

بررسی اثر مفصل بر میدان‌های مغناطیسی اطراف کابل‌های برق زیرزمینی

مهرداد فرودی جهرمی^۱، محمدحسین استوارزاده^{۲*}، روح‌الامین زینلی داورانی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲و۳- استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱)

چکیده

از آن‌جا که درصد بالایی از خطاهای کابل‌های برق زیرزمینی در محل مفصل این کابل‌ها روی می‌دهد، لذا تشخیص محل مفصل در این کابل‌ها از مهم‌ترین چالش‌های شرکت‌های توزیع برق می‌باشد. در این مقاله یک روش غیرفعال برای تشخیص محل مفصل در کابل‌های برق زیرزمینی بر اساس تغییرات میدان‌های مغناطیسی در بالای محل کابل و در سطح زمین پیشنهاد شده است. برای این منظور در ابتدا میدان‌های مغناطیسی بالای یک کابل بلند که یک مفصل در وسط آن است، با استفاده از نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هنگام اسکن در امتداد کابل، میدان مغناطیسی در محل مفصل تغییر می‌یابد که می‌تواند برای تعیین مکان آن استفاده گردد. جهت اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها برای اتصالات مختلف واقع در اعماق مختلف و در خاک‌های مختلف انجام شده است. از جمله مزایای روش پیشنهادی عدم نیاز به منبع خارجی و همچنین عدم نیاز به قطع برق جهت یافتن محل مفصل در کابل‌های برق زیرزمینی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: مفصل، کابل سه فاز برق‌دار، توزیع میدان‌های مغناطیسی، روش غیرفعال.

۱. مقدمه

ماوراء صوت و جریان گردابی نمونه‌هایی از روش‌های فعال می‌باشند [۳ و ۶-۱۰].

روش‌های غیرفعال [۱۱-۱۷] برای استخراج مشخصات منبع سیگنال یا هدف روش‌هایی هستند که پارامترهای نامعلوم با اندازه‌گیری و تحلیل سیگنال ناشی از هدف استخراج می‌شوند. تخلیه جزئی [۱۳ و ۱۴] نمونه‌ای از روش‌های غیرفعال است.

برای مقایسه روش‌های فعال و غیرفعال می‌توان گفت در روش‌های فعال، هم به فرستنده و هم به گیرنده نیاز است در حالی که در روش‌های غیرفعال فقط به گیرنده نیاز است. از طرف دیگر، در روش‌های غیرفعال باید از روش‌های حذف نویز در گیرنده استفاده گردد زیرا سیگنال ضعیف هدف باید از سایر نویزها تشخیص داده شود.

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص محل مفصل‌ها در حالت زیر بار پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی نیاز به قطع خط نیست. در این روش از میدان‌های مغناطیسی کابل برق که معمولاً دارای اثر مخرب هستند [۱۵ و ۱۶] برای تعیین محل اتصالات استفاده می‌شود.

در این مقاله، در بخش ۲ کابل و مفصل معرفی می‌شوند. فرمول‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی میدان‌های مغناطیسی ناشی از کابل برق در بخش ۳ معرفی می‌شوند. در بخش ۴، میدان‌های

انتقال انرژی الکتریکی به مصرف‌کنندگان توسط کابل‌های برق انجام می‌گردد. این کار در دو حالت هوایی و زیرزمینی انجام می‌شود که معمولاً در کلان‌شهرها از کابل‌های برق زیرزمینی معمولی استفاده می‌شود [۱ و ۲].

خطاها در خطوط برق می‌توانند باعث اتلاف انرژی الکتریکی یا منجر به قطع برق شوند [۳ و ۴]. بیشتر خطاها در کابل‌های برق زیرزمینی در محل اتصال مفاصل که برای اتصال کابل‌های برق استفاده می‌شوند، روی می‌دهند [۵]. بنابراین، شناسایی محل مفاصل برای شرکت‌های توزیع بسیار مفید است. هنگام بازرسی از خطوط برق توسط کارکنان شرکت‌های توزیع، استفاده از روش سریع و بدون قطع برق از اهمیت برخوردار است [۱-۵].

امروزه روش‌های مختلفی برای یافتن محل کابل‌های زیرزمینی و عیب‌های آنها وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو روش کلی فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در روش‌های فعال، یک منبع انرژی سیگنال را به سمت عیب می‌فرستد و سیگنال منعکس شده برای دستیابی به پارامترهای هدف آنالیز می‌شود. روش‌های بازتاب‌سنجی حوزه زمانی (TDR)،

۲-۳. مفصل

مفصل به منظور اتصال دو کابل به یکدیگر استفاده می‌شود. اتصالات حرارتی، اتصالات سرد و اتصالات باند برخی از اتصالات معمولی هستند.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، قطر مفصل بیشتر از کابل‌هایی است که به دو سر آن وصل می‌شوند. این تغییر قطر باعث تغییر جهت جریان الکتریکی در دو سر مفصل می‌شود که باعث تغییر میدان‌های مغناطیسی در اطراف مفصل می‌شود. این ایده‌ای است که در این مقاله دنبال می‌شود و آن تغییر میدان‌های مغناطیسی در اطراف مفصل می‌باشد که می‌توان با استفاده از یک روش غیرفعال، مکان مفاصل را مشخص کرد.



