پانزدهمین کنفرانس ملی کیفیت و بهره وری
۲۸ و ۲۹ بهمن ماه ۱۳۹۹

ارزیابی تلفات انرژی الکتریکی در روش‌های مختلف اتصال زمین پوشش محافظ کابل‌های فشارقوی کوره‌های قوس الکتریکی- مطالعه موردی: مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

احمدرضا جمالی ابنوی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، امیرمحمد انتخابی نوش‌آبادی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، حامد هاشمی دزکی[۱]، استادیار، عبدالرسول احمدی بنی[۲]، کارشناسی ارشد، احسان مهدوی منش[۲]، کارشناسی ارشد، محمدجعفر توکلی[۲]، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

– ahmadrezajamali@grad.kashanu.ac.ir, amirmohammad.entekhabi@grad.kashanu.ac.ir, hamed.hashemi@kashanu.ac.ir

۲- مدیریت انرژی و سیالات، شرکت فولاد مبارکه اصفهان، اصفهان، ایران

– a.ahmadibeni@msc.ir, e.mahdavimanesh@msc.ir, mj.tavakoli@msc.ir

چکیده:

اتصال پوشش محافظ کابل به زمین و انتخاب روش بهینه اتصال، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در بهره‌برداری از سیستم‌های کابلی فشارقوی است. انتخاب نادرست روش اتصال پوشش محافظ کابل به زمین، علاوه‌بر مشکلات فنی متعدد، مشکلات اقتصادی گوناگونی را به دنبال دارد. توجه به مسائل اقتصادی و تأکید بر آن در دنیای امروز، باعث شده است تا بسیاری از طرح‌های پیاده شده از دیدگاه اقتصادی مورد مطالعه قرار گیرند. باتوجه به اینکه روش‌های متعددی برای اتصال پوشش محافظ کابل به زمین وجود دارد، روش که از دیدگاه اقتصادی در وضعیت بهتری باشد و به اصطلاح سودآوری بالاتری را ارائه دهد، در اولویت است. یکی از مهم‌ترین موضوعاتی که باعث غیراقتصادی شدن روش‌های اتصال پوشش محافظ کابل به زمین می‌شود، موضوع تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ کابل است که هزینه‌های بعضاً هنگفتی را بر سیستم تحمیل می‌کند. از نظر اقتصادی روش اتصال به زمینی مناسب ارزیابی می‌شود که سودآور بوده و در عین حال دوره بازگشت سرمایه مناسبی نیز داشته باشد. در این مقاله به بررسی اقتصادی سیستم کابلی ۶۳ کیلو ولت تغذیه‌کننده واحدهای کوره قوس الکتریکی و جبرانساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) مجتمع فولاد مبارکه اصفهان پرداخته شده است. ارزیابی انجام شده در این مقاله بر اساس تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ کابل ناشی از روش‌های مختلف اتصال به زمین موجود انجام شده است. نتایج به‌دست آمده دلالت بر کاهش تلفات انرژی الکتریکی در سیستم کابلی با روش یک‌سو زمین کردن و استفاده از محدودکننده‌های ولتاژ پوشش محافظ کابل (SVL) و اقتصادی‌بودن اجرای آن به‌جای دو سو زمین‌کردن بدون SVL است.

واژه های کلیدی: ارزیابی اقتصادی، کوره‌های قوس الکتریکی، مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، کابل‌های فشارقوی، پوشش محافظ کابل، نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، آنالیز حساسیت.

نام نویسنده مسئول: **حامد هاشمی دزکی**

آدرس نویسنده مسئول: **دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.**

۱- مقدمه

فولادسازی به عنوان یکی از صنایع کلیدی و راهبردی در جهان امروز به شمار می‌رود [۱، ۲]. اهمیت این صنعت به قدری است که ردپای آن در اکثر صنایع بزرگ امروز دیده می‌شود. تولیدات صنعت فولادسازی به عنوان مواد پایه و اولیه در بسیاری از صنایع مانند خودروسازی، صنایع ساختمانی، راه و شهرسازی، تولید لوازم خانگی و ... شناخته می‌شود [۲، ۳]. بنابراین می‌توان صنعت فولاد را به عنوان یکی از ارکان قدرت اقتصادی هر کشور تلقی نمود [۴].

ایران نیز به عنوان یکی از کشورهای در حال توسعه، حرکت مناسبی در جهت تولید فولاد در پیش گرفته است. به طوریکه تاکنون نزدیک به ۱۱۱ شرکت و مجتمع در زمینه تولید انواع مشتقات فولاد مشغول به فعالیت هستند [۵]. بزرگترین قطب تولید فولاد کشور، در استان اصفهان واقع شده است. شرکت فولاد مبارکه اصفهان بزرگترین تولیدکننده فولاد کشور است که ظرفیتی برابر با ۷/۲ میلیون تن را به نام خود اختصاص داده است که در نوع خود بی‌نظیر است.

ساخت فولاد مرغوب نیازمند طی نمودن مراحلی است که از میان آن‌ها مرحله ذوب قراضه‌ها می‌تواند به عنوان مهمترین در نظر گرفته شود. روش‌های گوناگونی در جهت تولید فولاد مذاب در سراسر جهان استفاده می‌شود. اما روشی که بتواند بهره‌وری مناسبتری نسبت به سایرین ایجاد کند، در الویت قرار دارد. مطالعات انجام شده در این حوزه نشان می‌دهند که در میان روش‌های تولید فولاد مذاب، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی میزان بهره‌وری را تا حد مناسبی افزایش می‌دهند [۶]. به‌طوری که این روش جایگزین سایر روش‌های معمول شده و پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه چندان دور، ردی از سیستم‌های قدیمی نباشد و کوره‌های قوس‌الکتریکی جایگزین بی چون و چرایی برای این سیستم‌ها شود [۶].

مانند بسیاری از سیستم‌های الکتریکی دیگر، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی با چالش‌هایی همراه است [۷-۹]. انتقال انرژی الکتریکی به واحدهای کوره قوس، نه تنها باید به صورت ممتد و بدون قطعی باشد، بلکه باید منطبق با رژیم بهره‌برداری خاص این واحدها طراحی و اجرا شده باشد تا میزان تنش‌های ایجاد شده در سیستم را به مقدار حداقل خود برساند.

سیستم انتقال و توزیع انرژی الکتریکی واحدهای کوره قوس الکتریکی از بخش‌های متعددی تشکیل شده است که در این میان نقش کابل‌های فشارقوی مورد استفاده، به واسطه تنش‌های ایجاد شده ناشی از رژیم بهره‌برداری خاص کوره‌های قوس الکتریکی پررنگ است. یکی از پایه‌ای‌ترین عواملی که در سیستم‌های کابلی و به‌خصوص سیستم کابلی واحدهای کوره قوس نمود پیدا می‌کند، میزان تلفات ایجاد شده در آن‌هاست که به افزایش تنش‌های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی متعددی در سیستم کابلی منجر می‌گردند [۱۰-۱۲].

