

بررسی اثر عبور جریان خازنی از لایه های حفاظ و زره در گرمایش موضعی عایق و خرابی کابل (ICEE2013)

محمد خسرو جردی^۱، پژمان پورمحمدیان^۲، نوید شفیعی^۳

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

1. khosrojerdi.mohammad@yahoo.com

2. pourmohamadiyan@um.ac.ir

3. shafiei_navid2008@yahoo.com

چکیده - در این مقاله با تحلیل الکتریکی- حرارتی یک نمونه کابل ۱۳۲ کیلوولت که در پست های فوق توزیع شهری دچار خرابی شده است، مقدار افزایش دمای موضعی محاسبه شده است و اثر این افزایش دما در خرابی کابل مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش مقدار خازن و پارامترهای کابل اندازه گیری، محاسبه و شبیه سازی شده است. سپس به کمک یک مدل مداری جریان هر کدام از لایه ها محاسبه و با استفاده از یک مدل حرارتی افزایش دمای لایه های کابل محاسبه میگردد. در نهایت اثر این افزایش دما بر روی شکست عایقی کابل ارزیابی میگردد. نتایج حاصله نشان می دهد افزایش دمای موضعی کابل منجر به تخریب تدریجی و موضعی عایق و در نهایت شکست آن شده است.

کلمات کلیدی: شکست عایقی، خرابی کابل، جریان خازنی لایه های کابل

بخش های عمده دیگر می تواند شامل لایه های نیمه هادی، screen فلزی، لایه فلزی محافظ (armour) و لایه های محافظ در برابر نفوذ شعاعی و طولی آب (water blocking) باشد.

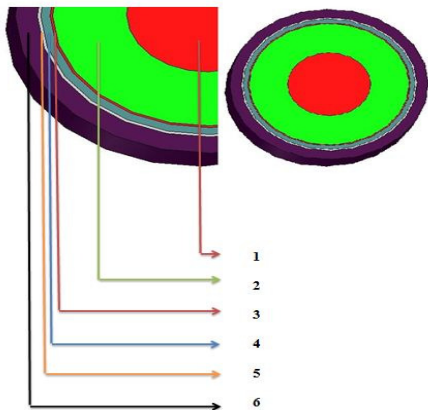
کابل های ۱۳۲ کیلوولت در صنایع برق، نفت و گاز برخی کشورهای حاشیه خلیج فارس استفاده شده است و برخی گزارشها و مقالات مبنی بر خرابی کابل های مذکور ارائه شده است [۱]. در ایران نیز سابقه خرابی این کابلها وجود داشته است اما گزارش مستندی مبنی بر ریشه یابی علمی علت خرابی ارائه نشده است. با توجه به گوناگونی لایه ها، سطح مقطع، جنس و نیز آرایش اتصالات و شرایط محیطی، هر مورد از خرابی ها تحلیل خاص خود را می طلبد. خرابی در کابل های XLPE می تواند در اثر عوامل متعددی رخ دهد [۲]. هدف اصلی در این پژوهش یافتن جریان لایه های کابل است که احتمال می رود عامل اصلی خرابی در نمونه مورد نظر باشد. در کنار آن موارد بسیار دیگری وجود دارد که

۱- مقدمه

با تقاضای رو به افزایش انرژی الکتریکی، ولتاژهای انتقال و فوق توزیع نیز رو به افزایش گذاشته است. انتقال توان زیاد به مسافت های دور نیازمند کابل های فشار قوی با کیفیت بالا است تا در مناطق شهری یا برای عبور زیرزمینی یا دریایی استفاده شود. با جمع آوری شبکه های هوایی در شهرهای بزرگ در ایران و به ویژه در تهران، اصفهان و مشهد و نصب شبکه های زمینی فشارقوی، نیاز به ارائه مدلها و روشهای تحلیل حادثه برای کابل های فشار قوی بیش از پیش احساس می شود.

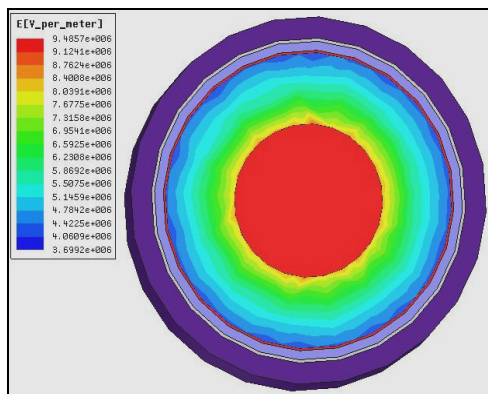
کابل های الکتریکی polymer-insulated یا PE دارای هادی فلزی با مقاومت پایین هستند که توسط پلیمر عایق بندی شده است. این عایق، هادی ها را از یکدیگر و از محیط اطرافشان جدا می کند. یک غلاف (sheath or jacket) از کابل در مقابل اثرات مخرب محیط بیرونی محافظت می کند.