شکل (۲): افزایش قطر در محل اتصال مفصل

۳. فرمولاسیون میدان‌های مغناطیسی

جریان‌گذرنده از کابل‌های الکتریکی باعث ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف آن‌ها می‌شود. برای محاسبه میدان‌های ناشی از این جریان‌ها از معادلات ماکسول استفاده می‌شود. شکل انتگرالی معادلات ماکسول در فرم فازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} + j\omega \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q \quad (3)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (4)$$

در این معادلات \vec{E} شدت میدان الکتریکی، ω فرکانس زاویه‌ای، \vec{B} چگالی شار مغناطیسی، \vec{H} شدت میدان مغناطیسی، \vec{J} چگالی جریان الکتریکی، \vec{D} چگالی شار الکتریکی و Q بار الکتریکی است.

همچنین ارتباط بین شدت میدان الکتریکی و چگالی شار الکتریکی با رابطه (۵) و ارتباط بین شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی با رابطه (۶) نشان داده می‌شود.

مغناطیسی ایجاد شده توسط مفاصل در حالت خط گرم توسط نرم‌افزار قدرتمند CST، که ابزاری دقیق و کاربردی برای طراحی مدارات غیرفعال فرکانس بالا و تجزیه و تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی است، شبیه‌سازی می‌شوند [۱۸]. همچنین در این بخش نشان داده می‌شود که بین میدان‌های مغناطیسی در مجاورت مفصل و کابل تفاوت وجود دارد که می‌توان از این تفاوت برای یافتن مکان مفصل استفاده کرد. در بخش ۵ نشان داده می‌شود که میزان تغییرات میدان مغناطیسی به علت حضور مفصل به ابعاد آن ربط دارد. در پایان در بخش ۶ به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲. کابل

۱-۲ ساختار کابل

ساختار اصلی کابل، هسته یا هادی کابل است. اگرچه کابل‌ها معمولاً از اجزای دیگری مانند عایق، لایه‌های نیمه‌هادی، غلاف فلزی، سپر محافظ، زره، سپر پلاستیکی و غیره تشکیل شده‌اند. لازم به ذکر است که هر یک از این اجزا عملکرد ویژه‌ای دارد، اما عملکرد اصلی کابل انتقال جریان الکتریکی است. بنابراین، رسانا از مس الکترولیتی نرم یا سیم آلومینیومی خالص تشکیل شده است. سطح مقطع انواع مختلف کابل‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

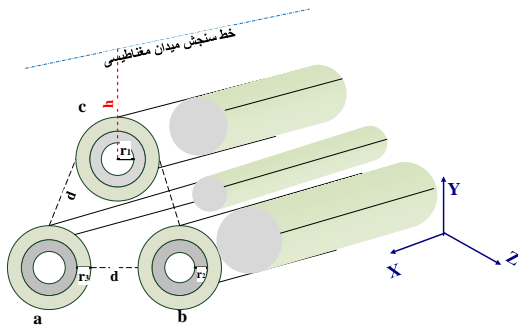


شکل (۱): سطح مقطع سه نوع کابل با هسته‌های مختلف

۲-۲. عایق

هدف استفاده از عایق، مقاومت و تحمل ولتاژ و ایزوله کردن و پراکندگی پتانسیل هسته‌ها از یکدیگر و از پوشش فلزی بیرونی (شیلد محافظ) می‌باشد. بیشترین عایق‌های مورد استفاده عبارتند از: کاغذ فشرده، پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌اتیلن متصل (XLPE). در این مقاله از هر سه نوع عایق PVC، PE و XLPE برای شبیه‌سازی کابل‌های برق استفاده می‌شود [۱۹-۲۰].

مغناطیسی در شکل (۳) نشان داده شده است. بر مبنای استانداردهای کابل‌کشی، فاصله حداقل بین کابل‌های هم‌ولتاژ باید به اندازه قطر کابل ضخیم‌تر مجاور باشد که در این مقاله نیز این فاصله بین کابل‌های سه فاز در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): کابل سه فاز درون خاک و نمایش خط سنجش میدان مغناطیسی

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، کابل‌های سه فاز بر روی یک مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع $d = 78 \text{ mm}$ قرار گرفته‌اند. شعاع هادی، $r_1 = 7/67 \text{ mm}$ ، ضخامت عایق، $r_2 = 11/07 - 7/67 = 3/4 \text{ mm}$ و فاصله مرکز کابل بالایی تا خط سنجش میدان مغناطیسی می‌باشد. ابعاد هر سه کابل با هم برابر بوده و در آن‌ها $r_1 = 7/67 \text{ mm}$ ، $r_2 = (11/07 - 7/67) = 3/4 \text{ mm}$ و $r_3 = (13/49 - 11/07) = 2/42 \text{ mm}$ می‌باشند. محل دقیق قرار گرفتن مرکز کابل‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): موقعیت کابل‌های سه فاز (بر حسب mm)

