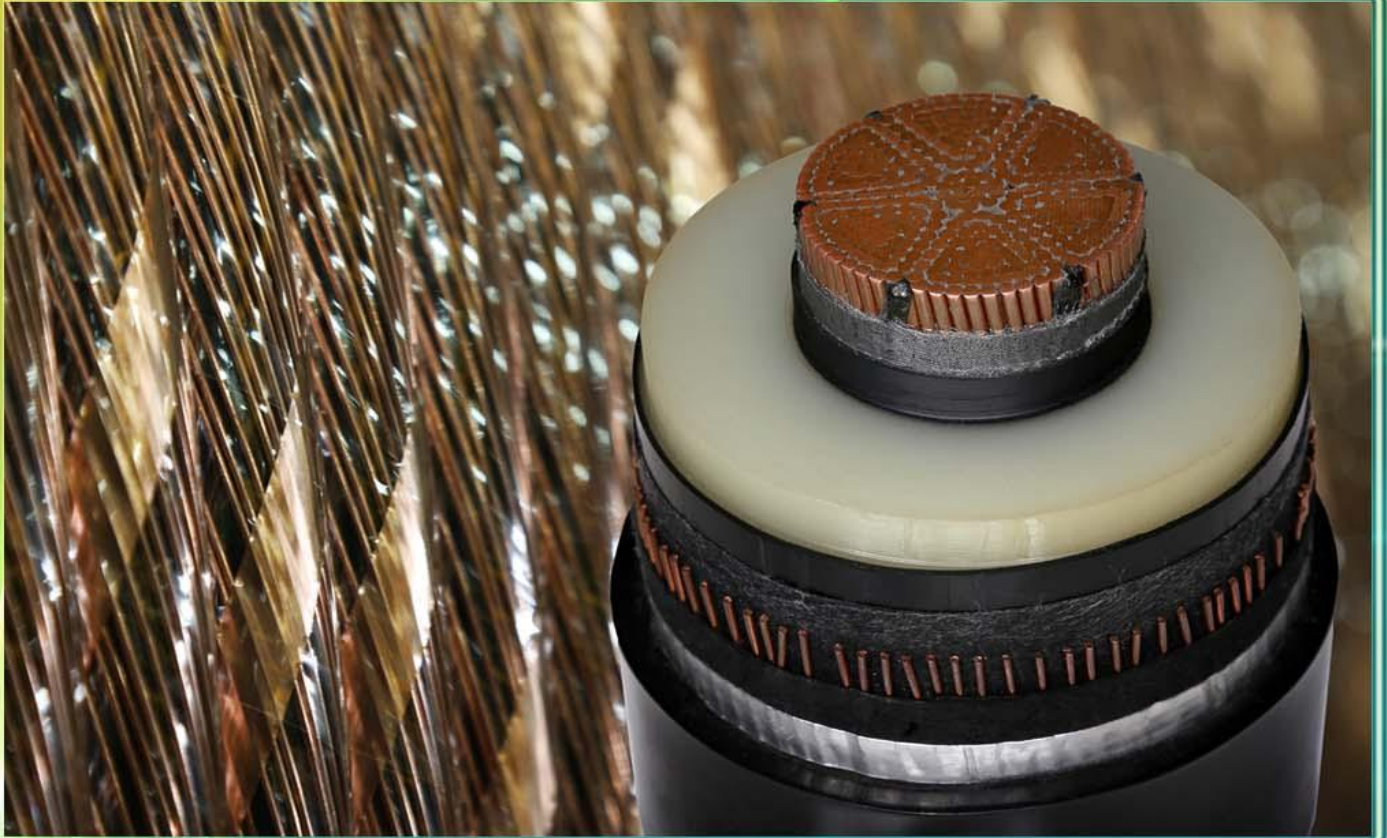


# SIMCO

## هادی های بهینه شده و کاهش مقاومت AC



تهیه کننده : شرکت سیمکو ، واحد تحقیق و توسعه و آموزش

( مقاله به چاپ رسیده در مجله سیم و کابل )