حاصله با مقدار اندازه گیری و محاسبه شده مطابقت دارد. اما برای خازن بین لایه armour و لایه screen، مقدار مشخصی توسط سازندگان ارائه نمی شود. به کمک راستی آزمایشی و مقایسه در آزمایش اول می توان از دقت مقادیر بدست آمده اطمینان حاصل کرد. در بخش شبیه سازی برای محاسبه ظرفیت خازنی بین لایه های مختلف کابل از نرم افزار 13 Ansoft Maxwell استفاده شده است. شکل (۲)، تصویر شبیه سازی شده کابل را نشان می دهد.



شکل ۲: اجزای کابل مورد مطالعه: (۱) هادی اصلی (مس)، (۲) عایق اصلی کابل (XLPE)، (۳) حفاظ مسی (Copper wires)، (۴) عایق جداکننده (PE)، (۵) زره (آلومینیوم)، (۶) روکش بیرونی (Extruded PVC)

شکل (۳) میزان شدت میدان را برای این کابل در حالت تحریک شده نشان می دهد.

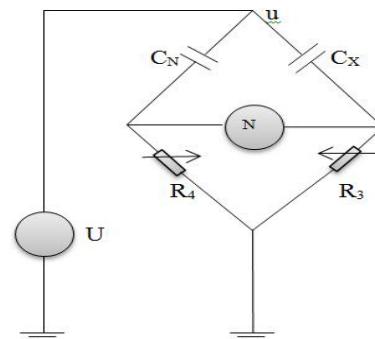


شکل ۳: شدت میدان کابل در حالت تحریک شده

می تواند موجبات خرابی کابل را فراهم کند. از آن جمله می توان به اثرات تخریبی تخلیه جزئی (partial discharge) [۳]، ایجاد فاصله هوایی زیاد میان لایه های مختلف کابل [۴]، آلودگی، رطوبت و یخ زدگی در بین لایه های کابل و روشهای زمین کردن کابل ها اشاره کرد. مطالعه بر روی کابل به سه بخش تحلیل الکترواستاتیکی، تحلیل مداری و تحلیل مساله انتقال حرارت تقسیم شده است. ابتدا خازن بین لایه های مختلف کابل در آزمایشگاه به روش پل شرینگ اندازه گیری شده، سپس به کمک یک نرم افزار اجزا محدود، کمیات الکترواستاتیکی لایه های کابل شبیه سازی شده و اندازه خازن آنها محاسبه خواهد شد. سپس مدار گسترده کل کابل و جریان ناشی خازنی کابل شبیه سازی شده و میزان گرمای حاصله از این جریان محاسبه میشود. سپس با استفاده از روابط انتقال حرارت، میزان گرمای تولیدی کابل و درجه حرارت برخی لایه های آن محاسبه میشود. در انتها و با توجه به نتایج به دست آمده و نیز اطلاعات اولیه کابل، در مورد علل گوناگون خرابی کابل بحث خواهد شد.

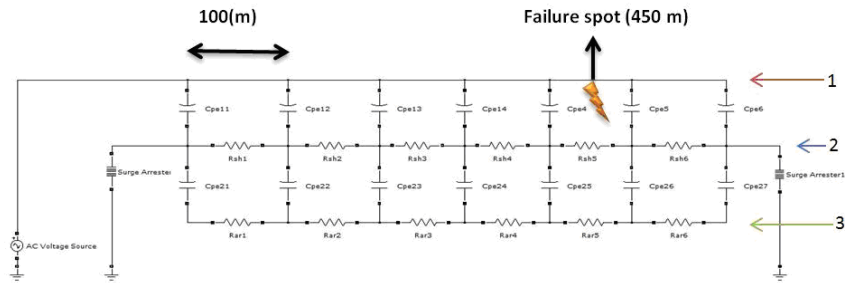
۲- سنجش و اندازه گیری پارامترهای کابل

برای یافتن مقدار خازن بین لایه های مختلف کابل از آزمایش و شبیه سازی کامپیوتری بهره می بریم. در روش آزمایشگاهی، از پل شرینگ استفاده شده است. در شکل (۱) مدار ساده شده پل شرینگ آورده شده است.