نام کابل	x	y	z
a	۰	۰	۰
b	۰	۰	۷۸
c	۰	۶۷/۵۴	۳۴

در شکل‌های (۴-۶) به ترتیب توزیع اندازه مؤلفه‌های x ، y و z میدان مغناطیسی بر روی یک کابل به طول 60 m که یک مفصل از جنس مس و به طول 60 cm و سطح مقطع هادی 555 mm^2 در وسط آن قرار گرفته، نشان داده شده است. این کابل در عمق 50 cm از سطح زمین قرار گرفته و مسیر اسکن میدان مغناطیسی در ارتفاع 50 mm از سطح زمین و به موازات کابل (در جهت x) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۶) مشاهده می‌شود در قسمتی از کابل (محدوده وسط کابل)، دامنه میدان‌های مغناطیسی دارای یک پیک قابل توجه بوده که بیانگر حضور مفصل می‌باشد. این دامنه به اندازه‌ای هست که بتوان آن را با حسگرهای مغناطیسی حساس اندازه‌گیری نمود [۲۳ و ۲۴].

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (۵)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (۶)$$

که ϵ ضریب گذردهی الکتریکی و μ نفوذپذیری مغناطیسی است. همچنین C یک مسیر و S سطح دربردارنده مسیر C یا هر سطح بسته می‌باشد.

نرم‌افزار CST معادلات انتگرالی ماکسول را با روش عددی انتگرال‌گیری محدود (FIT) حل می‌کند [۲۱-۲۲].

۴. شبیه‌سازی میدان‌های مغناطیسی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی شده میدان‌های مغناطیسی یک کابل برق‌دار سه فاز جهت تشخیص موقعیت مفصل توسط نرم‌افزار CST ارائه می‌گردد. ابعاد و مشخصات الکتریکی کابل مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. ابعاد و مشخصات الکتریکی این کابل به‌عنوان مبنای سایر شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده و تغییرات لازم جهت بررسی در هر بخش ذکر می‌گردد. همچنین جدول (۲) مشخصات الکترومغناطیسی مواد استفاده‌شده در کابل و محیط اطراف آن را نشان می‌دهد، که در آن ϵ_r ضریب گذردهی الکتریکی نسبی، σ_r قابلیت رسانایی (هدایت) و μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی است.

جدول (۱): ابعاد و مشخصات الکتریکی کابل مینا و مفصل

هادی	مس
عایق	XLPE
هادی کابل	مس
شیلد	مس
طول مفصل (وسط کابل)	۶۰ cm
جریان عبوری از کابل	۱۸۰ A
سطح مقطع هادی کابل	۱۸۵ mm ²
سطح مقطع هادی مفصل	۵۵۵ mm ²
طول کابل	۶۰ m
$5/8 \times 10^7$	

جدول (۲): مشخصات الکترومغناطیسی مواد استفاده‌شده در کابل و محیط اطراف آن [۶]

جنس مواد	ϵ_r	$\sigma_r(\text{s/m})$	μ_r
مس	۱/۰	$5/8 \times 10^7$	۱/۰
XLPE	۲/۳	۰/۰	۱/۰
PE	۲/۳	۰/۰	۱/۰
PVC	۲/۳	۰/۰	۱/۰
خلأ	۱/۰	۰/۰	۱/۰
خاک خشک	۲/۴۴	۰/۰	۱/۰

موقعیت سه فاز نسبت به هم و نسبت به خط سنجش میدان

مغناطیسی چرخش جهت جریان‌ها در ابتدا و انتهای مفصل می‌باشد. طبق شکل (۳) جریان‌های الکتریکی در طول کابل در جهت X می‌باشند و طبق قانون دست راست (برای تعیین جهت میدان مغناطیسی از روی جهت جریان) می‌دانیم که میدان‌های مغناطیسی ناشی از آن در جهت Y و Z هستند و در جهت X مؤلفه میدان مغناطیسی وجود ندارد. این موضوع با استفاده از رابطه (۲) نیز قابل توجیه می‌باشد. با توجه به پایین بودن فرکانس، معمولاً از جریان جابجایی در رابطه (۲) صرف‌نظر شده و لذا رابطه (۲) به قانون آمپر تبدیل می‌گردد. بنابراین به علت تقارن ساختار سیم، و طبق قانون آمپر، میدان‌های مغناطیسی اطراف سیم به صورت رابطه (۷) به دست می‌آیند:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \hat{a}_\phi \quad (7)$$

در رابطه (۷)، I جریان عبوری از سیم، r فاصله شعاعی از سیم و جهت ϕ در جهت دواربری بدور سیم می‌باشد. بدلیل اینکه سیم در جهت X می‌باشد، این دواربر در صفحه yz واقع شده و لذا در جهت X مؤلفه میدان مغناطیسی وجود ندارد.

