

بررسی و ارزیابی روش‌های یخ‌زدایی و جلوگیری از یخ‌زدگی خطوط انتقال نیرو

فرامرز قلیچی سیامک حسین خلج صابر نوری‌زاده پویا رضایی

۱- مهندسین مشاور مونکو ایران

واژه‌های کلیدی: یخ‌زدایی و جلوگیری از یخ‌زدگی خطوط انتقال نیرو

چکیده

طوفان‌های سنگین برف و یخ، صدمات قابل توجهی به خطوط انتقال نیرو وارد می‌کنند. هرچند چنین مشکلاتی در بخش‌هایی کوتاه از خطوط انتقال و در زمانهای خاصی از سال بوقوع می‌پیوندد، اما مشکلات و حوادث فوق‌الذکر باعث تهدید جدی قابلیت اطمینان و امنیت شبکه می‌گردد. پر واضح است که هزینه کاهش امنیت شبکه از این طریق و مدت زمان طولانی در مدار نبودن خطوط انتقال بسیار بیش‌تر از هزینه فراهم کردن تمهیدات جلوگیری از یخ‌زدگی و یخ‌زدایی خطوط انتقال است.

۱. مقدمه

یخ‌زدایی خطوط انتقال نیرو در مناطق سردسیر از مهمترین مسائل و مشکلات شرکت‌های برق منطقه‌ای طی دهه‌های اخیر بوده است. تکنیک‌های زیادی برای حل این مشکل ایجاد شده است. بر مبنای تجربه صنعت برق در نقاط مختلف دنیا، دو استراتژی متفاوت بکار رفته در این رابطه در خطوط انتقال هوایی عبارتند از:

- یخ‌زدایی^۱
- جلوگیری از یخ‌زدگی^۲

برای جلوگیری از تخریب برج‌های انتقال نیرو، شرکت‌های برق اقدام به طراحی و احداث خطوطی می‌کنند که بتوانند حجم یخ قابل توجهی را تحمل کنند تا احتمال تخریب و شکست برج‌ها به حداقل برسد. این موضوع، معمولاً به برج‌های با استحکام بالا و خطوط گران قیمت نیاز دارد.

جلوگیری از یخ‌زدگی خطوط انتقال نیرو نخستین کاری است که در این رابطه باید انجام داد. بعنوان اقدام بعدی، می‌توان از تکنیک‌های یخ‌زدایی نیز استفاده کرد. با استفاده بهینه از این تکنولوژی‌ها می‌توان بار یخ خطوط انتقال را کاهش داد. بدیهی است هرچه حجم بار یخ خطوط انتقال نیرو بیش‌تر باشد، کارایی چنین روش‌هایی چشمگیرتر خواهد بود. جلوگیری از یخ‌زدگی باعث کاهش مقدار یخ جمع شده روی خطوط می‌شود. این استراتژی می‌تواند در خطوطی که دارای طراحی نرمال می‌باشند به کار گرفته شود؛ خطوطی که برای تحمل بار زیاد یخ طراحی نشده‌اند. در صورت بکارگیری مناسب این استراتژی می‌توان به صرفه جویی قابل توجهی در هزینه طراحی و احداث خطوط جدید دست

یافته و ضرایب اطمینان در استحکام برج، زنجیره براق‌آلات و ... را نرمال نمود.

در این مقاله روش‌های مختلف جلوگیری از یخ‌زدگی^۳ و یخ‌زدایی^۴ هادی‌ها و سیم‌های گارد در خطوط انتقال ارائه، بررسی و مقایسه شده‌اند. همه روش‌هایی که در حال حاضر بدین منظور به طور گسترده به کار می‌روند، با ذکر جزئیات روش، سطح ولتاژ اعمالی و ملاحظات فنی و اقتصادی توصیف شده‌اند. بهره‌برداران شبکه‌های برق ژاپن، روسیه و کشورهای آمریکای شمالی و اروپای شمالی تجارب ارزشمندی در این مسائل دارند؛ کلیه روشهای بررسی شده، روش‌هایی هستند که در این کشورها بکار رفته‌اند.

روش‌های جلوگیری از یخ‌زدگی عبارتند از:

- کاهش نیروی کشش سطحی یخ
- جلوگیری از یخ‌زدگی قطرات آب

روش‌های یخ‌زدایی نیز عبارتند از:

- روش‌های گرمایی
- روش‌های مکانیکی
- روش‌های اثر ژول

در بسیاری از کشورها از روش‌های گرمایی طی چندین دهه استفاده شده است و بهمین علت این روش در سطح دنیا به بلوغ کامل تکنولوژیک رسیده است. بازدهی آنها تابع انتخاب مناسب تکنولوژی با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و زمان‌های نیاز به برقرار بودن خط می‌باشد.

برای حفاظت بخش‌های کوتاه‌تر و استراتژیک خطوط انتقال، روش‌های مکانیکی بهترین روش هستند. در این مقاله، روش‌های مکانیکی عملی که در حال حاضر استفاده می‌شوند، تشریح شده است.