علاوه‌بر مشکلات فنی که ممکن است به واسطه تلفات بالای یک سیستم کابلی ایجاد شوند [۱۳]، مشکلات اقتصادی نیز به عنوان یکی از اهرم‌های ارزیابی پروژه‌های فنی مطرح خواهند شد [۱۴]. افزایش تلفات هر سیستم، به معنای تلف کردن وقت، هزینه و نیروی متخصص خواهد بود که از نگاه اقتصادی، بهبود شرایط فعلی در گرو کاهش تلفات سیستم است. راه‌حل‌های فنی مختلفی وجود دارد تا بتوان از آن‌ها در جهت افزایش بهره‌وری سیستم بهره جست؛ با این حال، طرحی که خود از مزایای اقتصادی بیشتری برخوردار باشد، در اؤلویت است.

یکی از ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های ممکن در کاهش تلفات سیستم کابلی، ایجاد اصلاحات در اتصال پوشش محافظ کابل (شیلدوایر) به زمین است [۱۳، ۱۵]. اتصال پوشش محافظ کابل از دو سمت به زمین، غالباً به دلیل سادگی و هزینه اجرای کمتر، به عنوان روش پایه اتصال پوشش محافظ به زمین در نظر گرفته می‌شود [۱۵، ۱۶]. در مقابل استفاده از این روش، باعث ایجاد جریان گردشی در پوشش محافظ کابل گشته و تلفات بیشتر را در سیستم کابلی ایجاد می‌کند [۱۷]. یکی از راه‌حل‌های اصلاحی، استفاده از زمین یک‌طرفه و کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل است که از آن به عنوان اقدامات اصلاحی در جهت کاهش تلفات پوشش محافظ یاد می‌شود [۱۶، ۱۸-۲۰].

موضوع حائز اهمیت این است که علی‌رغم کاهش تلفات پوشش محافظ با استفاده از اقدامات اصلاحی، این روش‌ها خود مشکلات دیگری را به نوبه خود ایجاد خواهند کرد [۲۱-۲۳]. این مشکلات هم از جنبه فنی و هم از نظر اقتصادی انتخاب‌های گوناگونی را در اختیار خواهند گذاشت. از این رو، روشی که بتواند کمترین هزینه و بیشترین کارآیی و بهره‌وری را ایجاد کند مطلوب خواهد بود.

در این مقاله سعی شده است به موضوع کاهش تلفات پوشش محافظ کابل‌های تغذیه‌کننده واحدهای کوره قوس‌الکتریکی مجتمع فولاد مبارکه پرداخته شود. براین اساس، ابتدا موضوع اتصالات مختلف پوشش محافظ به زمین مورد بررسی قرار خواهد گرفت، تلفات ناشی از هر روش محاسبه، اجرای آن‌ها امکان‌سنجی شده و نهایتاً اقتصادی‌ترین روش برای سیستم زمین پوشش محافظ با رعایت اصول فنی و اقتصادی معرفی خواهد شد.

۲- انواع روش‌های مورد استفاده برای اتصال پوشش محافظ کابل به زمین

براساس استاندارد [۱۶]، سه روش اصلی برای اتصال پوشش محافظ کابل به زمین وجود دارد. روش پایه و ساده به عنوان اتصال دوطرفه پوشش محافظ به زمین شناخته می‌شود. در پی ایجاد جریان‌های گردشی در پوشش محافظ در حین استفاده از این روش و ایجاد تلفات زیاد در کابل [۱۵، ۲۰]، روش‌های اصلاحی در جهت کاهش اثرات منفی ناشی از اتصال دوطرفه پوشش محافظ به زمین، معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است که در ادامه به بررسی کلیه روش‌های اتصال پرداخته خواهد شد.

۲-۱- روش اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل به زمین

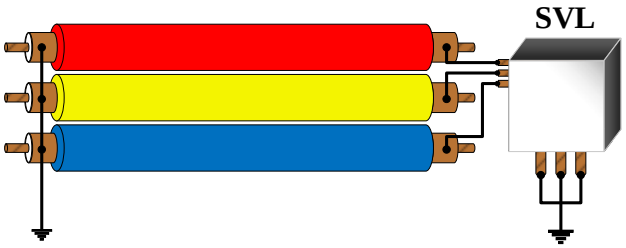
ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش اتصال پوشش محافظ به زمین، استفاده از اتصال دوطرفه پوشش محافظ به زمین است [۱۶]. در این روش، پوشش محافظ کابل در نقطه ابتدایی و انتهایی آن به زمین متصل می‌شود. آرایش اتصال پوشش محافظ به زمین از دو طرف، در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: آرایش اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل به زمین

یکی از مهمترین ایرادات وارد بر این روش، ایجاد جریان گردشی بزرگ در پوشش محافظ است که باعث افزایش تلفات پوشش محافظ خواهد شد.

۲-۲- روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل به زمین

یکی از روش‌هایی که تا حد زیادی اثرات ناشی از جریان گردشی را در پوشش محافظ کابل کاهش می‌دهد، روش اتصال پوشش محافظ کابل از یک نقطه است که معمولاً این نوع اتصال در نقطه ابتدایی و یا انتهایی کابل ایجاد می‌شود. آرایش این اتصال به صورت شکل ۲ است.



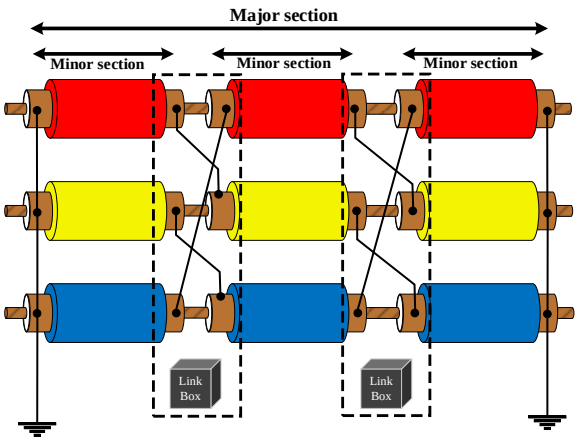
شکل ۲: آرایش اتصال پوشش محافظ کابل به زمین از یک طرف

از مهم‌ترین محاسن این روش، کاهش جریان گردشی در پوشش محافظ کابل است که میزان تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ را به مقدار قابل‌توجهی کاهش خواهد داد. اما باید توجه داشت که استفاده از این روش، جریان‌های ادی را از پوشش محافظ کابل حذف نخواهد کرد و تلفات ناشی از آن هم‌چنان در کابل وجود دارد. در مقابل، یکی از مهمترین چالش‌ها، ایجاد ولتاژهای القایی در انتهای کابل، خواهد بود. این موضوع به دلیل عدم ایجاد مسیر عبور جریان‌های القایی از پوشش محافظ کابل به زمین است. در صورت تجاوز ولتاژ القا شده در پوشش محافظ از مقدار شکست عایق پوشش خارجی کابل به خصوص در زمان وقوع خطا، پوشش خارجی دچار تخلیه جزئی شده و به مرور زمان شکست عایقی اتفاق می‌افتد که باعث کاهش طول عمر مفید کابل می‌گردد. برای جلوگیری از این پدیده، استفاده از محدود ساز ولتاژ پوشش محافظ کابل (SVL) پیشنهاد می‌گردد. در صورتی که ولتاژ القا شده در پوشش محافظ از مقدار مشخصی

عبور نماید، SVL وظیفه دارد تا مسیر تخلیه ولتاژ القایی پوشش محافظ را فراهم آورد.

