



آثار جریان‌های گردشی غلاف فلزی کابل، بر روی میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک خط برق زیرزمینی

تحقیق و ترجمه: آرمان قاسمی نیا
(کارشناسی ارشد مهندسی برق)

چکیده

در این مقاله اثرات غلاف فلزی در میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل‌های برق تک رشته زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. در رابطه با این نوع کابل‌ها می‌دانیم که جریان‌های گردشی در غلاف فلزی، القا می‌شوند. این جریان‌ها موجب تلفات انرژی در غلاف‌ها شده و «ظرفیت حمل جریان» کابل را کاهش می‌دهند. جریان‌های گردشی غلاف فلزی، یک میدان مغناطیسی تولید می‌کنند که به میدان مغناطیسی کابل افزوده می‌شود. در این مقاله اصلاح میدان مغناطیسی کل، مطالعه و بررسی می‌شود.

کلید واژه‌ها

کاهش میدان مغناطیسی، کابل برق، جریان‌های غلاف فلزی، خطوط برق زیرزمینی.

۱- مقدمه

افزایش فشار محیطی موجب شکل‌گیری بازار جدیدی در سیستم‌های انتقال برق بر اساس کابل‌های ولتاژ بسیار بالا با عایق XLPE شده است. امروزه کابل‌های XLPE برای ولتاژهای تا ۵۰۰ کیلوولت هم کاربرد دارند. در بسیاری از کشورها و در شهرهای بزرگ با جمعیت متراکم، استفاده از خطوط هوایی با ولتاژ بالا، مجاز نیست. این کشورها اجازه کاربرد خطوط هوایی برق در مناطق پرجمعیت را نمی‌دهند و ترجیح می‌دهند از خطوط زیرزمینی استفاده کنند. برای مثال، منطقه کاتالونیا نمونه‌ای از این وضعیت است که دولت آن قصد دارد تمامی خطوط هوایی ولتاژ بالا را در مناطق پرجمعیت به صورت زیرزمینی درآورد.

بنابراین باید دفن خطوط برق ولتاژ بالا مورد مطالعه قرار گیرد. دفن این خطوط باید عمدتاً در مناطق پرجمعیت و مناطقی که به لحاظ زیست محیطی اهمیت دارند انجام شود، در حالی که در نواحی روستایی خطوط برق می‌توانند به صورت هوایی باشند. شکل ۱، یک خط زیرزمینی برق که در یک کانال سرویس‌رسانی^۱ نصب شده است را نشان می‌دهد.

۲- مشخصات الکتریکی کابل‌های تحت بررسی

شکل ۲، لایه‌های یک کابل ولتاژ بالا را که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۱. خط زیرزمینی برق



شکل ۲. شمای یک کابل تک رشته

جدول ۱ مشخصات اصلی کابل‌های ولتاژ بالای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات اصلی کابل ۱۱۰ کیلوولت تک رشته مورد مطالعه

۳۳/۴۰ mm	قطر خارجی هادی
۷۲/۱۰ mm	قطر میانگین غلاف سربی
$4/69 \times 10^{-5} \Omega/m$	مقاومت هادی (در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد)
$5/64 \times 10^{-5} \Omega/m$	مقاومت هادی (در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد)
$5/23 \times 10^{-4} \Omega/m$	مقاومت غلاف سربی (در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد)
$6/06 \times 10^{-4} \Omega/m$	مقاومت غلاف سربی (در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد)
۸۳ mm	قطر خارجی کابل
۱۲۷	تعداد رشته‌های هادی
630 mm^2	سایز هادی
۱۱۰ kv	ولتاژ نامی
۷۵۰ A	جریان مجاز

۳- تلفات توان در کابل‌ها

سه نوع تلفات در کابل‌های برق زیرزمینی وجود دارد.