۲. روش‌های جلوگیری از یخ‌زدگی

کشش سطحی یخ به خصوصیات فیزیکی و جنس هادی بستگی دارد. برای پیشگیری از تجمع برف و یخ روی هادی‌ها و سیم‌ها ایده‌های متعددی وجود دارد:

- اولین آنها ضعیف کردن نیروی کشش سطحی یخ در سطح بین یخ و سیم است.
- ایده دوم جلوگیری از یخ زدن قطرات آب روی خطوط می‌باشد.

^۳ - anti-icing
^۴ - de-icing

^۱ - de-icing
^۲ - anti-icing

- استفاده از ابزارهای خودکار جهت ایجاد ارتعاشات خفیف در هادی‌ها و سیم‌ها نیز کاربرد قابل توجهی در جلوگیری از تجمع برف و یخ روی آن‌ها دارد.
- با بکارگیری این ایده‌ها تکنیک‌های مختلفی برای پیش‌گیری از یخ‌زدگی خطوط فراهم شده است.

۱-۲. کاهش نیروی کشش سطحی یخ

روش‌های مبتنی بر کاهش نیروی کشش سطحی یخ به شرح زیر می‌باشند:

- یکی از روش‌های جلوگیری از تجمع یخ، استفاده از یک پوشش سطحی برای ضعیف کردن کشش سطحی بین یخ و سطح هادی است. دو روش برای این کار وجود دارد:

§ یکی استفاده از موادی است که سطح انرژی پائین تری دارند. پلی تترا فلورو اتیلین ($PTFE^1$ یا تفلون) و پلی دی متیل سیلوکسان ($PDMS^2$ یا سیلیکون) در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج به کارگیری این مواد نشان داده است که بطور کلی، پلیمرهای نوع سیلیکونی بهتر از نوع اول ($PTFE$) عمل می‌کنند.

§ اخیراً نیز یک ماده اپوکسی سیلیکون به نام WearLon مورد استفاده قرار گرفته است. این ماده که به صورت تجاری موجود است، تجمع یخ بر روی هادی‌های آلومینیومی را ۱۲ برابر کاهش می‌دهد. این ضریب برای تفلون در حدود ۲ می‌باشد. استفاده از ترکیبات انواع پلی‌سیلوکسان و فلوروکربن نیز امری متداول است. تعدادی از این ترکیبات حتی توانسته‌اند تجمع یخ را به مقدار ۲۵ برابر روی خطوط کاهش دهند.

- روش دیگر کاهش تجمع یخ روی هادی‌ها، تزریق مقدار کمی مایع ویژه بین یخ و سطح هادی است. در این صورت ارتباط فیزیکی-شیمیایی بین سطح و یخ ضعیف می‌شود و باعث می‌گردد یخ توسط نیروی جاذبه از خط جدا شود. این مایع می‌تواند مواد روغنی چسبنده و صنعتی و یا یک نوع گریس باشد. یافته‌های جدید نشان می‌دهد که گریس لیتیوم و مواد روغنی صنعتی نیروی جمع شدگی یخ را تا ۶۳ برابر کاهش می‌دهد. برای استفاده از این مواد، تیم تعمیراتی باید به محل یخ‌زدگی بروند و از طریق اسپری‌های اتوماتیک مکانیکی یا روش‌های پیشرفته تر، پوشش مناسب را اعمال کنند.

استفاده از این روش‌های غیردائم به زمان‌بندی صحیح، پیش‌بینی دقیق هواشناسی و مشاهدات میدانی احتیاج دارد تا مشخص گردد طوفان سخت در کدام منطقه و در چه زمانی رخ خواهد داد.

روش‌های مختلف مربوط به جلوگیری از یخ‌زدگی در جدول ۱ آمده است. این جدول روش‌های عملی مبتنی بر ایده کاهش نیروی کشش سطحی را نشان می‌دهد. در ستون آخر جدول، حجمی از سیستم قدرت که می‌تواند حفاظت شود، بیان شده است؛ این طبقه بندی با توجه به ملاحظات اقتصادی انجام شده است. گزارش‌های بیشتری نیز در مورد هزینه، طول عمر و انرژی مورد نیاز این روش‌ها موجود است.

۲-۲. جلوگیری از یخ‌زدگی قطرات آب

جلوگیری از یخ‌زدگی قطرات آب نیازمند ایده متفاوتی نسبت به روش قبلی می‌باشد. هدف این روش جلوگیری از یخ زدن قطرات آب در اثر تماس با سطح سرد هادی است. بسته به روش استفاده شده، این تکنیک می‌تواند از تشکیل یخ روی هادی به طور کامل جلوگیری کند یا به راحتی سبب تشکیل یک لایه نازک آب بین هادی و لایه یخ شود، تا امکان ریزش طبیعی یخ در اثر نیروی جاذبه یا باد را بوجود آورد.

ایجاد یک لایه نازک آب بین یخ و سطح هادی می‌تواند به راحتی توسط ترکیب آب و مایع‌های کاهنده نقطه انجماد فراهم شود. این مواد صنعتی (موجود) معمولاً برای جلوگیری از یخ‌زدگی هواپیما و سطح پیاده‌رو به کار می‌روند. مانند مواد ضد یخ چسبنده، این مواد نیز محدودیت کاربرد و دوام دارند و از آنجا که دائمی نیستند، باید در بازه‌های زمانی معینی بر روی سازه‌ها به کار گرفته شوند. در نتیجه، می‌توانند فقط برای قسمت‌های خاص خط به کار روند.