۳-۲- روش کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل

یکی دیگر از روش‌های اصلاحی کاهش جریان گردشی در پوشش محافظ کابل، استفاده از کراس‌باندینگ است. در این نوع از اتصال پوشش محافظ کابل به زمین، طول کلی کابل به سه قسمت مساوی تقسیم شده و دو سر ابتدایی و انتهایی کابل اصلی به زمین متصل گردیده و پوشش‌های محافظ هر فاز با آرایش مشخصی به یکدیگر متصل می‌شوند (مطابق شکل ۳). در این حالت، تلفات ناشی از جریان گردشی نسبت به حالت اتصال دوطرفه تا حد خوبی کاهش یافته و در عین حال، ولتاژ القایی در انتهای هر بخش نیز در مقدار کمتری نسبت به حالت اتصال یک‌طرفه محدود می‌شوند. بنابراین، با این روش می‌توان هم جریان گردشی و هم ولتاژ القایی را در مقدار مناسبی کنترل نمود. اصلی‌ترین ایراد این روش از اتصال، پیچیدگی آن در زمان نصب و هم‌چنین تعمیرات است. ضمناً هزینه‌های اجرایی آن نصبت به دو روش دیگر بسیار بالا بوده و در بسیاری از موارد، مقرون به صرفه نیست. لازم‌به‌ذکر است که کلیه اتصالات پوشش محافظ کابل در جعبه‌های مخصوص اتصال (Link-Box) صورت می‌گیرد که در شکل ۳ مشخص است.



شکل ۳: آرایش کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل

۳- بررسی سیستم مورد مطالعه

باتوجه به اهمیت استراتژیک فولاد مبارکه، مطالعات انجام شده در این مقاله پیرامون کابل‌های ۶۳ کیلوولت مورد استفاده در واحدهای کوره قوس الکتریکی و جبرانساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) مجتمع فولاد مبارکه اصفهان خواهد بود. در بررسی سیستم کابلی مورد مطالعه، تأثیر کابل‌های مورد استفاده و رژیم بهره‌برداری از کابل‌ها بسیار موضوع شاخصی می‌باشد.

در راستای اتصال واحدهای کوره‌های قوس الکتریکی به شبکه توزیع انرژی الکتریکی، از کابل‌های ۶۳ کیلوولت N2XSY با سطح مقطع ۸۰۰ میلی‌متر مربع استفاده شده است. ساختمان کابل‌های مورد مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است. هم‌چنین مشخصات فیزیکی و ساختاری هر یک از اجزای داخلی کابل به صورت جدول (۱) خواهد بود.

شکل ۴: ساختمان داخلی کابل مورد مطالعه

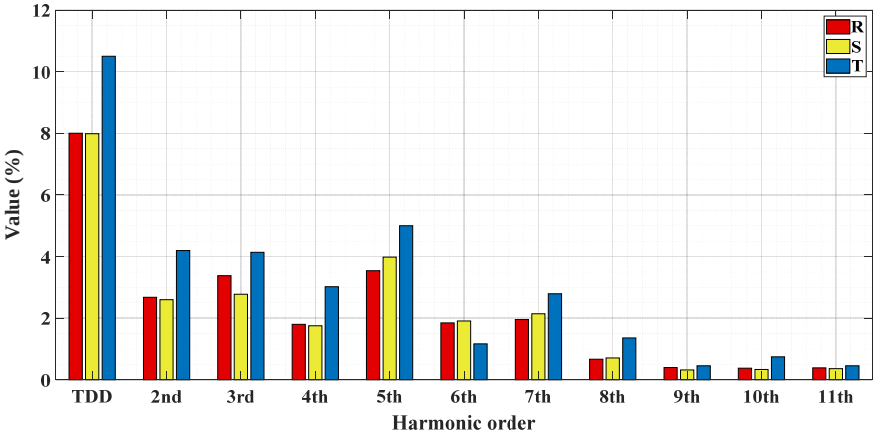
هر واحد کوره، به‌وسیله یک فیدر دو مداره سه‌فاز موازی تشکیل شده است که از هر مدار، جریانی در حدود ۵۲۵ آمپر عبور خواهد کرد که در مجموع هر فیدر جریانی معادل با ۱۰۵۰ آمپر خواهد داشت. باتوجه‌به عملکرد خاص کوره‌های قوس الکتریکی به عنوان بارهای غیرخطی، هارمونیک‌های متعددی ناشی از عملکرد این واحدها در سیستم کابلی ایجاد می‌شود که شامل هارمونیک‌های زوج و فرد در سیستم خواهد شد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در یکی از فیدرهای کابلی مورد مطالعه بیانگر این مهم می‌باشد که در شکل ۵ قابل مشاهده است.

کوره‌های قوس الکتریکی در مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، ظرفیتی معادل با ۲۰۰ تن در هر ذوب دارند. باتوجه به خط مشی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، تولید سالانه این مجتمع به مقدار ۷٫۲ میلیون تن می‌رسد. از سوی دیگر، هر ذوب به اندازه ۱۰۰ دقیقه به طول می‌انجامد که ۸۰ دقیقه عملکرد کوره و ۲۰ دقیقه استراحت آن و تخلیه مواد مذاب را در بر خواهد داشت. بنابراین، هر کوره در یک روز به طور میانگین ۱۲ نوبت فرآیند

ذوب را تجربه می‌کند که ۹۶۰ دقیقه معادل ۱۶ ساعت عملکرد را شامل می‌شود.