۳-۱- تلفات هادی

هادی مرکزی از جنس مس یا آلومینیوم بوده و دارای یک مقاومت الکتریکی غیرقابل چشم‌پوشی است. با وجود جریان الکتریکی، این مقاومت، موجب گرم شدن کابل می‌شود. مقاومت هادی مرکزی وقتی جریان متناوب از آن عبور می‌کند، بیشتر از حالتی است که جریان مستقیم از آن عبور کند. لذا تلفات جریان متناوب هادی مرکزی، بیشتر از تلفات جریان مستقیم است. این تلفات را می‌توان با رابطه (۱) بیان کرد:

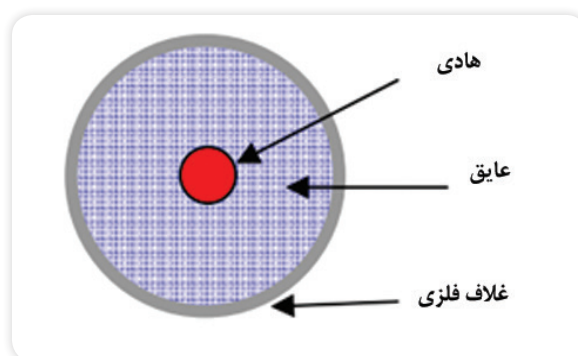
$$P_{conductor, AC} = I^2 \cdot R_{AC} \cdot 10^{-3} \text{ kW/km} \quad (1)$$

R_{AC} باید برحسب Ω/km بیان شود.

۳-۲- تلفات دی‌الکتریک

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، هادی، عایق و غلاف به عنوان یک خازن استوانه‌ای عمل می‌کند. ظرفیت کل این خازن برابر است با:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln(r_2 / r_1)} \text{ F/m} \quad (2)$$



شکل ۳. ساختار یک کابل برق متشکل از هادی، عایق، غلاف

تلفات دی‌الکتریک به صورت گرمایش دی‌الکتریک ظاهر می‌شود و این عمدتاً به دلیل تلفات دی‌الکتریک و تلفات پلاریزاسیون (قطبی‌شدن) است. تلفات دی‌الکتریک می‌تواند به دلیل معیوب بودن عایق باشد، بطوری که می‌تواند خاصیت هدایت‌کنندگی بسیار کمی، پیدا کند. این تلفات به دلیل میدان‌های الکتریکی متناوب و استاتیک هستند.

تلفات پلاریزاسیون، ناشی از قطبی‌شدن دی‌الکتریک به دلیل وجود یک میدان الکتریکی متناوب است. میدان الکتریکی متناوب موجب القای جهت‌گیری و بی‌نظمی دوقطبی‌ها شده و یک اصطکاک داخلی ایجاد می‌کند که دی‌الکتریک را گرم می‌کند. میدان‌های الکتریکی استاتیک موجب تلفات پلاریزاسیون نمی‌شوند.

تلفات دی‌الکتریک را می‌توان به صورت رابطه (۳) و (۴) بیان کرد:

$$P_{diel} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_f^2 \cdot \text{tg} \delta \quad (3)$$

$$Q_{diel} = P_{diel} \cdot \text{tg} \delta \quad (4)$$

U_f : ولتاژ فاز

f : فرکانس خالص

C : ظرفیت کابل

δ : زاویه تلفات دی‌الکتریک

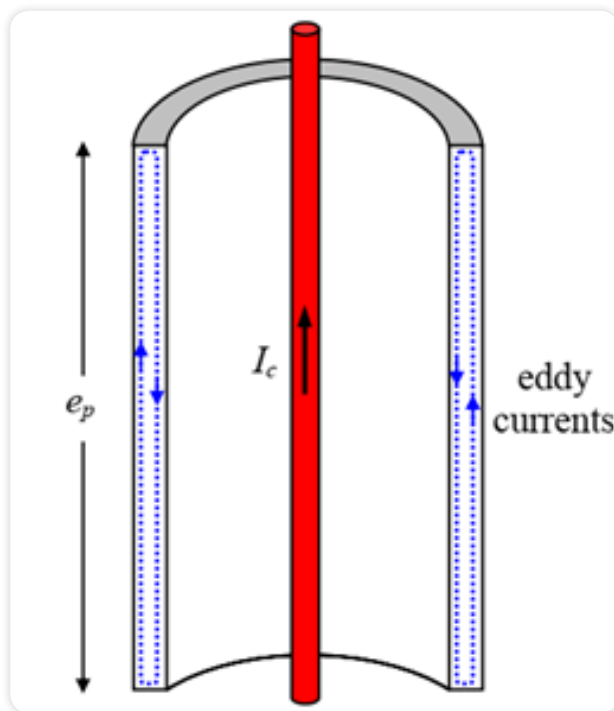
توان راکتیو خطوط برق زیرزمینی بین ۲۰ تا ۴۰ برابر توان راکتیو خطوط هوایی برق است. این مسأله باعث کاهش ظرفیت حمل توان اکتیو خط زیرزمینی می‌شود و باید توان راکتیو، جبران سازی شود.