در مورد روش‌های جلوگیری از یخ‌زدگی قطرات آب باید اشاره کرد که:

- یک روش افزایش دمای سطح هادی، استفاده از حرارت ناشی از عبور جریان در هادی است. گرم کردن هادی‌های خطوط توسط اثر ژول برای جلوگیری از تجمع یخ یا یخ‌زدایی موثرترین و شناخته‌شده ترین راه حل مهندسی برای کاهش اثرات طوفان‌های سخت همراه با برف روی خط انتقال است. در کشورهای مختلف، برای ذوب یخ از هر دو نوع جریان DC و AC استفاده شده است.
- روش‌های گرمایی اثر ژول هم برای جلوگیری از یخ‌زدگی و هم یخ‌زدایی به کار می‌روند. این روش‌ها در بخش ۳-۳ بررسی شده‌اند.
- در بعضی از روش‌ها از تلفات پوشش دی‌الکتریک که کل سطح هادی را می‌پوشاند، استفاده می‌شود. با انتخاب پوشش کافی از مواد فروالکتریک، دمای سطح هادی می‌تواند بالاتر از نقطه انجماد نگه‌داشته شود.
- دیگر روش‌های پیشنهاد شده بر مبنای استفاده از پوشش فرومغناطیسی هستند و دمای مثبتی بر روی سطح هادی برقرار ایجاد می‌کنند. به جای جذب انرژی از میدان الکتریکی، پوشش فرومغناطیسی انرژی را از میدان مغناطیسی می‌گیرد. روش‌هایی که از اشکال مختلف پوشش استفاده می‌کنند، در حال حاضر در ژاپن برای جلوگیری از تجمع یخ روی هادی استفاده می‌شوند. در شرایط خیلی سخت تر مانند دمای پائین و سرعت‌های بالای باد چون، به میدان مغناطیسی شدید نیاز است، روش‌های گرمایی مبتنی بر اثر ژول اقتصادی تر هستند.

¹ - poly tetrafluoroethylene
² - poly dimethylsiloxane

- یک روش دیگر، استفاده از ردیاب الکتریکی است، همانطور که در لوله‌های گرمکن واحدهای پتروشیمی استفاده می‌شود. ردیاب‌های الکتریکی، سیم‌های گرمکن مقاومتری هستند که از نظر الکتریکی عایق شده‌اند و برای گرم کردن هادی، دور آن پیچیده می‌شوند. این یک تکنیک پیشرفته در زمینه پتروشیمی است و باید برای استفاده در خطوط انتقال نیرو با آن هماهنگ شود. جدول ۲ روش‌های گفته شده در قبل و خصوصیات آنها را به طور خلاصه بیان می‌کند. در این جدول یخ‌زدگی سیم گارد نیز در نظر گرفته شده است.

۳. روش‌های یخ‌زدایی

روش‌های یخ‌زدایی شامل تکنیک‌های خاصی برای سرعت بخشیدن به ریزش یخ پس از بارش برف و تشکیل یخ روی هادی است. بدین منظور به طور کلی از دو روش استفاده می‌شود:

- روش‌های گرمایی برای ذوب یخ،
- روش‌های مکانیکی برای شکستن یخ.

روش‌های مکانیکی به انرژی بسیار کمتری نسبت به روش‌های گرمایی نیاز دارند. اما در حال حاضر روش‌های گرمایی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و این مسئله اکثراً به این خاطر است که روش‌های گرمایی و به خصوص روش‌های اثر ژول، قابلیت یخ‌زدایی قسمت‌های طولانی‌تر خطوط را دارند و همچنین نیاز آنها به نیروی انسانی بسیار کمتر از روش‌های مکانیکی است. این روش‌ها معمولاً برای یخ‌زدایی هادی‌ها هستند و نه سیم‌های گارد. با این وجود روش‌های مکانیکی، برای واکنش سریع و مشخص برای یخ‌زدایی قسمت‌های مهم و کوتاه از شبکه برق بکار می‌روند.

۳-۱. روش‌های گرمایی

روش‌های گرمایی شامل همه روش‌هایی هستند که باعث ذوب یخ برای تسریع ریزش آن می‌گردند. (شکل ۱)

- همه روش‌های گفته شده که از یخ‌زدگی قطرات سرد آب به وسیله افزایش دمای سطح هادی جلوگیری می‌کنند نیز به عنوان روش‌های یخ‌زدایی در نظر گرفته می‌شوند. تنها تفاوت این است که در حالت جلوگیری از یخ‌زدگی، به انرژی کمتری نسبت به یخ‌زدایی نیاز است.

- علاوه بر روش‌های گرمایی معرفی شده، روش‌های دیگری نیز می‌تواند با امکان استفاده بالقوه برای هادی‌ها و سیم‌های گارد به کار گرفته شود. همه روش‌های گرمایی گفته شده در اینجا می‌تواند به عنوان منابع گرمای داخلی (از خود هادی) در نظر گرفته شود. تعداد کمی از روش‌های ارائه شده از منابع خارجی استفاده می‌کنند. یک روش شامل استفاده از تشعشع می‌باشد، به خصوص امواج رادیویی برای گرم کردن حد فاصل هادی و یخ. این روش یک روش موثر برای خطوط ریلی است و در رابطه با سیستم انتقال باید سازگاری لازم به عمل آید.