جدول ۱: مشخصات اجزای داخلی و سینی کابل مورد مطالعه

ردیف	اجزاء	جنس	رسانایی الکتریکی (زیمنس/متر)	نفوذپذیری الکتریکی	ابعاد (میلی‌متر)
۱	هادی	مس استرند شده	۶×۱۰^{۷}	۱	شعاع: ۱۷
۲	عایق	XLPE	۱×۱۰^{-۱۸}	۲٫۲۵	ضخامت: ۱۰٫۵
۳	نیمه‌هادی	Semi-con compound	۲	۲٫۲۵	ضخامت: ۱٫۲
۴	پوشش محافظ	رشته مس	۶×۱۰^{۷}	۱	ضخامت: ۰٫۱×۱۰
۵	پوشش خارجی	PVC	۱×۱۰^{-۱۸}	۸	ضخامت: ۳٫۲
۶	سینی کابل	آلومینیوم	$۳٫۷۷\times۱۰^{۷}$	۱	ضخامت : ۱



شکل ۵: توزیع هارمونیکی جریان اندازه‌گیری شده در یکی از فیدرهای کابلی کوره‌های قوس الکتریکی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

۴- شبیه‌سازی نرم‌افزاری حرارتی سیستم کابلی

روش‌های متعددی برای محاسبه میزان تلفات ایجاد شده در پوشش خارجی کابل وجود دارد که یکی از دقیق‌ترین آن‌ها استفاده از نرم‌افزارهایی است که مبتنی بر تئوری اجزای محدود استوار می‌باشند. یکی از شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزارهای این حوزه، COMSOL Multiphysics است که دقت مناسبی برای مطالعات فیزیک‌های مختلف دارد. در این مقاله نیز، محاسبات تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ کابل، از طریق ماژول مغناطیسی این نرم‌افزار (Magnetic field) و مطالعه در حوزه فرکانس صورت گرفته است.

۴-۱- ایجاد هندسه مورد مطالعه

اولین گام برای مطالعه سیستم فعلی، ایجاد هندسه مربوط به آن است. در این مطالعه، هر مدار به صورت یک سیستم ۳ فاز متشکل از کابل‌های ۶۳ کیلوولت است که در فاصله ۳۰ میلیمتری از یکدیگر در سینی کابل قرار گرفته اند. آرایش قرار گیری کابل‌ها در کنار یکدیگر به صورت شکل ۶ است.

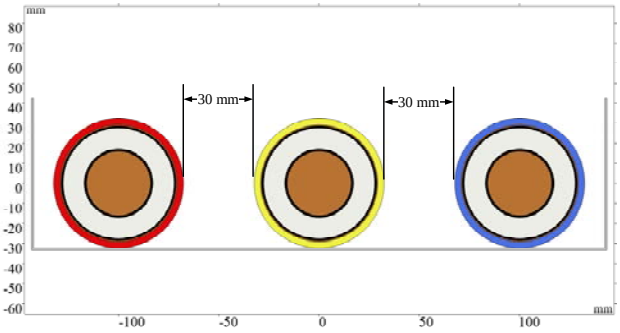
۴-۲- شرایط مرزی حاکم

برای هر یک از روش‌های اتصال پوشش محافظ کابل به زمین، می‌توان شرایط مرزی مشخص کرد که بتوانند بیانگر روش مربوطه در مطالعات نرم‌افزاری باشند.

۴-۲-۱- شرایط مرزی حاکم در روش اتصال دوطرفه

در این حالت، با توجه به اینکه کابل در هر دو نقطه ابتدایی و انتهایی خود به زمین متصل است، کافی است که شرایط زیر اعمال شود:

- هادی: هادی کابل شامل جریان مؤلفه اصلی و جریان‌های هارمونیکی است که برای هادی هر فاز مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۵ را به عنوان جریان هر هادی وارد نرم‌افزار می‌کنیم.
- پوشش محافظ کابل: باتوجه به اینکه پوشش محافظ کابل در روش اتصال دوطرفه در هر دو نقطه ابتدایی و انتهایی خود به زمین متصل است، بنابراین ولتاژ آن در این دو نقطه صفر خواهد بود.



شکل ۶: آرایش قرارگیری کابل‌ها در کنار یکدیگر

۴-۲-۲- شرایط مرزی حاکم در روش اتصال یک‌طرفه

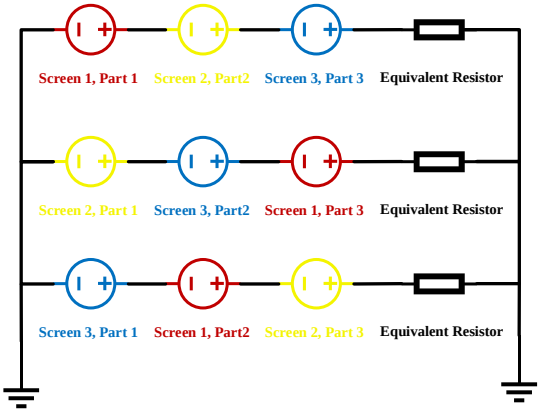
در این روش، پوشش محافظ در یک نقطه، معمولاً نقطه ابتدایی، به زمین متصل شده و انتهای کابل نسبت به زمین ایزوله شده است.

- هادی: شرط مرزی حاکم بر هادی در این روش نیز تغییر نکرده و مانند حالت قبل خواهد بود.
- پوشش محافظ: از آنجایی که نقطه انتهایی کابل نسبت به زمین ایزوله شده است و مسیر عبور جریان گردشی در این نقطه وجود ندارد، برای محاسبه ولتاژ القاء شده در نقطه انتهایی پوشش محافظ کابل، کافی است جریان نقطه انتهایی پوشش محافظ کابل را صفر درنظر گرفت.

۴-۲-۳- شرایط مرزی حاکم در روش کراس‌باندینگ

علاوه‌بر شرایط مرزی هادی و پوشش محافظ که در دو روش دیگر نیز مشاهده شد، در این روش، با در نظرگرفتن اینکه اتصالات در فواصل مشخص و در هر یک‌سوم طول کابل انجام می‌شود، باید این موضوع نیز در فیزیک مورد مطالعه بررسی شود. آرایش مداری اتصال پوشش محافظ در فازهای مختلف سیستم کابلی مورد مطالعه به صورت شکل ۷ است. این مدار مطابق با آرایش اتصال کراس‌باندینگ شکل ۳ رسم شده است. در مطالعات نرم‌افزاری، جریان عبوری از پوشش محافظ به صورت ولتاژ القایی در هر قسمت تقسیم بر مقاومت کلی پوشش محافظ بدست می‌آید که در شکل ۷ مشخص شده است. بنابراین، شرایط مرزی حاکم بر روش کراس‌باندینگ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

- طول کابل: طول کابل در هر فیزیک برابر با یک‌سوم طول کلی کابل است.
- هادی: جریان عبوری از هادی کماکان تغییری نداشته و مانند دو روش قبل اعمال می‌گردد.
- پوشش محافظ: اعمال شرایط مرزی به پوشش محافظ کابل مطابق با شکل ۷ اعمال می‌شود.