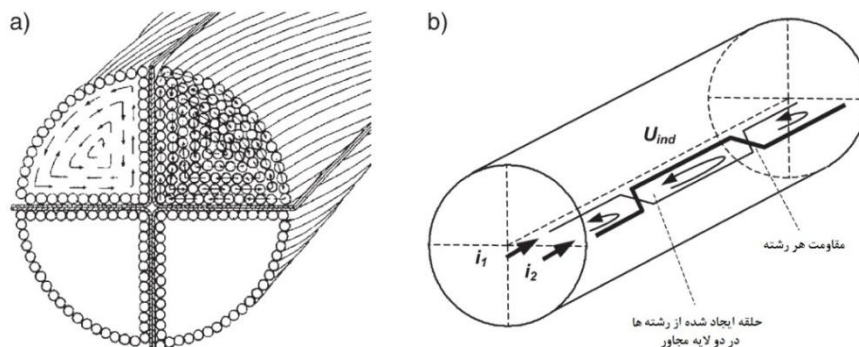
## هادی های بهینه شده و کاهش مقاومت AC

### مقدمه

با افزایش شدید تقاضای انرژی الکتریکی، درخواست کابل های زمینی نیز افزایش چشمگیری داشته است و برای انتقال این انرژی از کابل های با مقاطع بالا استفاده می گردد. جریان مجاز کابل های AC فشار قوی به شدت وابسته به مقاومت AC هادی است. مقاومت AC ( $R_{ac}$ ) به دلیل اثر پوستی از مقاومت DC ( $R_{dc}$ ) بیشتر است. جریان AC در هادی ایجاد میدان مغناطیسی متناوب می نماید. این میدان مغناطیسی ولتاژی را القاء می نماید که در مرکز هادی با عبور جریان مخالفت و در سطح هادی باعث افزایش جریان می شود. با استفاده از هادی های قطاعی می توان تلفاتی که به وسیله اثر پوستی ایجاد می شود، کاهش داد. این روش با استرند هادی های عایق شده نیز به شدت بهبود می یابد. این مسئله اولین بار توسط هامفریس میلیکن<sup>1</sup> پیشنهاد گردید. اختلاف بین مقاومت AC و مقاومت DC با افزایش سطح مقطع شدت بیشتری می گیرد. لذا در این مقاطع با استفاده از تغییر ساختار هادی می توان اثر پوستی را کاهش داد و در نتیجه تلفات اضافی ناشی از مقاومت AC هادی را حداقل کرد و این مسئله همچنین می تواند به کاهش سطح مقطع هادی مورد نیاز منجر گردد. اندازه گیری اثر پوستی یا مقاومت AC بر روی کل طول کابل تحت شرایط عملی دشوار است. در حال حاضر، استاندارد IEC 60228 هیچ توصیه ای در خصوص چگونگی انجام صحیح اندازه گیری مقاومت AC ندارد. به منظور بکارگیری توانایی کامل در کاهش اثر پوستی هادی ها و تضمین کیفیت در حین تولید به روش هایی برای اندازه گیری نیاز است، که به سادگی بکار رود و نتایج دقیق و قابل تکرار ارائه دهد. هدف از این مقاله بررسی اختلاف بین مقاومت AC و DC، تاثیر ساختار هادی بر روی مقاومت AC و سایر مشخصات و در نهایت روش های اندازه گیری مقاومت AC است.

### مقاومت AC

در هادی ها جریان نامی AC به مقاومت AC هادی بستگی دارد. به دلیل وجود اثر پوستی مقاومت AC از مقاومت DC بیشتر است. اثر پوستی بر اساس عمق جریان گردابی بستگی به فرکانس ( $f$ )، رسانایی ( $\sigma$ )، ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) دارد. تلفات AC ایجاد شده توسط اثر پوستی می تواند با استفاده از هادی های بهینه شده مانند هادی های میلیکن، هادی های دارای رشته های عایق شده، رشته های لاکه یا اکسیده شده کاهش یابد. ساختمان هادی ها از نظر طراحی، تعداد و جهت تاب قطاع ها و جزئیات خاص تولید اهمیت زیادی جهت بهینه سازی هادی ها و کاهش تلفات AC دارد.