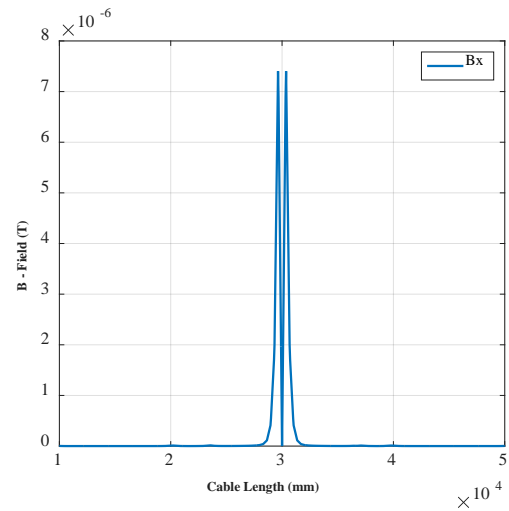
اما در ابتدا و انتهای مفصل به علت اینکه قطر کابل زیاد می‌شود، در جهت‌های Y و Z نیز مؤلفه جریان وجود دارد که این مؤلفه‌های جریان طبق قانون دست راست باعث ایجاد مؤلفه میدان مغناطیسی در جهت X خواهند شد.

همچنین گردش مسیر جریان‌ها در ابتدا و انتهای مفصل باعث تغییر مقدار سایر مؤلفه‌های میدان مغناطیسی نیز خواهد شد؛ چرا که مسلماً مؤلفه در جهت X جریان، کمتر از مقدار آن در حالت بدون مفصل خواهد بود.

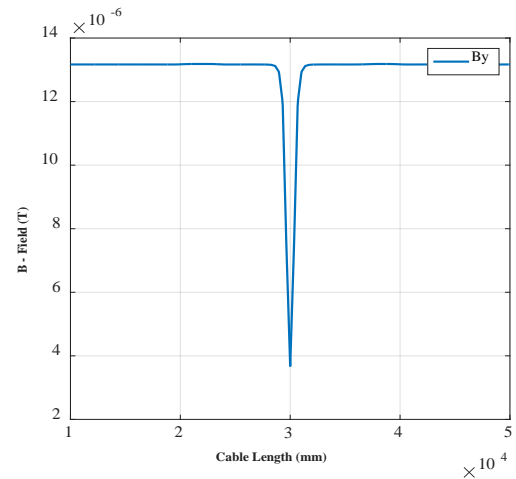
در ادامه اثرات پارامترهای مختلفی از سیستم بر توزیع میدان مغناطیسی کابل دارای مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابعاد و مشخصات کابل مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. به منظور خلاصه‌سازی فقط نتایج توزیع مؤلفه میدان مغناطیسی در جهت X نشان داده شده است.

۴-۱. اثر سطح مقطع مفصل

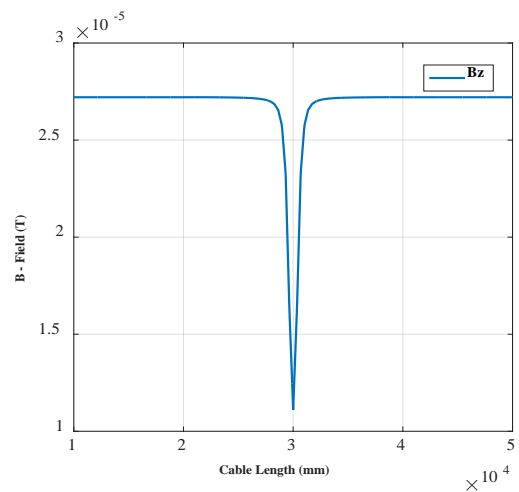
در این قسمت برای چندین سطح مقطع متفاوت مفصل، توزیع میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور سطح مقطع مفصل ۳ برابر، ۲/۵ برابر و ۲ برابر سطح مقطع کابل اولیه در نظر گرفته شده و نتایج توزیع میدان مغناطیسی در این سه حالت در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود در هر سه حالت، پیک دامنه میدان مغناطیسی در قسمت مفصل بوده و برای حالتی که سطح مقطع مفصل ۲ برابر سطح مقطع کابل در نظر گرفته شده، کمترین پیک میدان مغناطیسی رؤیت شده است.