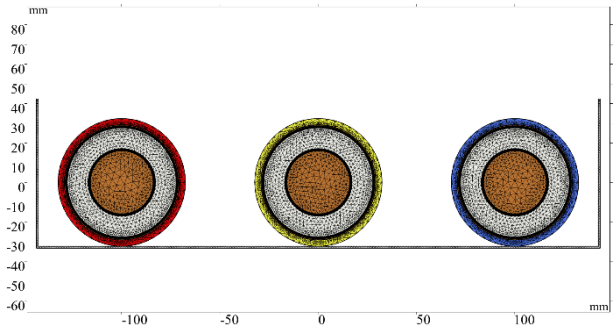
شکل ۷: آرایش مداری اتصال پوشش محافظ فازهای مختلف به یکدیگر در روش کراس‌باندینگ

۴-۲-۴- مش‌بندی

در هر نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزاء محدود، برای مطالعه فیزیک مورد نظر نیاز به مش‌بندی احساس می‌شود. ابزار تولید مش در نرم‌افزار کامسول یکی از قدرتمندترین ابزار مش در بین نرم‌افزار اجزاء محدود است که در این مطالعات نیز از آن بهره‌گرفته شده است. مش ایجاد شده به صورت شکل ۸ تولید شده است.

۴-۳- پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر اساس نتایج کیفیت توان و اطلاعات واقعی

پس از انجام تنظیمات اولیه، نوبت به محاسبات و انجام مطالعه در مورد فیزیک مورد نظر در نرم‌افزار می‌رسد. به این منظور در این مقاله از روش مطالعاتی در حوزه فرکانس استفاده شده است. برای بررسی اثرات جریان‌های هارمونیکی، اثر هر مرتبه هارمونیکی در فرکانس مربوط به آن انجام شده و مقدار تلفات ایجاد شده ناشی از آن محاسبه گردیده و در نهایت کلیه مقادیر تلفات در پوشش محافظ ناشی از همه طیف فرکانسی‌ها با یکدیگر جمع شده و مقدار نهایی آن محاسبه گردیده است.



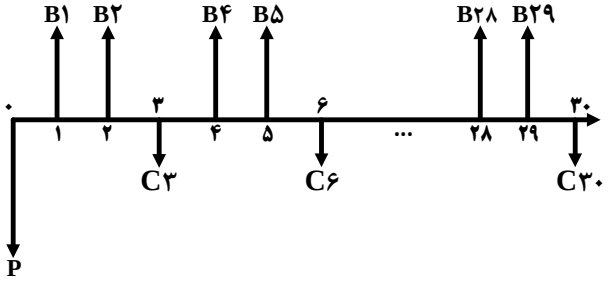
شکل ۸: مش‌بندی سیستم کابلی مورد مطالعه

۵- تشریح روش ارزیابی اقتصادی

روش‌های مختلفی در جهت ارزیابی اقتصادی طرح‌ها وجود دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها، ارزیابی طرح بر اساس ارزش فعلی خالص است که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته است. براین اساس، کلیه‌ی هزینه‌ها اعم از هزینه تلفات، هزینه اولیه و هزینه تعمیرات و نگه‌داری مربوط به طرح و کلیه درآمدهای ناشی از اجرای آن طرح در زمان فعلی مطابق با نرخ تنزیل معادل‌سازی شده و نهایتاً ارزش فعلی طرح مطابق با رابطه (۱) [۲۴، ۲۵] محاسبه می‌گردد. طرحی که ارزش فعلی مثبتی داشته باشد، اقتصادی تلقی می‌شود.

$$NPV = \frac{\sum_{j=1}^{J}\left(B_j - C_j\right)\left(1+k\right)^j}{\left(1+i\right)^j} - P \qquad (1)$$

که در این رابطه، که در این رابطه NPV ارزش فعلی خالص، B_j سود ناشی از کاهش تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ کابل در روش اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل در دوره j ام، C_j هزینه تعمیر و نگهداری طرح که هر سه سال یکبار انجام می‌شود، k نرخ تورم، i نرخ تنزیل، J دوره زمانی مورد مطالعه طرح (طول عمر طرح) و P هزینه اولیه اجرای طرح مورد نظر است. مطابق گفته‌ها فرآیند مالی مورد استفاده برای دوره مطالعه ۳۰ ساله به صورت شکل ۹ است.



شکل ۹: روند مالی اجرای روش اتصال پوشش محافظ به زمین

در کنار این موضوع، طرحی که بتواند سریعتر هزینه‌های انجام شده را جبران نماید، از نظر اقتصادی قوی‌تر خواهد بود. از این رو، دوره بازگشت سرمایه به صورت رابطه (۲) [۲۴، ۲۵] قابل محاسبه است.

$$DPP = j \xrightarrow{when} \frac{\sum_{j=1}^{J}\left(B_j - C_j\right)\left(1+k\right)^j}{\left(1+i\right)^j} = P \qquad (2)$$

در واقع دوره بازگشت سرمایه، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا طرح اجرا شده، هزینه‌ی اولیه مربوط به خود را جبران نماید.

لازم‌به‌ذکر است، دو پارامتر B_j و C_j به صورت مستقیم به میزان تلفات و بهای انرژی وابسته هستند. میزان تلفات نیز خود پارامتری بر حسب طول کلی کابل است و هزینه انرژی مطابق با تعرفه مصرف‌کننده صنعتی وزارت نیرو در سال ۱۳۹۹ محاسبه شده است (جدول ۲) [۲۶].

جدول ۲: بهای مصرف انرژی مشترکین با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات

بهای مصرف انرژی الکتریکی (ریال/کیلووات ساعت)		
ساعات میان‌باری	ساعات اوج بار	ساعات کم‌باری
۶۹۳	۱۳۸۶	۳۴۶٫۵

باتوجه به اینکه میان‌باری، اوج بار و کم‌باری به ترتیب ۱۲، ۴ و ۸ ساعت از یک روز را تشکیل می‌دهند، فرض شده است که هر

یک متناسب با زمان تأثیر در ۲۴ ساعت شبانه روز، در ۱۶ ساعت زمان عملکرد کوره قوس الکتریکی نقش داشته باشند.

از این رو، می‌توان پارامترهای ضروری مورد استفاده در این مطالعه را به صورت جدول ۳ بیان نمود.باید اشاره شود که مقدار k و i به ترتیب برابر با نرخ میانگین تورم در سال ۱۳۹۸ و بالاترین نرخ بهره بانکی (نرخ تنزیل) در سال ۱۳۹۹ در نظر گرفته شده اند.

پیرامون بخش‌های قبل، در این بخش از مقاله به بررسی اقتصادی هر یک از روش‌های اتصال پوشش محافظ کابل به زمین پرداخته خواهد شد. هزینه‌های ناشی از تلفات، اجرای سیستم مورد نظر، سود ناشی از کاهش تلفات و هزینه تعمیرات و نگهداری از جمله مواردی است که در مطالعات اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۳: پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی اقتصادی طرح اتصال پوشش محافظ کابل به زمین

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	هزینه تمام شده انرژی (ریال/کیلووات‌ساعت)	۶۹۳٫۲۲
۲	طول کلی کابل مورد استفاده (متر)	۱۴۶۰۰
۳	تورم سالیانه	۳۵٪
۴	نرخ تنزیل سالیانه	۱۸٪
۵	عمرمفید	۳۰ سال

۵-۱- ارزیابی اقتصادی روش اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل به زمین

در بررسی این طرح ابتدا فرض می‌شود که سیستم فعلی مورد استفاده از همین نوع است، بنابراین هزینه اجرای اولیه در این طرح صفر است.