۳-۳- تلفات غلاف فلزی

غلاف فلزی در میدان مغناطیسی تولید شده توسط جریان I_c هادی، غوطه‌ور می‌شود. بنابراین یک ولتاژ القایی e_p در غلاف ظاهر می‌شود که موجب ایجاد جریان در غلاف فلزی می‌شود. این جریان‌ها باعث پراکندگی انرژی ناشی از اثر ژول، می‌شوند. ولتاژ القایی، دارای بیشترین مقدار در سمت داخلی غلاف و کمترین مقدار در سمت خارجی آن است. این وضعیت موجب گردش جریان‌های گردابی در غلاف می‌شود. این پدیده، منشأ اصلی جریان‌های گردابی است.

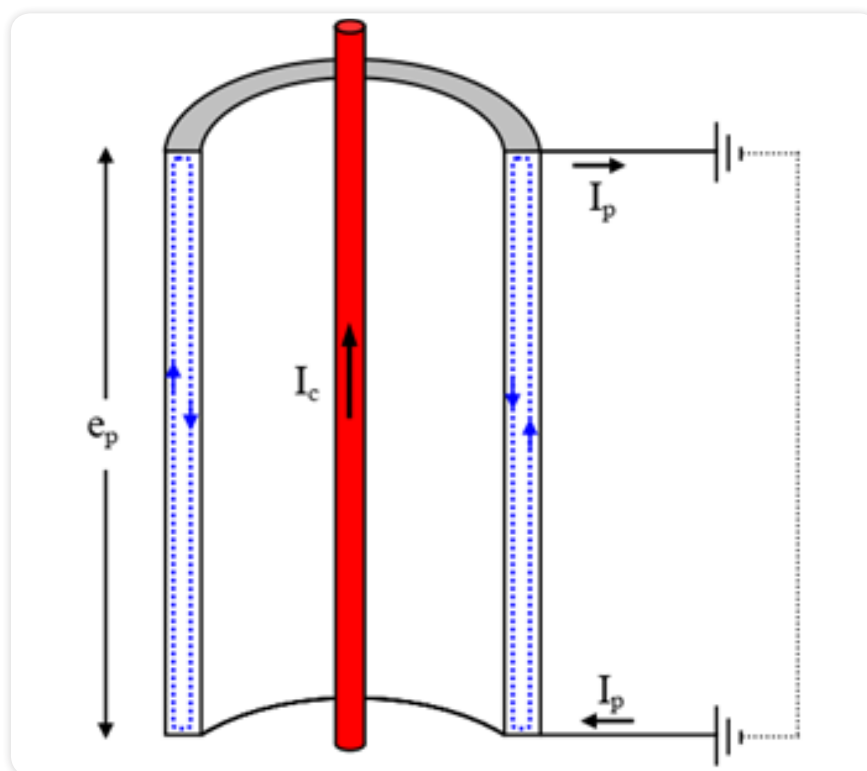
وقتی هیچ یک از دو انتهای غلاف زمین نشده باشد، یک ولتاژ القایی در غلاف ظاهر می‌شود که دارای دامنه‌ای مشابه با ولتاژ هادی است. این ولتاژ، می‌تواند منشأ خطرات احتمالی برای پرسنل تعمیر و نگهداری باشد، ضمن اینکه امکان سوراخ شدن عایق را در اثر اضافه ولتاژهای غلاف در پی خواهد داشت. از سطح مقطع کابل برق نشان داده شده در شکل ۴ می‌توان شاهد منشأ جریان‌های گردابی در غلاف بود.