شکل (۴): توزیع دامنه مؤلفه در جهت X میدان مغناطیسی کابل برق‌دار در طول خط اسکن



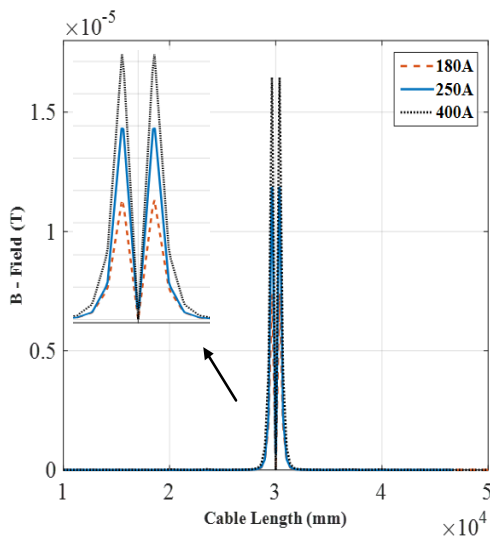
شکل (۵): توزیع دامنه مؤلفه در جهت Y میدان مغناطیسی کابل برق‌دار در طول خط اسکن



شکل (۶): توزیع دامنه مؤلفه در جهت Z میدان مغناطیسی کابل برق‌دار در طول خط اسکن

دلیل این تغییر در اندازه مؤلفه‌های مختلف میدان‌های

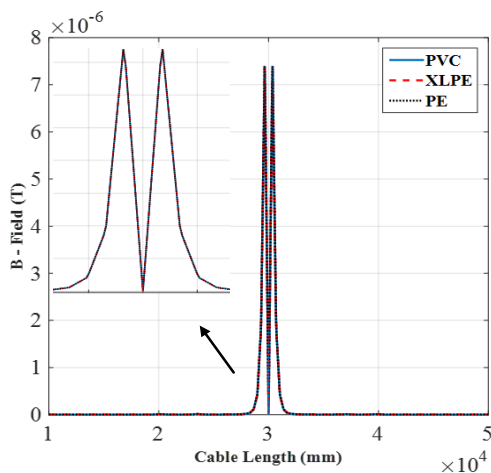
حالت جریان ۱۸۰A، ۲۵۰A و ۴۰۰A توزیع میدان مغناطیسی به‌دست آمده و نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز پیک دامنه میدان مغناطیسی در قسمت مفصل بوده و برای حالتی که جریان ۴۰۰A در نظر گرفته شده بیشترین پیک میدان مغناطیسی رؤیت شده است.



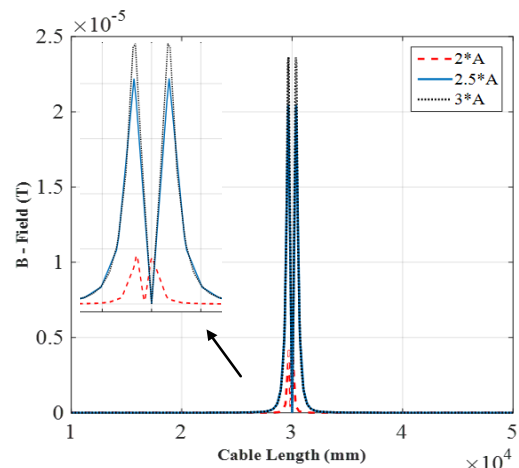
شکل (۹): اثر جریان کابل بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی

۴-۴. اثر عایق کابل

در این بخش برای چندین عایق متفاوت توزیع میدان مغناطیسی کابل به‌دست آمده است. برای این منظور عایق کابل از نوع PVC، PE و XLPE در نظر گرفته شده و نتایج توزیع میدان مغناطیسی در این سه حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد این سه عایق اثر یکسانی در توزیع میدان مغناطیسی دارند. بنابراین نوع عایق تأثیری در نتایج به‌دست آمده نخواهد داشت.



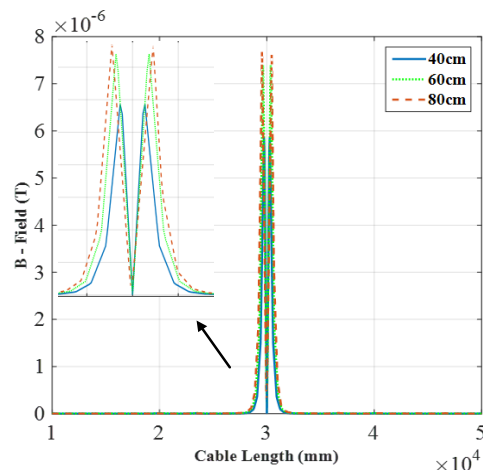
شکل (۱۰): اثر نوع عایق کابل بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی



شکل (۷): اثر سطح مقطع مفصل کابل برق‌دار بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی

۴-۲. اثر طول مفصل

در این قسمت برای چندین طول متفاوت مفصل، توزیع میدان مغناطیسی به‌دست آمده است. برای این منظور طول مفصل ۴۰cm، ۶۰cm و ۸۰cm در نظر گرفته شده و نتایج توزیع میدان مغناطیسی در این سه حالت در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه حالت، پیک دامنه میدان مغناطیسی در قسمت مفصل بوده و برای حالتی که طول مفصل ۸۰cm در نظر گرفته شده بیشترین پیک میدان مغناطیسی رؤیت شده است.