مطابق شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس، میزان تلفات ایجاد شده ناشی از هر مرتبه هارمونیکی در مجموعه سه‌فاز سیستم کابلی مطابق با شرایط فعلی بهره‌برداری مجتمع فولاد مبارکه اصفهان به شرح جدول ۴ است. براین مبنا، اتلاف انرژی الکتریکی ناشی از اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل به زمین در یک روز، ۲۴۱۹/۵۱۲ کیلو وات خواهد بود که هزینه‌ای برابر با ۱/۶۷۷ میلیون ریال در هر روز خواهد داشت که در یک سال معادل ۶۱۲/۱۹۷ میلیون ریال هزینه تلفات انرژی ناشی از روش اتصال دوطرفه پوشش محافظ کابل به زمین خواهد بود.

جدول ۴: تلفات پوشش محافظ کابل ناشی از اتصال دوطرفه آن

ردیف	مؤلفه جریان	مقدار تلفات (وات/متر)
۱	مؤلفه اصلی جریان	۱۰٫۱۹۲۴
۲	هارمونیک دوم	۰٫۰۱۹۹۸
۳	هارمونیک سوم	۰٫۰۳۰۲
۴	هارمونیک چهارم	۰٫۰۱۵۵
۵	هارمونیک پنجم	۰٫۰۶۲۰
۶	هارمونیک ششم	۰٫۰۱۱۰
۷	هارمونیک هفتم	۰٫۰۲۲۳
۸	هارمونیک هشتم	۰٫۰۰۴۰
مجموع تلفات		۱۰٫۳۵۷۵

۵-۲- ارزیابی اقتصادی روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل به زمین

همانطور که اشاره شد، یکی از روش‌های مناسب برای کاهش اثرات جریان گردشی، استفاده از روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل به زمین است. نتایج شبیه‌سازی نیز موید این موضوع می‌باشند. میزان تلفات محاسبه شده در شبیه‌سازی نرم‌افزاری، به صورت جدول ۵ آورده شده است. میزان این تلفات به دلیل وجود جریان فوکو در پوشش محافظ کابل است.

جدول ۵: تلفات پوشش محافظ کابل ناشی از اتصال یک‌طرفه آن

ردیف	مؤلفه جریان	مقدار تلفات (وات/متر)
۱	مؤلفه اصلی جریان	۰٫۴۷۷۳
۲	هارمونیک دوم	۰٫۰۰۱۵
۳	هارمونیک سوم	۰٫۰۰۳۲
۴	هارمونیک چهارم	۰٫۰۰۲۱
۵	هارمونیک پنجم	۰٫۰۱۰۱
۶	هارمونیک ششم	۰٫۰۰۲۲
۷	هارمونیک هفتم	۰٫۰۰۴۶
۸	هارمونیک هشتم	$۹٫۲۵\times۱۰^{-۴}$
مجموع تلفات		۰٫۵۰۲۰

لذا، مقدار انرژی تلف شده در شرایط بهره‌برداری مجتمع فولاد مبارکه اصفهان در طی یک روز، ۱۱۷/۲۷ کیلو وات خواهد شد که هزینه‌ای برابر با ۸۱/۲۹۳ هزار ریال در یک روز خواهد داشت که معادل با ۲۹/۶۷۲ میلیون ریال سالانه خواهد شد. ارزیابی تلفات نشان می‌دهد که روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل، الویت زیادی نسبت به روش اتصال دوطرفه دارد. با این حال، یکی از مشکلات عمده در روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل، ولتاژ القایی پوشش محافظ کابل است که باعث بروز مشکلات عایقی در پوشش خارجی کابل می‌گردد. ولتاژهای القایی در پوشش محافظ کابل در شرایط مختلف بهره‌برداری با کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: ولتاژ القایی پوشش محافظ در حالت یک‌سو زمین شدن

فیدر	شرایط بهره‌برداری	ولتاژ القایی (kV)
MF1	شرایط عادی	۰٫۰۴۳
	خطای سه‌فاز	۲٫۶۷
	خطای تک‌فاز فاز R	۳٫۷
MF2	شرایط عادی	۰٫۰۵۳۵
	خطای سه‌فاز	۳٫۲۲
	خطای تک‌فاز فاز R	۴٫۵
MF3	شرایط عادی	۰٫۰۳۳۵
	خطای سه‌فاز	۲٫۱
	خطای تک‌فاز فاز R	۲٫۹
MF4	شرایط عادی	۰٫۰۳۹
	خطای سه‌فاز	۲٫۴۱
	خطای تک‌فاز فاز R	۳٫۴
MF5	شرایط عادی	۰٫۰۴۶
	خطای سه‌فاز	۲٫۸۵
	خطای تک‌فاز فاز R	۴
MF6	شرایط عادی	۰٫۰۵۲
	خطای سه‌فاز	۳٫۱۳
	خطای تک‌فاز فاز R	۴٫۴
MF7	شرایط عادی	۰٫۰۷۳
	خطای سه‌فاز	۴٫۵
	خطای تک‌فاز فاز R	۶٫۴
MF8	شرایط عادی	۰٫۰۸۲
	خطای سه‌فاز	۵٫۰۶
	خطای تک‌فاز فاز R	۷٫۱۵
SVC	شرایط عادی	۰٫۰۱۷
	خطای سه‌فاز	۱٫۲
	خطای تک‌فاز فاز R	۱٫۶

باتوجه به ولتاژ القایی زیاد در پوشش محافظ کابل‌های تغذیه‌کننده کوره قوس الکتریکی، برای محدود ساختن این ولتاژ القایی و کاهش خرابی‌های کابل ناشی از آن، استفاده از محدودساز ولتاژ پوشش محافظ (SVL) پیشنهاد می‌شود. بر این اساس، هزینه اجرا و تعمیرات و نگه‌داری به صورت جدول ۷ خواهد بود.

جدول ۷: هزینه نصب، اجرا و تعمیرات و نگهداری SVL در سیستم کابلی مورد مطالعه

	هزینه هر SVL (میلیون ریال)	تعداد SVL	هزینه کلی (میلیون ریال)
هزینه اجرا	۳۰۰	۱۶	۴۸۰۰
هزینه تعمیرات و نگهداری	۵۰	۱۶	۸۰۰

لازم‌به‌ذکر است که هزینه تعمیرات و نگه‌داری به صورت سه سال یکبار بر سیستم تحمیل می‌شود. براین‌مبنا، پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی اقتصادی این روش مطابق جدول ۸ خواهد بود.

جدول ۸: پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی اقتصادی طرح اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	B	۵۸۲/۵۲۵ میلیون ریال
۲	C	۲۱/۷۴۷ میلیون ریال
۳	k	۳۵٪
۴	i	۱۸٪
۵	P	۴۸۰۰ میلیون ریال

لذا ارزش خالص فعلی پیاده‌سازی روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل به زمین، برابر ۱۵۱/۵۳۶ میلیارد ریال، با دوره بازگشت سرمایه ۷ ساله خواهد بود.