وقتی هر دو سمت غلاف زمین شود، تنش e_p غلاف موجب القای جریان گردشی (I_p) در طول غلاف می‌شود که از طریق مسیر زمین بر می‌گردد. جریان‌های گردشی I_p معمولاً بسیار بزرگتر از



شکل ۴. غلاف فلزی زمین نشده

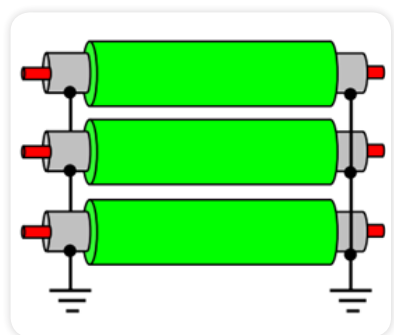
جریان‌های گردابی هستند. بنابراین، جریان‌های گردابی را می‌توان در مورد غلاف‌های با دو طرف زمین شده نادیده گرفت. شکل ۵ سطح مقطع کابل با غلاف فلزی زمین شده در هر دو طرف را نشان می‌دهد.



شکل ۵. غلاف زمین شده در دو طرف

۴-۲- زمین کردن از دو طرف

غلاف‌های فلزی حداقل در دو سر کابل زمین می‌شوند، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این سیستم اجازه نخواهد داد که مقادیر بالای ولتاژهای القایی در غلاف‌های فلزی ظاهر شوند. در رابطه با کابل‌های با اتصال از دو طرف، تلفات جریان گردشی غلاف رخ می‌دهد، زیرا در این روش، یک جریان مدار بسته وجود دارد. این همان سیستمی است که در این مقاله مطالعه می‌شود.



شکل ۷. زمین کردن از دو طرف

جریان‌های گردشی آثار مختلفی در پی دارند:

- جریان‌های گردشی در غلاف موجب تلفات توان به شکل حرارت می‌شوند.
- جریان‌های گردشی باعث کاهش ظرفیت عبور جریان کابل به دلیل اثرات حرارتی می‌شوند.
- جریان‌های گردشی باعث یک میدان مغناطیسی می‌شوند که به میدان مغناطیسی کابل افزوده می‌شود. در این مقاله، اصلاح میدان مغناطیسی کل مطالعه می‌شود.

۵- محاسبه جریان‌های غلاف فلزی و میدان‌های مغناطیسی تولیدشده توسط خط برق

برای محاسبه، دو نوع پیکربندی و آرایش از نظر نصب، برای خط سه فاز در نظر می‌گیرند: پیکربندی مثلثی^۲ و تخت^۳ با توجه به آرایش نصب خط و پارامترهای الکتریکی کابل‌ها، جریان‌های گردشی غلاف از معادلات ارائه شده در IEC 287-1-1 محاسبه می‌شوند. با افزودن جریان گردشی غلاف به جریان هادی مرکزی در هر کابل می‌توان میدان مغناطیسی کل تولید شده توسط کابل را محاسبه کرد.

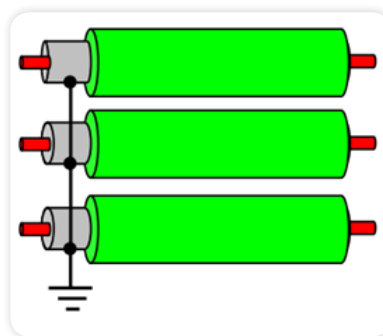
وقتی جریان‌های گردابی غلاف فلزی و جریان‌های هادی یکسان باشند، غلاف مشابه یک شیلد مغناطیسی کامل عمل می‌کند. مقدار جریان گردشی غلاف (Ip) مستقل از طول کابل است و این بخاطر آن است که وقتی طول هادی افزایش می‌یابد دامنه ولتاژ القایی غلاف و مقدار امپدانس الکتریکی آن افزایش می‌یابد. جریان گردشی در غلاف با فاصله فیزیکی میان هادی‌های مدار سه فاز افزایش می‌یابد.