- روش‌های مبتنی بر اثر ژول با تفصیل بیشتری در قسمت ۳-۳ آمده است.

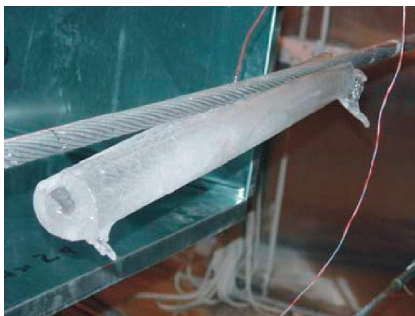
- یک روش دیگر شبیه روش‌هایی است که از مواد فروالکتریک استفاده می‌کنند (جدول ۲). در این روش‌ها به خاطر استفاده از سیگنال‌های فرکانس بالا، باید تداخل الکترومغناطیسی سیگنال‌های مخابراتی در نظر گرفته شده و راه‌حل مناسب جلوگیری آن فراهم گردد.

۳-۲. روش‌های مکانیکی

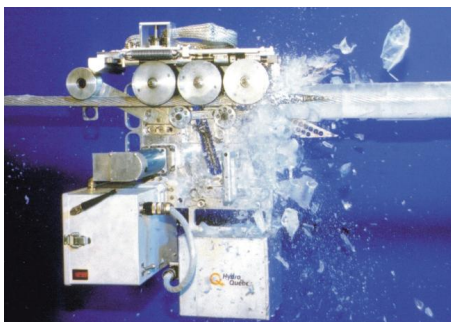
روش‌های مکانیکی به همه روش‌هایی گفته می‌شود که برای شکستن یخ و تسریع در ریزش آن به کار می‌رود. یکی از مزایای اصلی روش‌های مکانیکی این است که نسبت به روش‌های گرمایی، به راحتی می‌توانند بدون هیچ تغییری برای سیم گارد به کار گرفته شوند.

به طور کلی، اکثر روش‌های مکانیکی بر اساس دو ایده هستند:

- یکی از آنها شامل شکستن مستقیم یخ با خراشیدن است. ساده‌ترین روش‌های خراشیدن، خراشنده‌های دستی، غلتک‌ها یا انبردست‌های متصل به یک طناب هستند، که توسط کارگران برای آزاد کردن یخ کشیده می‌شوند. این روش‌ها به طور کلی وقتی به کار می‌روند که خط قابل دسترسی باشد. یکی دیگر از روش‌ها استفاده از ربات‌های اتوماتیک است. یکی از اینها به نام ¹ROV توسط شرکت‌های برق در کبک کانادا به کار گرفته می‌شود. هدف اصلی، یخ‌زدایی کابل‌ها با قابلیت استفاده در سازه‌هاست. ROV به خوبی روی هادی‌های بردار خطوط انتقال تا ۳۴۵ کبار می‌رود. مدار الکترونیکی آن از تداخل الکترومغناطیسی حفاظت شده است و گستره کار ۱ km دارد. ابزار یخ‌زدایی آن تیغ‌های فولادی است (شکل ۲). ROV باید از طریق یک هلی کوپتر یا تراک عایق شده روی خط نصب شود، چون سازه‌های یخ‌زده مانع از رسیدن تیم تعمیراتی به سیم‌های گارد هستند.



شکل ۱- نمونه یخ‌زدایی با یخ در حالت افتادن



شکل ۲- نمونه یک یخ‌زدای ROV

¹ - Remotely Operated Vehicle

شود. یک تجهیز مرتعش متصل به وسط اسپن توسط شرکت Protura در کانادا ساخته شده است و AIC² نامیده می‌شود. این تجهیز در شکل ۵ نشان داده شده است و از یک ترانسفورمر جریان برای تغذیه، یک دوربین، سنسورهای مختلف برای تشخیص یخ، یک جعبه کنترل و یک ارتعاشگر الکترومغناطیسی تجاری استفاده می‌کند. همه این تجهیزات در یک محفظه محکم مستقیماً روی هادی قرار می‌گیرند. AIC به صورت دائمی روی خط نصب می‌شود و کاملاً اتوماتیک است. با استفاده از سنسورها و قابلیت‌های مخابراتی مراحل یخ‌زدایی به صورت کاملاً اتوماتیک صورت می‌پذیرد. همچنین می‌تواند توسط یک سیگنال به صورت دستی به آن فرمان داده شود.

روش‌های مکانیکی توصیف شده به همراه خصوصیات آنها به طور خلاصه در جدول ۴ آورده شده‌اند.



شکل ۳- استفاده از هلی کوپتر برای یخ‌زدایی با استفاده از وزنه ۹۰ کیلوگرمی و طناب بلند



شکل ۴- نمونه DAC آماده برای فعال شدن



شکل ۵- AIC ساخته شده توسط شرکت Protura

روش دیگر از انرژی آزاد شده بدلیل وارد کردن شوک، ارتعاش یا پیچاندن هادی یا سیم‌گارد استفاده می‌کند. این روش‌ها از هادی‌ها یا سیم‌های گارد برای اعمال انرژی مکانیکی استفاده می‌کنند. شوک مکانیکی در طول هادی منتشر می‌شود؛ از آنجا که یخ یک ماده شکننده است، انرژی مکانیکی کمی برای شکستن آن لازم است، چون انرژی برای تغییر شکل پلاستیکی هدر نمی‌رود. جزییات بیش‌تر روش‌های اعمال شوک به شرح زیر می‌باشند:

§ روش اول برای ایجاد شوک این است که با یک تیر عایق شده به هادی ضربه زده شود. این روش برای یخ‌زدایی یک اسپن مفید است، ولی نیاز به این دارد که هادی‌ها خیلی از سطح زمین بالا نباشند.