شکل 1: هادی میلیکن

در هادی های میلیکن، در هر قطاع رشته های هادی به صورت مرتب در لایه هایی چیده می شوند. پیچش رشته ها در هر لایه باعث می شود تا فاصله هر یک از رشته ها تا مرکز در طول هادی تغییر کند (شکل 1) و این مسئله باعث می شود تا در لایه های مجاور بوسیله

رشته ها یک حلقه ایجاد گردد . جریان این حلقه توسط ولتاژ القاء شده و امپدانس حلقه بدست می آید . هادی های دارای لایه های هم جهت نسبت به هادی های با جهت های مخالف دارای مقاومت AC کمتری هستند . بنابراین برای رشته های عایق نشده می توان با استفاده از لایه های هم جهت تلفات AC را کاهش داد . وقتی که رشته های عایق شده مورد استفاده قرار می گیرد تلفات AC اضافی حداقل می شود .

روابطی که مقاومت AC را از به مقاومت DC مرتبط می سازد ، در استاندارد IEC 60287-1-1 آمده است . این روابط برای هادی های قطاعی و هادی های بهینه شده با ضرایبی تجربی بدست آمده است . این اندازه گیری ها بر روی کابل های پر شده از روغن و مقطع mm<sup>2</sup> 1600 و 4 قطاعه انجام شده و تعمیم داده شده اند .

رابطه بین مقاومت AC و DC را می توان بوسیله رابطه زیر بیان کرد :

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + y_s + y_p)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 x_s^4} \quad , \quad x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} * 10^{-7} k_s$$

$$y_p = 2.9 \frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \quad , \quad x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} * 10^{-7} k_p$$

که در آن  $y_s$  ضریب اثر پوستی و  $y_p$  ضریب اثر هم جواری هستند ،  $k_s$  و  $k_p$  نیز ضرایبی هستند که برای محاسبه ضریب اثر پوستی و ضریب اثر هم جواری 2 مورد استفاده قرار می گیرند ، همچنین  $f$  فرکانس ،  $d_c$  قطر هادی و  $s$  فاصله محوری بین هادی ها هستند . CIGRE در سال 2002 کارگروه B1-03 را جهت تعیین مقاومت AC هادی های با مقطع بالا تشکیل داد . گزارش نهایی آنها در سال 2005 در بروشور فنی 272 منتشر شد . این گروه رویکرد واقع گرایانه مبتنی بر اندازه گیری را برای تحقیقات انتخاب نمود . جدول زیر نتیجه این تحقیقات است :

مقدار $k_p$	مقدار $k_s$	نوع هادی
0/15	0/25	سیم های مسی لاکه و سیم های آلومینیومی
0/20	0/35	سیم مسی اکسیده شده ( مقادیر برای استرند یک جهته )
0/37	0/50	مس با لایه داخلی عایق شده
0/37	0/62	سیم های مسی ساده با استرند یک جهته
0/37	0/80	سیم های مسی ساده با استرند دو جهته

لازم به یادآوری است که طبق استاندارد IEC 60287-1-1 مقادیر  $k_p$  و  $k_s$  برای هادی های قطاعی به ترتیب 0/37 و 0/435 می باشد . البته مقادیر اعلام شده توسط این استاندارد فقط برای مقاطع کمتر از 1600 می باشد .

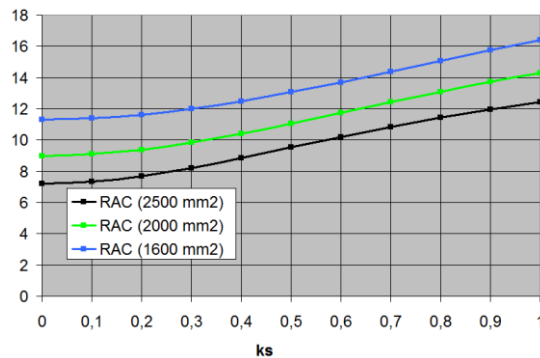
برای بررسی بیشتر اثر پوستی بر روی شرایط واقعی متمرکز می شویم . مقدار اثر هم جواری کمتر از یک دهم مقدار اثر پوستی است و در نتیجه از آن صرفه نظر می گردد . حال بهتر است تاثیر  $k_s$  بر روی مقاومت AC و جریان قابل تحمل را بررسی نماییم .