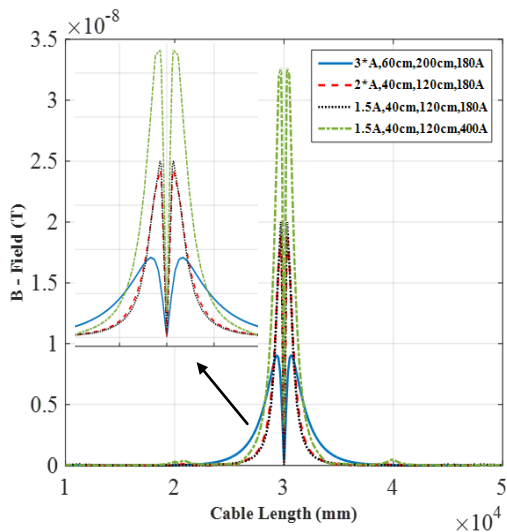
شکل (۸): اثر طول مفصل کابل برق‌دار بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی

۴-۳. اثر جریان کابل

در این قسمت برای جریان‌های متفاوت عبوری از کابل، توزیع میدان مغناطیسی به‌دست آمده است. برای این منظور برای سه

۴-۵. اثر ارتفاع سنجش

در این بخش برای چندین ارتفاع سنجش متفاوت، توزیع میدان مغناطیسی به دست آمده است. برای این منظور ارتفاع سنجش ۵۰cm، ۱۲۰cm و ۲۰۰cm در نظر گرفته شده و نتایج توزیع میدان مغناطیسی در این سه حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر سه حالت، پیک دامنه میدان مغناطیسی در قسمت مفصل بوده و برای حالتی که ارتفاع سنجش ۵۰cm در نظر گرفته شده، بیشترین پیک میدان مغناطیسی رؤیت شده است.



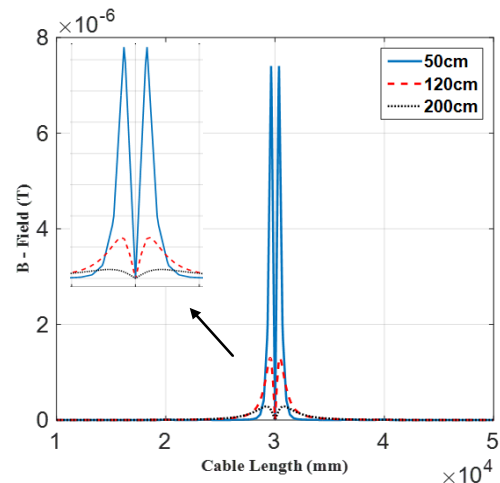
شکل (۱۲): اثر همزمان سطح مقطع، طول مفصل، جریان عبوری از کابل برق دار و ارتفاع سنجش بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی

۵. منحنی های معکوس سازی

علاوه بر تعیین محل مفصل بر اساس توزیع میدان مغناطیسی، با داشتن یک پایگاه داده میدان مغناطیسی می توان برخی از ویژگی های سیستم را تخمین زد. به عنوان مثال برخی از مشخصات کابل و مفصل مانند جریان عبوری از کابل، فاصله از سطح زمین و ابعاد مفصل را می توان توسط برخی از اطلاعات جمع آوری شده از یک سامانه تست تخمین زد. در شکل (۷) اثر تغییر مؤلفه x میدان مغناطیسی در مقابل تغییر سطح مقطع مفصل نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۷) مشاهده می شود، با افزایش سطح مقطع مفصل، پیک بزرگ تری از مؤلفه x میدان مغناطیسی مشاهده می شود. بنابراین، بر اساس این تغییرات میدان می توان سطح مقطع مفصل یک کابل زیرزمینی را تخمین زد. منحنی پیک مؤلفه x میدان مغناطیسی نسبت به افزایش سطح مقطع مفصل در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

همچنین در شکل (۸) تأثیر تغییر مقدار مؤلفه x میدان مغناطیسی در مقابل طول مفصل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده شد با افزایش طول مفصل، پیک مؤلفه x میدان مغناطیسی افزایش می یابد. شکل (۱۴) منحنی برای تخمین طول مفصل از پیک مؤلفه x میدان مغناطیسی اسکن شده در بالای کابل را نشان می دهد. بنابراین بر مبنای پیک میدان مغناطیسی، می توان طول مفصل را با استفاده از این منحنی تخمین زد.