§ بر اساس این ایده می‌توان از یک طناب که سر آن مجهز به چکش است، استفاده کرد. چکش توسط یک پیستون با استفاده از هوای فشرده کار می‌کند. این طناب می‌تواند از سطح زمین توسط تیم تعمیراتی به کارگرفته شود یا بر روی یک آسانسور قرارگیرد. این روش نیازمند آن است که خطوط توسط تیم تعمیراتی خط قابل دسترسی باشند. در غیر این صورت، طناب می‌تواند مستقیماً از برج یا یک هلی کوپتر به کار گرفته شود.

§ در مناطق کوهستانی که فقط قابلیت دسترسی با هلی کوپتر وجود دارد، کارکنان شرکت BC Hydro در کانادا از یک تجهیز ۹۰ کیلوگرمی متصل به یک طناب ۳۰ متری استفاده می‌کنند. این تجهیز باعث بلند کردن و رها کردن قسمت‌های کوچک خط می‌شود که در نهایت یخ و برف را از روی خطوط به پائین می‌ریزد (شکل ۳). در یک اسپن ۵۰۰ متری می‌توان کمتر از نیم ساعت ۵۰ درصد برف مرطوب را به پائین ریخت. ثابت شده است که این روش بسیار موثرتر از ضربه زدن به هادی‌ها با تیرهای عایق شده از یک هلی کوپتر است.

§ یک روش دیگر که در شرکت هیدرو-کبک کانادا به کار می‌رود، بر مبنای ایجاد شوک مکانیکی به خط است. این سیستم قابل حمل که DAC¹ نامیده می‌شود، در شکل ۴ نشان داده شده است. در این روش از یک تجهیز قابل حمل همراه با سیلندر و پیستون استفاده می‌شود که مجهز به فشنگ‌های خالی است و می‌تواند از راه دور تحریک شود تا ایجاد شوک کند. عملیات یخ‌زدایی با DAC کاملاً از روی زمین انجام می‌گیرد و این یک مزیت بزرگ نسبت به دیگر روش‌های مکانیکی است.

§ در یکی دیگر از روش‌های مکانیکی ارتعاشاتی در هادی‌ها یا سیم‌های گارد برای ریزش یخ ایجاد می-

² - Automatic Ice Control

¹ - De-icer Actuated by Cartridge

۳-۳. روش‌های اثر ژول

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های پاک کردن یخ از هادی استفاده از روش‌های گرمایی اثر ژول است. این روش‌ها از سال ۱۹۲۵ در انگلستان به کار گرفته شده‌اند. در طول سالیان بهره‌برداری، روش‌های یخ زدایی و جلوگیری از یخ‌زدگی گرمایی بر مبنای اثر ژول توسعه یافته‌اند و مرتباً در آمریکا، کانادا و روسیه به کار می‌روند. با افزایش تقاضای انرژی، خطوط انتقال طولانی‌تر می‌شوند و با افزایش سطح ولتاژ جریان کمتری از آنها می‌گذرد. در این حالت روش‌های گرمایی قدیمی با توجه به خصوصیات جدید شبکه بهینه می‌شوند.

در اکثر موارد جریان ذوب کننده یخ باید برای خطوط انتقال طولانی خیلی بالا باشد. در این صورت، جریان DC با صرفه‌تر است، به خصوص برای خطوط ولتاژ بالای طولانی با هادی‌های با قطر بالا و این به خاطر حذف تلفات ایجاد شده در اثر توان راکتیو است. روش‌های اصلی بر مبنای اثر ژول در ادامه تشریح شده‌اند.

۳-۳-۱. یخ‌زدایی هادی

۳-۳-۱-۱. روش تغییر جریان بار

این روش به هیچ تجهیز اضافی نیاز ندارد و از اثر گرمای ناشی از تغییر جریان بار برای جلوگیری از یخ‌زدگی یا یخ‌زدایی هادی‌ها استفاده می‌کند. شرایط عادی بهره‌برداری باید عوض شود تا جریان بار بیشتری با تغییر مسیر جریان بین دو پست مشخص از هادی‌ها بگذرد. در این روش کنترل جریان در طول دوره یخ‌زدایی باید به دقت انجام شود. ابزارهای تصمیم‌گیری مناسب برای استراتژی یخ‌زدایی از طریق برنامه پخش بار بهینه توسعه داده شده‌اند.