## تاثیر $k_s$ بر روی مقاومت AC و جریان مجاز

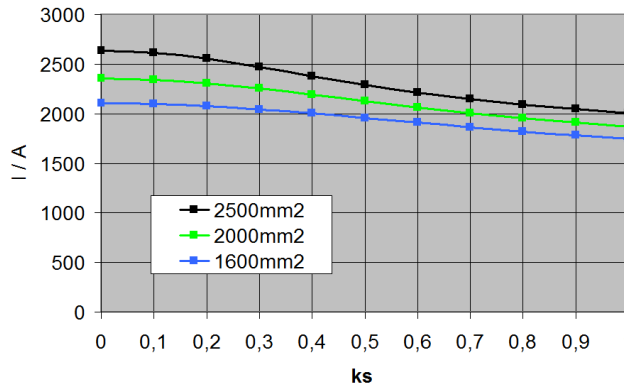
مقدار  $k_s$  بین صفر تا یک تغییر می نماید . به ازای  $k_s=0$  مقاومت AC و مقاومت DC با هم برابرند یا به عبارتی بهتر می توان گفت که در این حالت بهینه سازی هادی به صورت کامل رخ داده است . مقدار  $k_s=1$  نیز نمایشگر حالتی است که هیچ گونه بهینه سازی انجام نگرفته است .

حال برای شفاف سازی بیشتر تاثیر  $k_s$  بر روی مقاومت AC و جریان مجاز را بررسی خواهیم کرد .

ضریب  $k_s$  برای فرکانس صفر ( شرایط جریان DC ) برابر صفر است . دانستن تلفات AC در محاسبه جریان نامی کابل و انتخاب مقطع بسیار مهم است . شکل 2 مقاومت AC را بر اساس ضریب  $k_s$  برای مقاطع مختلف نشان می دهد که در آن محاسبات بر اساس مقادیر داده شده در استاندارد IEC 60228 محاسبه شده است . شکل 3 نیز نمونه ای از محاسبات ظرفیت جریان بر اساس پیش فرض تلفات هادی 50W/m را نشان می دهد .



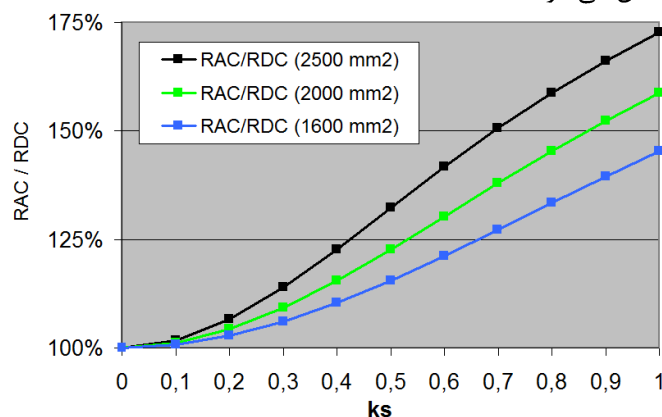
شکل 2: گسترش مقاومت AC ( بر حسب  $\mu\Omega/m$  ) در دمای 20 درجه برای مقاطع مختلف هادی



شکل 3: محاسبه ظرفیت جریان: حداکثر جریان ( بر حسب A ) بر اساس تلفات هادی 50W/m

چنانچه از شکل های 2 و 3 پیداست مقاومت AC برای مقطع 2500mm<sup>2</sup> از مقاومت DC مقطع 1600mm<sup>2</sup> نیز بیشتر است و همین مسئله را به صورت مشابه می توان در برای ظرفیت جریان نیز مشاهده نمود. این شکل ها به وضوح تاثیر طرح های بهینه هادی را نشان می دهد. حال بهتر است نسبت بین مقاومت AC و DC را مقایسه نماییم.

شکل 4 رابطه بین مقاومت AC و مقاومت DC است و اهمیت اندازه گیری مقاومت AC ناشی از کاهش اثر پوستی را نشان می دهد. این موارد نشان می دهد که در مقاطع بالاتر این نسبت افزایش چشمگیری می یابد. در نتیجه در مقاطع بالاتر ضرورت استفاده از هادی های بهینه جهت کاهش مقاومت AC بیشتر احساس می گردد.