دلیل افزایش پیک میدان مغناطیسی با افزایش سطح مقطع و طول مفصل این است که هر چه ابعاد مفصل بزرگ تر باشد، تغییر بیشتری در توزیع جریان ها به وجود می آید که خود باعث



شکل (۱۱): اثر ارتفاع سنجش بر توزیع مؤلفه در جهت x میدان مغناطیسی کابل برق دار در حضور خاک

۴-۶. بررسی همزمان اثر سطح مقطع، طول مفصل، جریان عبوری از کابل برق دار و ارتفاع اسکن بر توزیع میدان مغناطیسی

در این قسمت برای چندین عامل مؤثر به طور همزمان توزیع میدان مغناطیسی به دست آمده است. برای این منظور سطح مقطع مفصل ۱،۵، ۲ و ۳ برابر سطح مقطع کابل، طول مفصل ۴۰cm و ۶۰cm، ارتفاع سنجش ۱۲۰cm و ۲۰۰cm، جریان کابل ۱۸۰A و ۴۰۰A در نظر گرفته شده و نتایج توزیع میدان مغناطیسی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در همه حالات، پیک دامنه میدان مغناطیسی در قسمت مفصل مشاهده شده است.

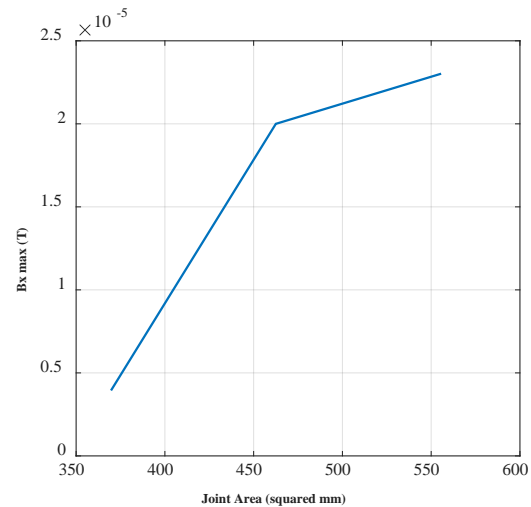
اگر چه در حالت هایی که سطح مقطع و طول مفصل کم بوده و همچنین ارتفاع اسکن زیاد می باشد پیک دامنه میدان مغناطیسی ضعیف تر شده و در حدود 10^{-8} تسلا می باشد، اما به دلیل حضور حسگرهایی با حساسیت بالا در بازار، تشخیص مکان مفصل امکان پذیر خواهد بود [۲۳ و ۲۴].

ایجاد منحنی‌های معکوس ابعاد مفصل کابل‌های زیرزمینی را استخراج کرد. همچنین تأثیر عوامل مختلفی از قبیل طول مفصل، ضخامت مفصل، میزان جریان کابل، ارتفاع اندازه‌گیری و نوع عایق کابل در توزیع میدان مغناطیسی بالای مفصل بررسی گردید.

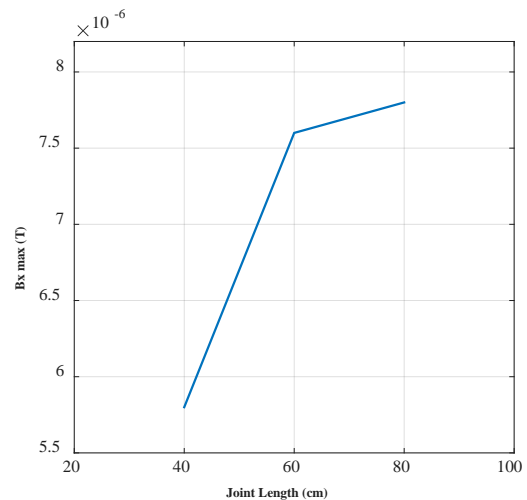
۷. مراجع

- [1] H. Al-Khalidi and A. Kalam, "The impact of underground cables on power transmission and distribution networks", in Proc. IEEE Int. Power Energy Conf. 2006.
- [2] R. Bernstein, M. Oristaglio, D. E. Miller and J. Haldorsen, "Imaging radar maps underground objects in 3-D", IEEE Comput. Appl. Power, vol. 13, iss. 3, pp. 20-24, 2000.
- [3] S. Qinghai, U. Troeltzsch and O. Kanoun, "Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements", 7th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD), 2010.
- [4] C. Yuanchao, W. Sansheng and Z. Mingji, "Research of miniature magnetic coil sensor used for detecting power cables underground", in Proc. ICECE. 2011, pp. 6065-6068.
- [5] H. Baojun, L. Chang, T. Ye, F. Mingli, X. Yang, Z. Yuhang, "The Relationship between Partial Discharge Behavior and the Degradation of 10 kV XLPE Cable Joints", IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an - Chin, 2016.
- [6] "Time Domain Reflectometry Theory, Application Note 1304-2, 2002", <http://www.agilent.com>.
- [7] G. M. Hashmi, R. Papazyan and M. Lehtonen, "Comparing wave propagation characteristics of MV XLPE cable and covered-conductor overhead line using time domain reflectometry technique", International Conference on Electrical Engineering, 2007.
- [8] K. Wong, "Prioritization of underground transmission cable renewal projects in power electric utility companies. PES General Meeting Conference & Exposition", IEEE, CCECE Toronto, Canada, 2014.
- [9] D. Prabhavathi, M. Surya Kalavathi and K. Prakasam, "Detection and Location of Faults in Three-Phase 11 kV Underground Power Cables by Discrete Wavelet Transform", Springer link. Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices, 2017.
- [10] N. A. Jaffrey, S. Hettiwatte, "Corrosion Detection in Steel Reinforced Aluminium Conductor Cables", Australasian Universities Power Engineering Conference. Curtin University, Perth, Australia, 2014.
- [11] X. Sun, W. K. Lee, Y. Hou, and P. W. T. Pong, "Underground Power Cable Detection and Inspection Technology Based on Magnetic Field Sensing at Ground Surface Level" IEEE transactions on magnetic, vol. 50, iss. 7, 2014.
- [12] X. Sun, C. K. Poon, G. Chan, C. L. Sum, W. K. Lee, L. Jiang, and P. W. T. Pong, "Operation-state monitoring and energization-status identification for underground power cables by magnetic field sensing", IEEE SENSORS JOURNAL, vol. 13, no. 11, pp. 4527-4533, 2013.
- [13] Q. Gao, Z. Yu, X. Li, Q. Liu, F. Yuan, Y. Han, L. Shi, J. Shen, Z. Liang, "On Line Monitoring of Partial Discharge