۳-۳-۲. ولتاژ کاهش یافته، روش اتصال کوتاه

در این روش از اتصال کوتاه سه فاز در یک سر خط و منبع ولتاژ سه فاز در سر دیگر آن استفاده می‌شود. بسیاری از شرکت‌های برق منطقه‌ای در دنیا تجربیاتی در این زمینه دارند. از سال ۱۹۷۰ شرکت‌های کانادایی از جریان‌های اتصال کوتاه سه فاز برای ذوب یخ روی هادی استفاده می‌کرده‌اند. امروزه این روش‌ها می‌توانند در چندین هزار کیلومتر برای هادی ACSR تا قطر ۱۵mm بکار روند. در حال حاضر، ۹۰ ایستگاه در شبکه‌های فوق توزیع و انتقال کشور کانادا در حال استفاده از این روش هستند. ذوب یخ به طور مرتب نه تنها پس از طوفان‌های سخت همراه با برف، بلکه در آب و هوای سرد با بارش کمتر به عنوان پیشگیری از تشکیل یخ روی هادی‌ها به کار می‌رود. شدت جریان تابع ولتاژ اعمال شده، طول مدار و خصوصیات الکتریکی هادی است. به عنوان یک قانون تقریبی، به ترتیب در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع، امکان ایجاد جریان در طول ۲۵ و ۶۹ کیلومتر در خطوط تک سیم وجود دارد.

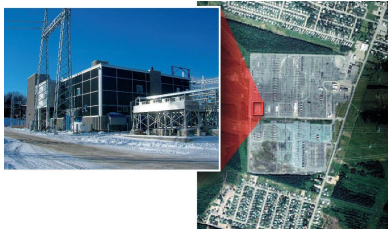
این روش نیازمند دو کلید در دو سر خط یکی برای تزریق توان به خطوط و در سر دیگر برای ایجاد اتصال کوتاه است. همچنین آستانه اضافه بار تجهیزات موجود مانند حفاظت باید افزایش یابد تا جریان یخ‌زدایی را تحمل کند.

۳-۳-۳. جریان DC

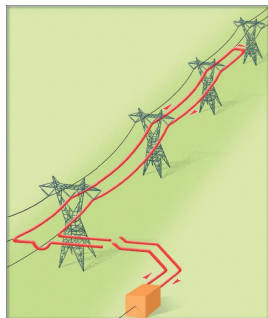
هر دو جریان AC و DC می‌توانند برای گرم کردن هادی‌های خطوط به کار روند. استفاده از جریان AC نیاز به تجهیزات اضافی ندارد، چون جریان مورد نیاز برای ذوب یخ می‌تواند مستقیماً از شبکه موجود تامین شود. برای ذوب یخ، ولتاژ و توان کلی اعمال شده به خصوص برای

خطوط انتقال طولانی باید بالا باشد. اگر طول خط و جریان مورد نیاز ذوب کوچک باشند، جریان AC می‌تواند با موفقیت به کار گرفته شود. جریان DC برای خطوط طولانی ولتاژ بالا که هادی‌های با قطر بالا دارند، کاربرد دارد، چون تلفات ایجاد شده در اثر توان راکتیو حذف می‌شود. این تکنولوژی در کشور روسیه توسعه یافته و با موفقیت برای ذوب یخ روی خطوط انتقال طولانی استفاده می‌شود. در کانادا از این روش با استفاده از یکسو کننده‌های DC برای یخ زدایی EHV نیز استفاده می‌شود (شکل ۶).

برای این خطوط، روش اتصال کوتاه با منبع AC توان بسیار زیادی نیاز دارد. یخ‌زدایی DC به تشکیل یک حلقه بسته با استفاده از هادی‌های نیاز دارد (شکل ۷).



شکل ۶- عکس هوایی و زمینی مبدل DC پست هیدرو-کبک کانادا



شکل ۷- یکی از دو مرحله مورد نیاز برای یخ‌زدایی هادی‌های خطوط

۳-۳-۴. یخ‌زدایی خطوط برقدار

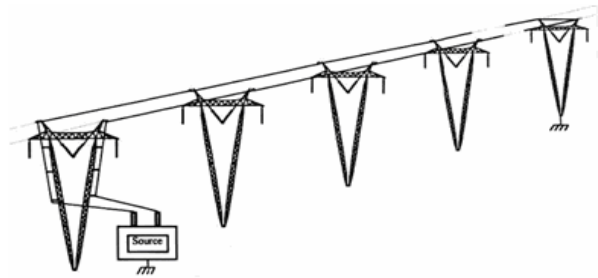
بیشتر روش‌های یخ‌زدایی اثر ژول (غیر از روش تغییر جریان بار) نیاز به قطع جریان الکتریکی جهت یخ‌زدایی دارند. برای غلبه بر این مشکل، در یک روش نسبتاً جدید از ترانسفورمرهای تغییر دهنده فاز^۱ (PST) استفاده می‌شود. این ترانسفورمرها، جریان بار را در خطوط انتقال کنترل می‌کنند. در هنگام یخ‌زدایی از PST برای ایجاد یک حلقه در خطوط انتقال استفاده می‌شود. با تنظیم دقیق شیفت فاز PST می‌توان در عین حفظ ولتاژ شبکه جریان عبوری از PST را افزایش داد. روش مشابهی با استفاده از PST برای غلبه بر تشکیل یخ در خطوط ۶۳ kV آمریکا به کار گرفته می‌شود. همچنین از این روش برای یخ‌زدایی خطوط انتقال تا سطح ۳۴۵ kV نیز استفاده می‌گردد.