شکل 4: رابطه بین مقاومت Rdc و Rac

هم اکنون در انتقال از طریق کابل های قدرت از هادی های با مقاطع بالا استفاده می گردد. به طور مثال هادی های با مقطع 2500 mm<sup>2</sup> ، قطری در حدود 60 mm دارند که این قطر در مقایسه با عمق اثر پوستی کوچک نیست. گزارش CIGRE کارگروه B1-03 که در سال 2005 منتشر شد نیز تمایل و مزایای استفاده از هادی های بهینه شده را نشان می دهد.

جدول ذیل نسبت مقاومت AC به مقاومت DC را در دمای 90°C نشان می دهد که مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر فرمول های IEC و CIGRE مقایسه شده است .

نوع هادی									مقطع
میلیکن لاکی			میلیکن استاندارد			گرد			
اندازه گیری	CIGRE	IEC	اندازه گیری	CIGRE	IEC	اندازه گیری	CIGRE	IEC	
1/04	1/025	1/07	1/25	1/20	1/07	1/31	NA	1/30	1600
1/04	1/04	1/11	1/35	1/30	1/11	1/45	NA	1/40	2000
1/065	1/06	1/16	1/45	1/41	1/16	1/61	NA	1/53	2500

NA : توسط CIGRE عددی تعیین نشده است

جدول بالا کیفیت کار CIGRE را نشان می دهد که در آن مقادیر محاسبه شده اثر پوستی بسیار نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده هستند . روابطی که IEC برای مقاطع بالا مورد استفاده قرار داده نتایج خوش بینانه هستند و در استاندارد IEC 60287-1-1 نیز اعلام کرده که پارامترهای اعلام شده فقط برای مقاطع کوچکتر از 1600mm<sup>2</sup> معتبر هستند .

## مقایسه مشخصات کابل با طراحی استاندارد و هادی با رشته های سیم لاکی

به منظور ارزیابی مزایای ساختارهای بهبود یافته هادی ، نیاز است تا عملکرد طراحی استاندارد ( سیم مسی لخت ) و طراحی رشته های عایق شده ( به طور نمونه سیم های لاکی ) در کابل با یکدیگر مقایسه شوند .

برای نمونه ، کابل هایی با مقاطع 1600mm<sup>2</sup> ، 2000mm<sup>2</sup> ، 2500mm<sup>2</sup> بر اساس استاندارد IEC 60228 تولید گردید . مقدار مقاومت این کابل ها اندازه گیری شد . طول نمونه 12 m بوده و همه مفتول های هادی در دو انتها به یکدیگر متصل شدند و فاصله بین پروب ها 8 m بود .

کابل ها به صورت 400 کیلوولت ، عایق XLPE ، اسکرین نوار آلومینیوم درز جوش شده و روکش HDPE هستند . چنین مقایسه ای در این مقاله به عنوان یک راهنما مفید خواهد بود .

جدول ذیل مشخصات اصلی و اجرایی مقاطع مختلف را در شرایط نصب یکسان نشان می دهد . هادی ها با ساختار میلیکن ، استرند دو جهته و با 6 قطاع در نظر گرفته شده اند . محاسبات مقاومت AC هادی نیز بر اساس ضریب اثر پوستی و اثر هم جوارگی ks و kp اعلام شده از طرف CIGRE در بروشور فنی شماره 272 محاسبه شده است .

3000e	3000	2500e	2500	2000e	2000	1600e	1600	1200e	1200	mm <sup>2</sup>	نوع و مقطع هادی
147	147	143	140	131	131	125	125	117	117	mm	قطر نهایی
39.7	39.7	36.38	35.8	29.28	29.27	24.85	24.85	20.3	20.3	Kg/m	وزن
1907.5	1630.0	1780.0	1558.5	1626.5	1460.9	1463.0	1351.0	1271.9	1208.0	A	جریان مجاز
1321.5	1129.6	1233.4	1079.7	1126.9	1012.1	1013.0	935.9	881.2	836.9	MVA	توان انتقالی
119.1	118.1	117.1	116.0	113.7	113.3	110.2	109.9	107.0	106.9	kW/km	تلفات در حداکثر جریان
8.315	11.916	9.742	13.116	11.928	15.055	14.469	17.501	19.524	21.743	μΩ/m	مقاومت AC در 90 درجه
1.087	1.554	1.061	1.434	1.039	1.312	1.025	1.215	1.014	1.129	-	R <sub>ac</sub> /R <sub>dc</sub>
523	523	552	550	876	876	1094	1094	1150	1150	m	طول کابل در هر قرقره