۳-۵- ارزیابی اقتصادی روش اتصال پوشش محافظ کابل به زمین با روش کراس‌باندینگ

راه‌حل اصلاحی دیگر که می‌تواند میزان جریان گردشی در پوشش محافظ و به دنبال آن تلفات ناشی از آن را کنترل نماید، کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل است. میزان تلفات ایجاد شده در این روش به صورت جدول ۹ خواهد بود.

جدول ۹: تلفات پوشش محافظ کابل ناشی از کراس‌باندینگ آن

ردیف	مؤلفه جریان	مقدار تلفات $\left(W/m\right)$
۱	مؤلفه اصلی جریان	۱٫۶۰۸۴
۲	هارمونیک دوم	۰٫۰۰۳۱
۳	هارمونیک سوم	۰٫۰۰۲۴
۴	هارمونیک چهارم	۰٫۰۰۱۷
۵	هارمونیک پنجم	۰٫۰۰۴۲
۶	هارمونیک ششم	۰٫۰۰۰۸
۷	هارمونیک هفتم	۰٫۰۰۱۳
۸	هارمونیک هشتم	۰٫۰۰۰۴
مجموع تلفات		۱٫۶۲۲۳

در این شرایط، مجموع تلفات ایجاد شده در سیستم کابلی در یک روز برابر ۳۷۸/۹۷ کیلو وات خواهد بود که هزینه‌ای برابر با ۲۶۲/۷۰۹ هزار ریال به صورت روزانه و هم‌چنین در ۳۶۵ روز سال ۹۵/۸۸۸ میلیون هزینه تلفات انرژی الکتریکی در این روش خواهد شد.

اجرای کراس‌باندینگ با دشواری و هزینه‌های گوناگونی روبروست. باتوجه‌به پیچیدگی اجرا و نصب این سیستم، نیاز به نیروی انسانی متخصص بسیار اهمیت دارد. هم‌چنین برای ایجاد اتصال بین بخش‌های مختلف پوشش محافظ در فازهای مختلف نیاز به جعبه اتصال (Link-Box) مهمترین موضوع خواهد بود. در وضعیت فعلی، جعبه اتصالی که الزامات مورد نظر در استانداردهای مربوطه را برآورده کند، به همراه هزینه نصب و نیروی انسانی، در حدود ۳۵۰ میلیون ریال هزینه خواهد داشت. با در نظر داشتن آرایش و تعداد مدارهای موجود در هر فیدر کابل، به ۳۸ عدد جعبه اتصال نیاز است که هزینه تهیه این تعداد برابر با ۱۳/۳۰۰ میلیارد ریال خواد بود. به‌علاوه تعمیر و نگهداری این تجهیزات شامل تست‌های ولتاژی است که مانند SVLها به صورت سه ساله انجام می‌شود و برای هر جعبه اتصال هزینه‌ای معادل ۵۰ میلیون ریال خواهد داشت. مجموع هزینه‌های تعمیرات و نگهداری برای کلیه جعبه‌های اتصال برابر۱/۹۰۰ میلیارد ریال می‌باشد که هر سه سال یکبار الزام به انجام این تست‌ها ضروری خواهد بود. براین مبنا، پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی اقتصادی این طرح به صورت جدول ۱۰ است.

جدول ۱۰: پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی اقتصادی طرح اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	B	۵۱۶/۳۰۸ میلیون ریال
۲	C	۱/۳۸۳ میلیارد ریال
۳	k	۳۵٪
۴	i	۱۸٪
۵	P	۱۳/۳ میلیارد ریال

در نهایت، ارزش خالص فعلی با در نظر گرفتن نرخ تورم $k=۳۵٪$ و نرخ تنزیل $i=۱۸٪$ برابر ۱۱۳/۵۰۰ میلیارد ریال زیان خواهد بود.

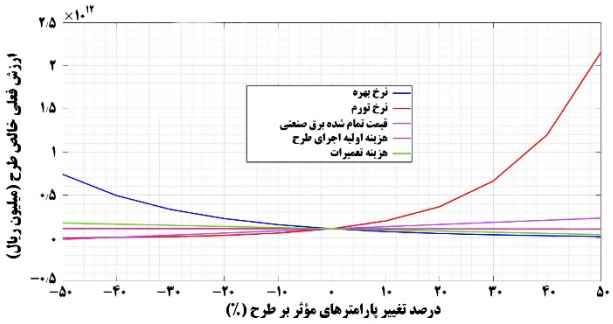
مبلغ بدست آمده برای ارزش خالص فعلی روش کراس‌باندینگ، به شدت منفی است و دلیل این موضوع ناشی از هزینه اولیه و تعمیرات سنگین است که این طرح را برای این طول از کابل، غیراقتصادی نشان می‌دهند.

۴-۵- آنالیز حساسیت

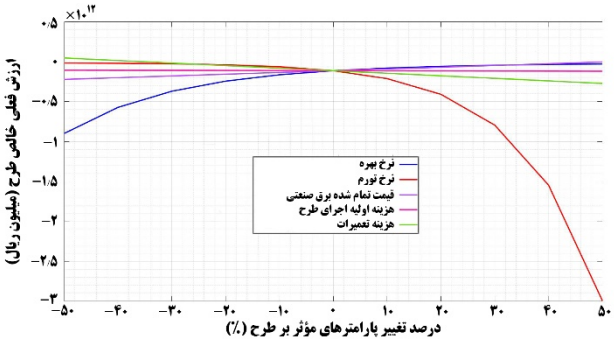
پیاده‌سازی دو روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ و کراس‌باندینگ، متأثر از مواردی هم‌چون نرخ بهره سالیانه، نرخ تورم، هزینه اولیه، بهای تمام شده انرژی الکتریکی و هزینه تعمیرات و نگهداری خواهد بود. شکل ۱۰ بازه‌ی اقتصادی بودن (نتایج آنالیز حساسیت طرح) اجرای روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل و هم‌چنین شکل ۱۱ این موضوع را برای روش کراس‌باندینگ نشان می‌دهند.

روش کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل‌های مورد مطالعه از نظر اقتصادی مردود بوده و کاملاً زیان‌ده است. با این حال، با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که این روش با افزایش هزینه تمام شده انرژی الکتریکی در کشور می‌تواند به عنوان یک طرح با بازده اقتصادی مثبت تلقی شود. همچنین هزینه چشمگیر تعمیرات و

رابطه مستقیم آن با نرخ تورم، می‌تواند اثرات مثبت اقتصادی این طرح را خنثی و آن را غیراقتصادی جلوه دهد. در مقابل، افـزایش نرخ تورم باعث افزایش ارزش اقتصـادی روش اتصـال یـک‌طرفـه پوشش محافظ کابل به زمین خواهد شد.