تغییر بیشتر میدان‌ها در محل مفصل و مقدار بیشتر پیک میدان مغناطیسی در جهت x می‌شود.



شکل (۱۳): منحنی معکوس‌سازی برای تخمین سطح مقطع مفصل با توجه به پیک میدان مغناطیسی



شکل (۱۴): منحنی معکوس‌سازی برای تخمین طول مفصل بر اساس پیک میدان مغناطیسی

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین محل مفصل‌های کابل سه فاز در حالت خط گرم ارائه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر تغییراتی است که در میدان‌های مغناطیسی در محل مفصل ایجاد می‌شود. این تغییر به دلیل تغییر مسیر جریان‌ها در محل مفصل است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع میدان مغناطیسی در بالای مفصل با میدان شبیه‌سازی‌شده در بالای کابل متفاوت است که می‌تواند برای یافتن محل مفاصل بکار رود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سطح مقطع و طول مفصل تأثیر مستقیمی بر اندازه پیک میدان مغناطیسی دارد که می‌توان با

- [20] Jin Fu, Chengpeng, Chen Wei, Yang Q I, Hu Xiaorui, Wang Qian, Yang Fan, "Investigation of the Effects of Insulation Defects on the 3-D Electromagnetic-Thermal Coupling Fields of Power Cable Joint", IEEE, 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2016.
- [21] T. Weiland, "A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equations for Six-Component Fields", in Electronics and Communications (AEÜ), vol. 31, pp. 116-120, 1977.
- [22] Zakharov P N, Dudov R A, Mikhailov E V, Korolev A F, Sukhorukov A P, "Finite Integration Technique Capabilities for Indoor Propagation Prediction", IEEE, Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough UK, 2009.
- [23] S. H. Liou, X. Yin, S. E. Russek, R. Heindl, F. C. S. Da Silva, D. E. Pappas, L. Yuan, J. Shen, "Picotesla Magnetic Sensors for Low-Frequency Applications", IEEE Trans. Magn., vol. 47, Iss. 10, pp. 3740-3743, 2011.
- [24] P. Delooze, L. V. Pania, D. J. Mapps, "AC biased sub-nano-tesla magnetic field sensor for low-frequency applications utilizing magnetoimpedance in multilayer films", IEEE Trans. Magn., vol. 41, Iss. 10, pp. 3652-3654, 2005.
- in High Voltage Cables", TELKOMNIKA, vol. 14, no. 3A, pp. 108-114, 2016.
- [14] M. Yousaf, A. Khan, J. Koo, "Neural network based diagnosis of partial discharge defect patterns at XLPE cable under DC stress", Electr. Eng, vol. 99, pp. 119-132, 2017.
- [15] E. I. Mimos, D. K. Tsanakas, A. E. Tzinevrakis, "Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables", Electr. Eng, vol. 91, pp. 327-335, 2010.
- [16] S. M. S. Barzegar, M. Khodsuz, "Minimizing of Magnetic and Electric Fields Due to Transmission Lines Using Multi-Objective Optimization Based on NSGA-II Algorithm", Journal of Applied Electromagnetics, accepted 2019, (In Persian).
- [17] M. Abidi, Y. Norouzi, O. Salimi, "Passive Localization of Secondary Surveillance Radar Interrogators," Journal of Radar, vol. 3, no. 4, pp. 11-23, 2016, (In Persian).
- [18] "CST Software", <http://www.cst.com/> 2019.
- [19] J. Granado, C. Álvarez-Arroyo, A. Torralba, J. A. Rosendo-Macías, Cháveza J, M. Burgos-Payán, "Electric Power Systems Research", ScienceDirect, 220-227, 2015.