این روش نیازمند کلیدزنی مناسب کلیدهای قدرت جهت ایجاد مسیر مناسب برای یخ‌زدایی است. با تغییر الگوی کلیدزنی می‌توان از این روش جهت جلوگیری از یخ‌زدگی خطوط انتقال نیز استفاده نمود.

۳-۳-۲. یخ‌زدایی سیم گارد (GW^۲)

یخ‌زدایی سیم گارد مسئله مهمی برای جلوگیری از تخریب شبکه انتقال در هنگام طوفان‌های سخت یخی است. یخ‌زدایی سیم گارد را می‌توان از

^۱ - Phase-shifting Transformers
^۲ - Ground Wire



شکل ۸- یخ‌زدایی همزمان از دو سیم گارد (ایجاد حلقه)

طریق اثر ژول با روش اتصال کوتاه ولتاژ پائین انجام داد. این روش نیازمند یک منبع جریان است (شکل ۸). یک ترانسفورمر ولتاژ متوسط که از مدار اصلی AC تغذیه می‌شود، می‌تواند به عنوان منبع جریان به کار رود. این روش برای یخ‌زدایی چندین کیلومتر سیم گارد بسیار مفید است. مشخصات عمده روش‌های اثر ژول و خصوصیات آنها در جدول ۵ بیان شده است. در ستون گستره استفاده، مانند جداول قبلی ملاحظات اقتصادی نیز در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- روش‌های جلوگیری از یخ‌زدگی بر مبنای کاهش نیروی کشش سطحی

| طول مورد حفاظت | نصب | دوام | قابلیت اعمال به خطوط هوایی | | | بازدهی | فرآیند | روش |
|------------------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-------|-----|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| | | | سیم گارد | هادی | | | | |
| | | | | باندل | تکی | | | |
| بخش‌های طولانی‌تر خطوط | در کارخانه | دائمی | x | x | x | بالا | نیروهای ضعیف بین مولکولی | مواد یخ‌زدای جامد |
| بخش‌های کوتاه خطوط | در سایت | نیاز به سرویس هر چند وقت یکبار | x | x | x | بالا برای آب و هوای سرد و برف مرطوب | نیروهای ضعیف بین مولکولی | مواد یخ‌زدای چسبناک |

جدول ۲- تکنیک‌های جلوگیری از یخ‌زدگی بر مبنای پیشگیری از یخ زدن قطرات سرد آب

| طول مورد حفاظت | نصب | دوام | قابلیت اعمال به خطوط هوایی | | | بازدهی | فرآیند | روش |
|------------------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-------|-----|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | | | سیم گارد | هادی | | | | |
| | | | | باندل | تکی | | | |
| بخش کوتاه خطوط | در سایت | نیاز به سرویس هر چند وقت یکبار | x | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد و برف مرطوب | ایجاد لایه آب در حدفاصل یخ و هادی | مانع کاهنده نقطه انجماد |
| بخش کوتاه خطوط | در کارخانه | دائمی | x | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | حفظ دمای مثبت در سطح هادی | پوشش فروالکتریکی |
| بخش‌های طولانی‌تر خطوط | در سایت | دائمی | x ^۱ | x | x | بالا برای برف مرطوب | حفظ دمای مثبت در سطح هادی | مواد فرومغناطیسی |
| بخش کوتاه خطوط | در سایت | دائمی | x | x | x | بالا برای برف مرطوب | حفظ دمای مثبت در سطح هادی | ردیاب الکتریکی |
| به بخش ۳-۳ مراجعه شود. | | | | | | | | اثر ژول |

جدول ۳- روش‌های یخ‌زدایی گرمایی

| طول مورد حفاظت | نصب | دوام | قابلیت اعمال به خطوط هوایی | | | بازدهی | فرآیند | روش |
|------------------------|------------|-------|----------------------------|-------|-----|------------------------|--|-----------------------|
| | | | سیم گارد | هادی | | | | |
| | | | | باندل | تکی | | | |
| بخش کوتاه و متوسط خطوط | در سایت | دائمی | x | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | تلفات دی‌الکتریکی در لایه یخ و اثر پوستی | فرکانس بالا |
| بخش‌های کوتاه خطوط | نیاز ندارد | دائمی | x | - | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | گرم کردن حد فاصل یخ و هادی | منبع رادیویی قابل حمل |
| به بخش ۳-۳ مراجعه شود. | | | | | | | | اثر ژول |

جدول ۴- روش‌های مکانیکی یخ‌زدایی

| گستره عملکرد | قابلیت حمل و نقل | قابلیت اعمال به خطوط هوایی | | | بازدهی | فرآیند | روش |
|----------------|------------------|----------------------------|-------|-----|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | سیم گارد | هادی | | | | |
| | | | باندل | تکی | | | |
| اسپین به اسپین | قابل حمل | x | x | x | بالا برای آب و هوای سرد | شکستن یخ | خراشنده‌های دستی یا غلتک |
| اسپین به اسپین | قابل حمل | x | x | x | بالا برای آب و هوای سرد | شکستن یخ | ROV |
| اسپین به اسپین | قابل حمل | x | x | x | بالا برای آب و هوای سرد | ایجاد شوک | ضربه دستی با یک طناب |
| اسپین به اسپین | قابل حمل | x | x | x | بالا برای آب و هوای سرد | ایجاد شوک با ضربه و انداختن وزن | ضربه با طناب و وزنه از هلیکوپتر |
| اسپین به اسپین | قابل حمل | x | - | - | بالا برای آب و هوای سرد | ایجاد شوک با ضربه مکانیکی | DAC |
| طول کوتاه خطوط | دائمی | x | - | x | بالا برای آب و هوای سرد | ارتعاشات القایی | AIC |