۴- روش‌های زمین کردن و اتصال غلاف فلزی

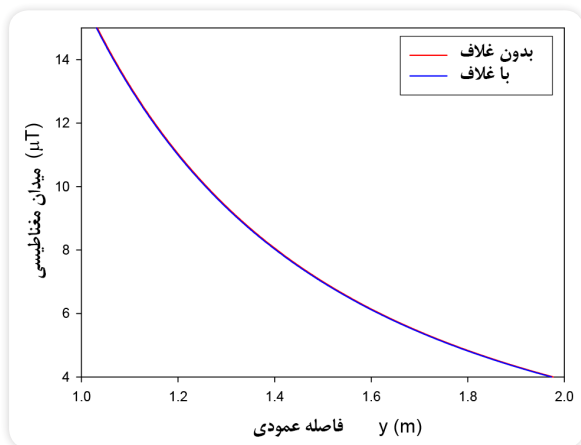
وقتی غلاف‌های کابل‌های تک رشته به یکدیگر متصل شده و زمین می‌شوند همانطور که در کابل‌های چند رشته مرسوم است، ولتاژ القایی موجب عبور جریان در مدار کامل می‌شود. این جریان باعث تلفات در غلاف‌ها می‌شود. روش‌های گوناگون زمین کردن را می‌توان برای به حداقل رساندن تلفات غلاف به کار برد. سابقاً وقتی زمین کردن و اتصالات ویژه‌ای که برای جلوگیری از تلفات غلاف در کابل‌های با غلاف سربی و بدون پوشش عایقی به کار گرفته می‌شد، غلاف‌ها در معرض ولتاژهای ac قرار می‌گرفتند و زمین کردن و اتصالات غلاف‌ها طوری طراحی می‌شدند که مقدار ولتاژهای القایی را پایین‌ترین حد ممکن نگه‌دارند تا از امکان خوردگی غلاف ناشی از الکترولیز (ac) جلوگیری شود.

۴-۱- زمین کردن از یک طرف

ساده‌ترین سیستم زمین کردن است که در شکل ۶ هم دیده می‌شود. غلاف‌های فلزی در یک نقطه در امتداد خود زمین می‌شوند. در دیگر نقاط، ولتاژی از طرف غلاف به زمین ظاهر خواهد شد که در دورترین نقطه از اتصال به زمین، بیشترین مقدار را خواهد داشت. در این روش چون هیچ جریانی در مدار بسته غلاف وجود ندارد، در نتیجه هیچ تلفات جریان گردشی رخ نمی‌دهد، اما تلفات گردابی غلاف هنوز وجود خواهد داشت.



شکل ۶. زمین کردن از یک طرف



شکل ۹. میدان مغناطیسی تولید شده در خط نصب شده با آرایش مثلثی با $s = 0.083$ متر

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل‌های دارای غلاف، ۳۷٪ درصد کمتر از میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل بدون غلاف است. جدول ۳ نشان دهنده جریان هادی مرکزی و غلاف‌ها در حالت $s = 0.166$ متر است.

جدول ۳. جریان‌ها برای حالت $s = 0.166$ متر

	Electric current in Amperers
Cable R	$750 + j.0$
Cable S	$-375 - j.649,52$
Cable T	$-375 + j.649,52$
Sheath of cable R	$-18,318 - j.115,77$
Sheath of cable S	$-91,103 + j.73,750$
Sheath of cable T	$109,42 + j.42,022$

شکل ۱۰ نشان دهنده شدت‌های میدان مغناطیسی است که برای خط مستقیم و عمود بر محور هادی مرکزی برای سه کابل با و بدون غلاف فلزی محاسبه شده‌اند.

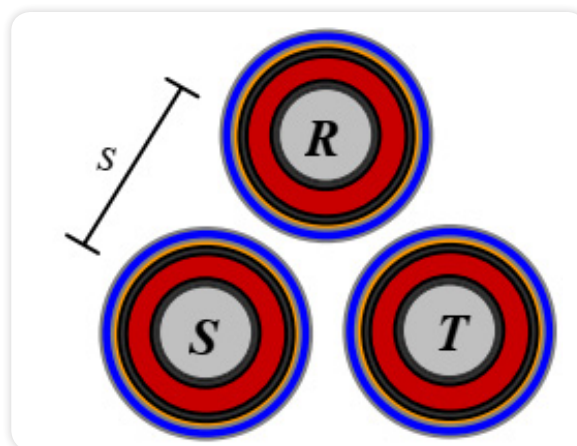
همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل‌های دارای غلاف، ۲۳٪ درصد کمتر از میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل بدون غلاف است.