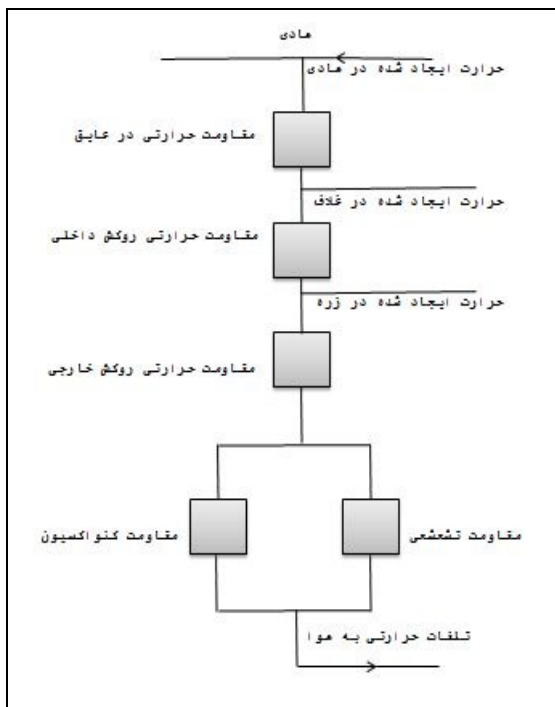
شکل ۱: مدار ساده شده پل شرینگ [۵].

خازن مجهول C_x در این مدار در دو آزمایش خازن بین هادی اصلی و screen و نیز خازن بین لایه armour و لایه screen در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است آزمایش اول توسط سازنده کابل در کارخانه انجام شده است و نتایج



شکل ۴: مدل مداری کابل
(۱) هادی اصلی (۲) لایه حفاظ مسی (shield) (۳) لایه زره (Armour)

حد تحمل حرارتی عایق تجاوز نماید، عایق کابل دچار فرسایش تدریجی شده و حفره های کوچک هوا درون فضای میان عایقها به وجود می آید. همچنین افزایش دمای غیر مجاز می تواند منجر به جدا شدن لایه های فلزی و عایق گردد. نتیجه این فعل و انفعال ایجاد پدیده تخلیه جزیبی (P.D) و فرسایش و خوردگی بیش از پیش می باشد. در چنین شرایطی پدیده درختی (treeing) در همان مکان بسیار محتمل می باشد. نتیجه کلی این روند شکست عایق و خرابی کابل می باشد. در چیدمان کابلها در سیستم مورد مطالعه ما، انتقال حرارت به محیط از هر سه طریق هدایت، کنواکسیون و تشعشع صورت می گیرد. شکل (۵) نحوه ایجاد حرارت و انتقال آن را در حالت کلی برای کابل قرار گرفته در سینی یا نردبان کابل را نشان می دهد.



شکل ۵: نحوه ایجاد و انتقال حرارت در کابل واقع در هوا

با شبیه سازی الکترواستاتیکی کابل مقادیر خازنهای بین هادی و حفاظ (C_{XLPE}) و نیز بین حفاظ و زره (C_{PE}) به ترتیب زیر به دست می آیند:

$$C_{XLPE} = 0.227nF / m$$

$$C_{PE} = 1.33nF / m$$

۳- تحلیل مداری

هدف از تحلیل مداری یافتن جریانهای لایه های حفاظ مسی (shield) و زره (Armour) می باشد. به این منظور کابل (قسمتی از کابل که خرابی در آن رخ داده است) در Simulink نرم افزار متلب (Matlab) شبیه سازی شده است. این موضوع در شکل (۴) نمایش داده شده است. پس از انجام شبیه سازی مقادیر جریان لایه های حفاظ و زره در شرایط عادی سیستم به ازای هر کیلومتر به دست می آید:

$$I_{Shield} = 8.4mA$$

$$I_{Armour} = 500.33mA$$

این مقادیر با فرض جریان نشتی ناچیز (امپدانس بالا) برای برگیرهای نصب شده بر روی کابل محاسبه شده است. اگر هرکدام از محدود کننده های ولتاژ حفاظ (SVL) به دلیلی امپدانس کمتر از مقدار مقرر در شرایط عادی داشته باشند این جریانها تا چندین برابر افزایش خواهند یافت.