| گستره استفاده | تجهیزات اضافی | قابلیت اعمال به خطوط هوایی | | | بازدهی | فرآیند | روش |
|----------------|------------------------------------|----------------------------|-------|-----|------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | سیم گارد | هادی | | | | |
| | | | باندل | تکی | | | |
| طول متوسط خطوط | ندارد | - | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | عبور مقدار جریان بار بیشتر از یک مدار مشخص | روش تغییر بار |
| طول متوسط خطوط | کلید و افزایش ظرفیت تجهیزات حفاظتی | - | - | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | جریان اتصال کوتاه سفاز در خط | روش اتصال کوتاه با ولتاژ کاهش یافته |
| خطوط طولانی | میدل DC | - | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد و یخی | استفاده از جریان DC | جریان DC |
| خطوط طولانی | ترانسفورمر Phase-shifter | - | x | x | بالا برای آب‌وهوای سرد | استفاده از Phase-shifter برای کنترل پخش‌بار | یخ‌زدایی خطوط برق‌دار |
| طول متوسط خطوط | منبع AC اضافی | x | - | - | بالا برای آب‌وهوای سرد و یخی | استفاده از یک منبع AC بیرونی | ولتاژ AC کوچک |

۴. نتیجه‌گیری

- تمایل به استفاده از پوشش‌های یخ‌زدا در ۱۰ سال اخیر افزایش یافته است. این روش‌ها در حال توسعه هستند و حالت ایده‌آل آنها ماده‌ای است که یخ اصلاً نتواند روی آن جمع شود و در اثر وزن خود از روی هادی به پائین بریزد. با توجه به امکان وقوع مشکلات مشابه در نواحی سردسیر کشور و قطعی خطوط در موقعیت‌های نامساعد جوی، بروز خسارات جبران‌ناپذیر و پرهزینه به شبکه و پیشگیری از وقوع چنین حوادثی در خطوط انتقال نیرو بمنظور حفظ و بهبود امنیت شبکه، این مهندسين استفاده از روش‌های یخ‌زدایی و جلوگیری از یخ‌زدگی خطوط انتقال نیرو را اکیدا توصیه می‌نماید.

یکی از مشکلات شرکت‌های برق منطقه‌ای در مناطق سردسیر، یخ‌زدگی و نشست برف بر روی سیم‌های هادی و محافظ خطوط انتقال نیرو می‌باشد. طوفان‌های سنگین برف و یخ، صدمات قابل توجهی به خطوط انتقال نیرو وارد می‌کنند. این مشکلات در بخش‌های کوتاهی از خطوط انتقال و در زمانهای خاصی از سال اتفاق می‌افتد اما باعث تهدید جدی قابلیت اطمینان و امنیت شبکه می‌گردد. پر واضح است که هزینه کاهش امنیت شبکه از این طریق و مدت زمان طولانی در مدار نبودن خطوط انتقال بسیار بیش‌تر از هزینه فراهم کردن تمهیدات جلوگیری از یخ‌زدگی و یخ‌زدایی خطوط انتقال است.

در این مقاله روش‌های مختلف جلوگیری از یخ‌زدگی^۱ و یخ‌زدایی^۲ هادی‌ها و سیم‌های گارد تشریح شده‌اند. همه روش‌هایی که در حال حاضر بدین منظور به کار می‌روند، به غیر از آنها که تمایل کمی به استفاده از آنها وجود دارد، در این مقاله بررسی شده‌اند.

- شرکت‌های برق در سراسر دنیا در حال حاضر تمایل به استفاده از روش‌های گرمایی اثر ژول دارند، تا بتوانند در سطح گسترده خطوط هوایی شبکه برق را حفاظت کنند. این روش‌ها در بسیاری از کشورها برای چندین دهه استفاده شده‌اند و به همین علت به بلوغ کامل تکنولوژیکی رسیده‌اند. بازدهی آنها بستگی به انتخاب تکنولوژی مناسب با توجه به شرایط تحت بررسی دارد؛ بدین منظور باید شرایط آب و هوایی قسمت‌های مختلف خط و زمان‌های نیاز به برق‌دار بودن خط را بصورت هم‌زمان در نظر گرفت. در این زمینه باید هماهنگی لازم با تعمیرات و نگهداری به عمل آید و هم‌زمانی بین تعمیرات و یخ‌زدایی ایجاد شود تا زمان قطع برق به حداقل برسد.
- برای حفاظت بخش‌های کوتاه‌تر و استراتژیک خط روش‌های مکانیکی بهترین هستند. در این مقاله روش‌های مکانیکی عملی که در حال حاضر استفاده می‌شوند، بررسی و ارزیابی شده‌است. این روش‌ها به صورت دائمی روی خط نصب نمی‌شود و نیاز به نیروی انسانی دارند.

¹ - anti-icing
² - de-icing