Feb. 2024.
- [12] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Partial discharge classifications: Review of recent progress," *Measurement*, vol. 68, pp. 164–181, May 2015.
- [13] R.M Mutepe, B.A Thango, and P.N Bokoro, "Practical Study on the Lifetime Prediction of High Voltage Cross-Linked Polyethylene Cable (XLPE) using Thermal Aging," Jan. 2023.
- [14] P. M. Anderson, G.M. Chintaluri, S.M. Magbuhat, and R.F. Ghajar, "An improved reliability model for redundant protective systems-Markov models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 573–578, May 1997.
- [15] H. S. Blanks, "Arrhenius and the temperature dependence of non-constant failure rate," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 6, no. 4, pp. 259–265, Sep. 1990.
- [16] S. Qin *et al.*, "Study on temperature rise characteristics of 110 kV XLPE cable under different service years considering dielectric loss," *Energy reports*, vol. 8, pp. 493–501, Nov. 2022.
- [17] J. Li, F. Yang, Z. Fang, X. Lu, and R. Hu, "Assessment on capacity expansion of AC XLPE cable under DC operation with the constraint of temperature and electric field intensity," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 16, no. 13, pp. 2612–2622, Apr. 2022.