۵-۲- آرایش تخت

شکل ۱۱ نصب خط با آرایش تخت را نشان می‌دهد.

۵-۱- آرایش مثلثی

شکل ۸ نصب خط با آرایش مثلثی را نشان می‌دهد.



شکل ۸. ترکیب مثلثی

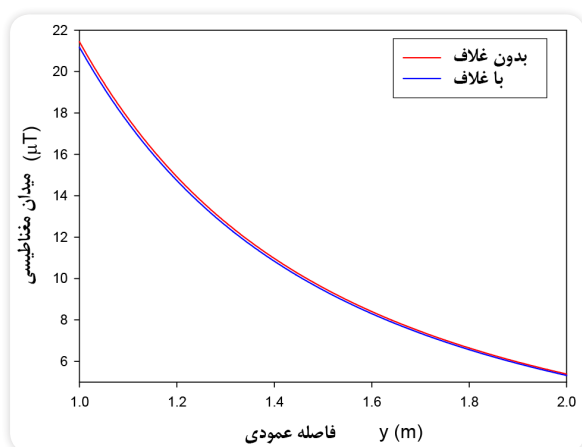
شدت جریان‌های گردشی غلاف، در دو وضعیت محاسبه شده‌اند، برای حالتی که فاصله مرکز تا مرکز کابل (S) برابر 0.083 متر است (برابر قطر خارجی کابل، به عبارتی رشته‌ها مماس با یکدیگرند) و برای حالتی که فاصله مرکز تا مرکز کابل (S) برابر 0.166 متر است (دو برابر قطر خارجی کابل، به عبارتی رشته‌ها به اندازه یک قطر کابل از یکدیگر فاصله دارند).

جدول ۲ نشان دهنده جریان‌ها در هادی مرکزی و غلاف‌ها در حالت $s = 0.083$ متر است.

جدول ۲. جریان‌ها برای $s = 0.083$ متر

	Electric current in Amperers
Cable R	$750 + j.0$
Cable S	$-375 - j.649,52$
Cable T	$-375 + j.649,52$
Sheath of cable R	$-5,558 - j.64,325$
Sheath of cable S	$-52,928 + j.36,976$
Sheath of cable T	$58,487 + j.27,349$

شکل ۹ نشان دهنده شدت میدان‌های مغناطیسی است که در خط مستقیم و عمود بر محور هادی مرکزی برای سه کابل با و بدون غلاف فلزی محاسبه شده‌اند.



شکل ۱۲. میدان مغناطیسی تولید شده در آرایش تخت برای حالت $s = +/۰۸۳$ متر

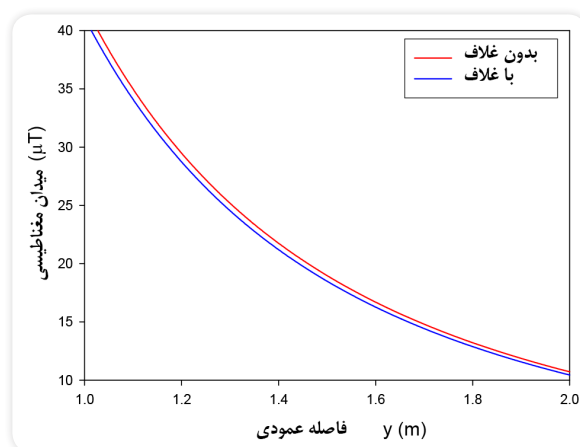
همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل‌های دارای غلاف، ۱/۲۳ درصد کمتر از میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل بدون غلاف است. جدول ۵ نشان دهنده جریان‌ها هادی مرکزی و غلاف‌ها در حالت $s = +/۰۱۶۶$ متر است.