• ks=0.80 و kp=0.37 برای هادی مسی لخت

• ks=0.25 و kp=0.15 برای سیم های مسی لاکی

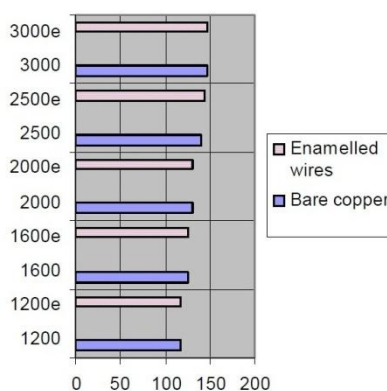
شرایط نصب نیز برای هر دو کابل به صورت یکسان در نظر گرفته شده است

- دو مدار موازی
- چینش تخت با فاصله 350mm بین کابل ها
- عمق دفن : 1300mm
- مقاومت حرارتی خاک : 1/0 Km/W
- دمای زمین : 20°C

در جدول ذیل پسوند e برای سیم لاکه مورد استفاده قرار گرفته است ، یعنی هادی در ساختار خود شامل تعدادی رشته عایق شده است که از هرگونه اتصال الکتریکی بین رشته ها جلوگیری می کند . تلفات نیز بر اساس جریان نامی و برای یک مدار داده شده است .

## قطر نهایی کابل

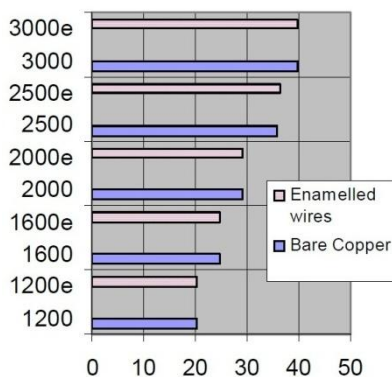
غیر از مقطع 2500mm<sup>2</sup> که ساختار آن برای نوع سیم های عایق شده متفاوت است ، در باقی موارد قطر هادی اختلافی بین مقاطع یکسان وجود ندارد . این مسئله در نمودار ذیل نشان داده شده است .



شکل 5 : مقایسه قطر کابل ها ( mm ) برای سایز های مختلف

## وزن کابل

به دلایلی مشابه آنچه در قسمت قبل گفته شده در بین دو نوع طراحی اختلاف وزن کمی وجود دارد .

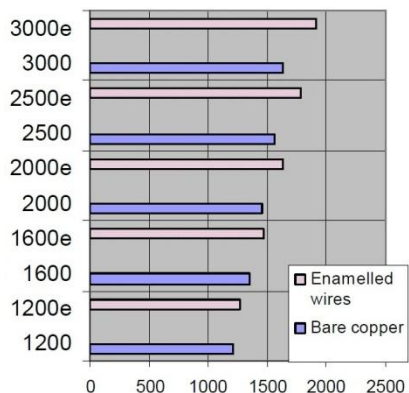


شکل 6 : مقایسه وزن کابل ها ( kg/m ) برای سایز های مختلف

## جریان مجاز

این قسمت جالبترین شاخصه کابل هایی را که هادی آن از سیم های عایق استفاده شده است را نمایش می دهد . به دلیل ضرایب اثر پوستی و اثر هم جواری ، ظرفیت جریان کابل های با سیم های عایق شده از یک کابل با هادی ساده با یک مقطع بالاتر بیشتر است .