شکل ۱۰: آنالیز حساسیت روش اتصال یک‌طرفه پوشش محافظ کابل به زمین نسبت به پارامترهای اقتصادی تأثیرگذار



شکل ۱۱: آنالیز حساسیت روش کراس‌باندینگ پوشش محافظ کابل به زمین نسبت به پارامترهای اقتصادی تأثیرگذار

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، موضوع ارزیابی فنی-اقتصادی اتصال زمین پوشـش محافظ کابل‌های ۶۳ کیلو ولت تغذیه‌کننده واحدهای کوره قوس الکتریکی و SVC مجتمع فولاد مبارکه اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. تلفات ایجاد شده در پوشش محافظ کابل، به عنوان یکـی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی ارزیـابی اقتصـادی روش‌هـا تلقـی می‌شود کـه بـرآورد آن در نـرم‌افـزار COMSOL Multiphysics نسـخه ۵,۵ انجـام شـده اسـت. نتـایج ارزیـابی فنـی-اقتصـادی روش‌های مختلف اتصال پوشش محافظ به زمـین در ایـن مقالـه نشان می‌دهند که بهینه‌ترین روش، روش اتصال یکسـو پوشـش محافظ کابل به زمین با کمـک SVL اسـت کـه تـا حـد زیـادی صرفه‌جویی در هزینه‌های تلفات انرژی الکتریکی را به دنبال دارد و از نظر اقتصادی بازگشت سرمایه مناسبی را ارائه می‌دهـد. ایـن روش، مشکلات فنی و ایمنی احتمالی ناشی از القای ولتاژ بالا در پوشش محافظ کابل در زمان اتصال کوتاه را نیز ندارد.

۷- سپاسگزاری

شایان توجه است ایـن پـژوهش مسـتخرج از طـرح پژوهشـی بـا عنوان مطالعات و تست‌های مورد نیاز جهت بررسی علـل خرابـی کابل های فشارقوی واحد توزیـع بـرق مجتمـع فـولاد مبارکـه و راهکارهای افزایش طول عمر شبکه کابلی می‌باشد. پروژه مـذکور با حمایـت مـالی شـرکت فـولاد مبارکـه اصـفهان و توسـط تـیم پژوهشی در دانشگاه کاشان انجام شـده اسـت. نویسـندگان ایـن مقاله از حمایت‌های فنی و مالی مجموعه فولاد مبارکـه، بـه‌ویـژه مـدیریت انـرژی و سـیالات، گـروه تحقیـق و توسـعه و معاونـت فناوری، تکنولوژی و تولید کمال سپاسگزاری را دارند.

۸- مراجع

[1] E. Lewis and J. Fisher, "The importance of the iron and steel industry," in *Australia's Economy in its International Context*, K. Anderson, Ed. (The Joseph Fisher Lectures, Volume I: 1904-1954: University of Adelaide Press, 2009, pp. 589-620.

[2] M. Shoukat, H. Ex, A. Research, P. Steel, and M. Hussain, *Importance of iron and steel industries, in the backdrop of Pakistan steel*. 2019.

[3] WorldSteel. (2020). *The uses of steel*. Available: https://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html?category=the-uses-of-steel

[۴] م. ح. جولازاده، "اهمیت و نقش صنایع فولاد در توسعه کشور"، سمپوزیوم فولاد، ۱۳۸۹.
Available: https://civilica.com/doc/157170

[۵] چیلان، تولیدکنندگان فولاد، ۱۳۹۹.
Available: http://chilanonline.com

[6] T. HIJIKATA, "latest-developments-in-steelmaking-capacity," 2020, Available: https://www.oecd.org/industry/ind/latest-developments-in-steelmaking-capacity-2020.pdf.

[7] Y. Djeghader and H. Labar, "Investigation of Voltage Unbalance Problems In Electric Arc Furnace Operation Model," *Leonardo Journal of Sciences*, vol. 22, pp. 37-48, 06/01 2013.

[8] P. Chittora, A. Singh, and M. Singh, "Modeling and analysis of power quality problems in electric arc furnace," in *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2015, pp. 1-6.

[9] A. Dheepanchakkravarthy, M. P. Selvan, and S. Moorthi, "Alleviation of Power Quality Issues Caused by Electric Arc Furnace Load in Power Distribution System Using 3-Phase Four-Leg DSTATCOM," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 100, no. 1, pp. 9-22, 2019.

[10] M. Rasoulpoor, M. Mirzaie, and S. M. Mirimani, "Effects of non-sinusoidal current on current division, ampacity and magnetic field of parallel power cables," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 553-562, 2017.

[11] S. Bustamante *et al.*, "Thermal behaviour of medium-voltage underground cables under high-load operating conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 156, pp. 444-452, 2019.

[12] N. Ida and J. P. A. Bastos, "Interaction between Electromagnetic and Mechanical Forces," in *Electromagnetics and Calculation of Fields*New York, NY: Springer New York, 2019, pp. 175-211.

[13] J. H. Shazly, M. A. Mostafa, D. K. Ibrahim, and E. E. A. E. Zahab, "Thermal analysis of high-voltage cables with several types of insulation for different configurations in the presence of harmonics," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 14, pp. 3439-3448, 2017.

[14] H. Shabani and B. Vahidi, "A probabilistic approach for optimal power cable ampacity computation by considering uncertainty of parameters and economic constraints," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 432-443, 2019.

[15] *IEC Standard 60287: "Electric cables - Calculation of the current rating"*, 2014.

[16] *IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV*, 2014.

[17] J.-R. Riba and X. Morera, "Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, 2006.

[18] F. Garnacho, A. Khamlichi, P. Simon, and A. González, "Guide to sheath bonding design, in distribution and transmission lines with HV underground cables," 2012.

[19] M. Li, C. Zhou, W. Zhou, J. Zhang, L. Zhang, and L. Yao, "Feasibility Study on Lengthening the High Voltage Cable Section and Reducing the Number of Cable Joints via Alternative Bonding Methods," *High Voltage*, vol. 4, 2019.

[20] O. Gouda and A. Farag, *Bonding methods of underground cables*. 2015.

[21] R. Meier, D. Quaggia, and L. Kehl, "Cross-bonding for MV cable systems: advantages and impact on accessories design," in *CIRED*, Madrid, Spain, 2019.

[22] A. Sobral, Â. Moura, and M. Carvalho, "Technical implementation of cross bonding on underground high voltage lines projects," 2011.

[23] M. Shaban, M. Salam, S. Ang, and W. Voon, "Induced sheath voltage in power cables: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1236-1251, 2016.

[۲۴] بانک سپه، "بررسی نحوه ارزیابی طرح‌های توجیهی در سیستم بانکی کشور، ۱۳۹۹.

[۲۵] ح. اسلامی، "ارزیابی اقتصادی پروژه‌های سرمایه‌گذاری".

[۲۶] "تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها از اردیبهشت، ۱۳۹۹.