۴- تحلیل مساله انتقال حرارت

حرارت ایجاد شده درون کابل بایستی به محیط بیرون منتقل گردد، به طوری که درجه حرارت عایق آن از مقدار مجاز فراتر نرود. حرارت درون کابل بیشتر ناشی از جریان عبوری از هادی اصلی می باشد. در صورتی که مقدار این حرارت زیاد باشد و از

۴-۱- محاسبات مربوط به مساله انتقال حرارت

محاسبات و روابط این بخش از [۶] گرفته شده است. برای شروع محاسبات فرضیات زیر را در نظر می گیریم:

قطر خارجی کابل؛ $d = 92.1mm$

دمای محیط بیرونی مجاور کابل؛ $T_a = 35^{\circ}C$

ثابت بولتزمان: $K = 5.77 \times 10^{-8}$

(۱) مقاومت حرارتی هر لایه:

$$S = \int_{d_1}^{d_2} \frac{\rho \cdot dr}{2\pi r} = \rho \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

(۲) ضریب انتقال حرارت هدایتی:

$$a_c = \left(0.0185/d\right) + 1.081 \left(\sqrt[4]{\frac{T_0 - T_a}{d}}\right)$$

(۳) ضریب انتقال حرارت تشعشی:

$$a_r = (5.77 \times 10^{-8}) \times (0.8) \times \left(\frac{(273 + T_0)^4 - (273 + T_a)^4}{T_0 - T_a}\right)$$

(۴) مقاومت حرارتی تشعشی معادل:

$$S_{eq} = \frac{1}{\pi \times d \times (a_r + a_c)}$$

(۵) مقاومت حرارتی کل:

$$S_{total} = \sum S_i$$

(۶) افزایش دمای زره و حفاظ مسی کابل نسبت به هوای آزاد از

رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta T = T_0 - T_a = S_{total} \times Q$$

برای محاسبه دمای لایه زره معادلات (۲) تا (۶) به طور هم زمان و با تکرارهای متعدد حل می گردد. طبق این محاسبات مقدار افزایش دمای سطح زره به ۴۹ درجه سانتیگراد می رسد که با توجه به دمای محیط (۳۵ درجه سانتیگراد) در مرز آسیب به لایه پلی اتیلن و XLPE قرار دارد. این افزایش دما در مکانهایی که به دلایلی از جمله بستن نگهدارنده های کابل تبادل حرارتی کمتری صورت می گیرد بیشتر خواهد بود. این شرایط قطعا موجب جدا شدن لایه های فلزی از عایق کابل می گردد. در شکل (۶)، دو تصویر مربوط به کابل پس از خرابی در محل نصب نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، محل خرابی در فاصله بسیار کمی از بست پلاستیکی نگهدارنده کابل قرار دارد. البته اثر نیروی مکانیکی وارد شده به لایه ها در اثر بست پلاستیکی نیز در تخریب اولیه لایه ها موثر است.

Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2010.

[2] IEEE Std 1511.1, "IEEE Guide for Investigating and Analyzing Shielded Power Cable Failures on Systems Rated 5 kV Through 46 kV", New York, USA, 2011, IEEE Power & Energy Society.

[3] W. Shu and S. A. Boggs, "Effect of Cable Restoration Fluid on Inhibiting Water Tree Initiation", IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011

[4] S. A. Boggs, "Failure Mechanisms of Shielded Power Cable Related to High Ground Shield Resistance and/or Insulation of Neutral Wires From the Ground Shield", IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, VOL. 17, NO. 2, APRIL 2002.

[۵] حسین محسنی، مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی، انتشارات دانشگاه تهران، مهرماه ۱۳۷۷.

[6] Electric Bicc cables, Bicc Cables Ltd Staff Cables Handbook, 3e. John Wiley Blackwell, 2007

۵- نتیجه گیری

محاسبات انجام شده نشان می دهد که جریان خازنی عبوری از لایه های کابل سبب ایجاد گرمای زیاد در لایه های رسانای کابل شده است. بررسی محل خرابی نشان می دهد که لایه زره آلومینیومی کابل پیش از وقوع خطا به شکل قابل توجهی از عایق پلی اتیلن جدا شده بوده است که این خود می تواند ناشی از افزایش دمای زره باشد. این فاصله هوایی به وجود آمده سبب ایجاد تخلیه جزئی موضعی و در نهایت شکست کامل عایق در همان نقطه شده است.



شکل ۶: کابل پس از خرابی

مراجع:

[1] C. Q. Su, "Failure Analysis of Three 230kV XLPE Cables", IEEE/PES Transmission and