جدول ۵. جریان‌ها برای حالت $s = +/۰۱۶۶$ متر

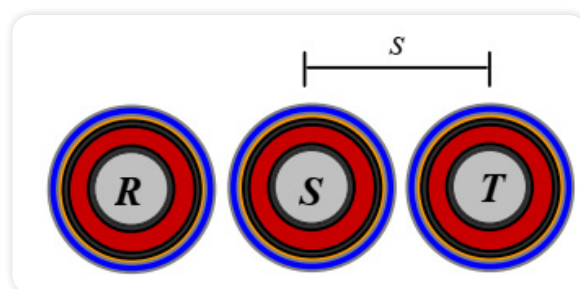
	Electric current in Amperes
Cable R	$750 + j.0$
Cable S	$-375 - j.649,52$
Cable T	$-375 + j.649,52$
Sheath of cable R	$-59,710 - j.137,06$
Sheath of cable S	$-79,035 + j.60,971$
Sheath of cable T	$138,74 + j.76,089$

شکل ۱۳ نشان دهنده شدت‌های میدان مغناطیسی است که برای خط مستقیم و عمود بر محور هادی مرکزی برای سه کابل با و بدون غلاف فلزی محاسبه شده‌اند.

همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود، خط انتقال دارای کابل‌های غلاف‌دار موجب تولید یک میدان مغناطیسی می‌شود که ۲/۴۸ درصد کمتر از میدان مغناطیسی تولید شده توسط کابل‌های بدون غلاف است.



شکل ۱۰. میدان مغناطیسی تولید شده توسط ترکیب مثلثی برای حالت $s = +/۰۱۶۶$ متر



شکل ۱۱. آرایش تخت

جدول ۴ جریان‌های هادی مرکزی و غلاف‌ها را در حالت $s = +/۰۸۳$ متر نشان می‌دهد.

جدول ۴. جریان‌ها برای حالت $s = +/۰۸۳$ متر

	Electric current in Amperes
Cable R	$750 + j.0$
Cable S	$-375 - j.649,52$
Cable T	$-375 + j.649,52$
Sheath of cable R	$-44,390 - j.91,827$
Sheath of cable S	$-38,959 + j.25,859$
Sheath of cable T	$83,349 + j.65,968$

شکل ۱۲ نشان دهنده شدت‌های میدان مغناطیسی است که برای خط مستقیم و عمود بر محور هادی مرکزی برای سه کابل با و بدون غلاف فلزی محاسبه شده‌اند.

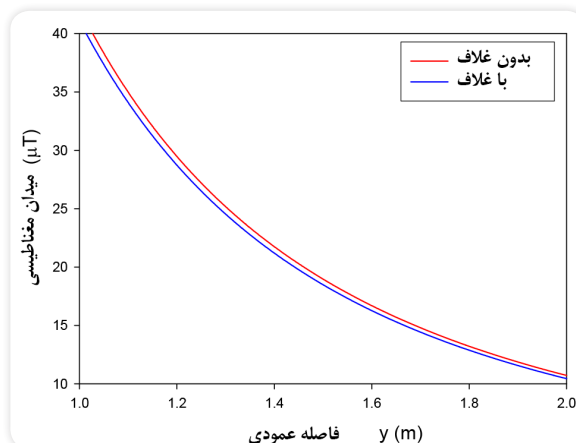
- جریان‌های گردشی یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند که به میدان مغناطیسی تولید شده توسط هادی مرکزی افزوده می‌شود. میدان مغناطیسی حاصل شده معمولاً کوچکتر از میدان مغناطیسی تولید شده توسط هادی مرکزی است.
- ضریب کاهش میدان مغناطیسی بستگی به آرایش و پارامترهای الکتریکی خط دارد.
- وقتی فاصله بین محور هادی‌ها افزایش می‌یابد، جریان‌های گردشی غلاف نیز افزایش می‌یابند. در واقع باعث کاهش بیشتر میدان مغناطیسی کل تولید شده توسط خط برق می‌شود.

۷- پی نوشت‌ها

1. Gallery
2. Trefoil
3. Plain

www.IEEE.org

۸- منبع



شکل ۱۳. میدان مغناطیسی تولید شده توسط آرایش تخت برای حالت $s = +/۱۶۶$ متر

۶- نتیجه گیری

- نتیجه‌گیری‌های حاصل شده از این مقاله بدین ترتیب است:
- این مقاله نشان می‌دهد که آرایش نصب و فاصله بین هادی‌ها و پارامترهای الکتریکی کابل‌ها، تأثیر مهمی روی مقادیر جریان‌های گردشی غلاف دارند.