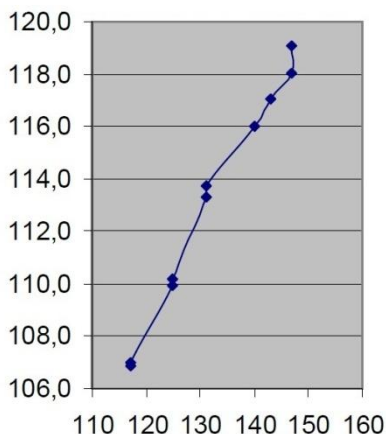
به طور مثال ظرفیت جریان کابل با مقطع 1600 با سیم های لاکه نسبت به کابل استاندارد با مقطع 2000 بالاتر است. برای مقاطع پایین تر از 1600 این قاعده برقرار نیست. اما برای مقاطع 1600 و بالاتر همیشه این رابطه برقرار است و هادی های با سیم های لاکه نسبت به هادی ساده با یک مقطع بالاتر ظرفیت جریان بالاتری دارد. این اختلاف با افزایش مقطع باز هم افزایش می یابد.



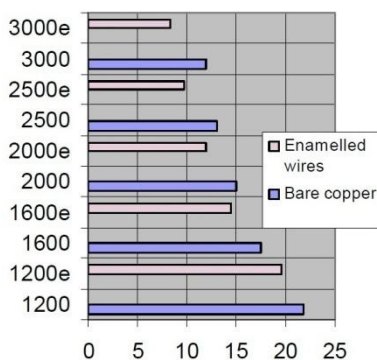
شکل 7: مقایسه جریان مجاز (A) برای سایز های مختلف

## تلفات کابل

در جدول 1 تلفات بر اساس حداکثر جریان مجاز محاسبه شده بود که جریانی است که دمای هادی را به 90 درجه می رساند. این مسئله قابل توجه است که تلفات هادی در 90 درجه با سایز کابل و جریان تغییرات زیادی ندارد و در واقع مقاومت حرارتی داخلی برای همه کابل ها خیلی مشابه است و مقدار حرارتی که می تواند به محیط دفع نماید مقدار ثابتی است و فقط با قطر نهایی کابل تغییر می نماید.



شکل 8: مقایسه تلفات کابل بر حسب قطر (mm) برای سایز های مختلف در دمای هادی 90 درجه



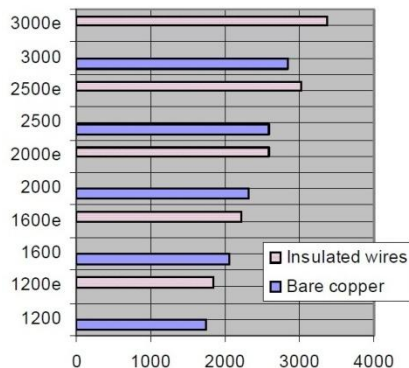
شکل 9: مقایسه مقاومت AC (μΩ/m) برای سایز های مختلف در دمای 90 درجه

با استفاده از هادی سیم های لاکه، کل تلفات می تواند برای جریان مشخص، به همان نسبت مقاومت AC کاهش یابد.

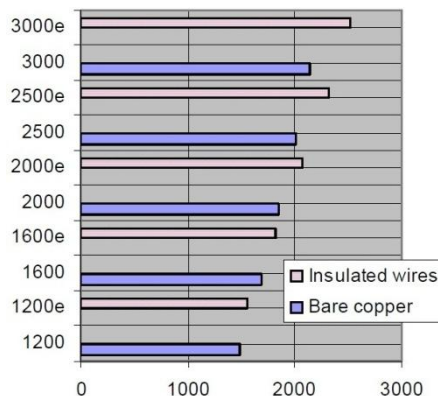
## ظرفیت اضافه بار

ممکن است تعجب برانگیز باشد که ظرفیت تحمل اضافه بار کابل ها با سیم های عایق شده به اندازه کابل های استاندارد باشد . در واقع

کابل های با سیم های عایق شده کوچکتر و سبک تر هستند و ظرفیت حرارتی آنها نیز کمتر است . به هر حال تلفات آنها کمتر از یک کابل استاندارد ( با یک مقطع بالاتر است ) و ظرفیت جریان اضافه بار آن بسیار نزدیک و برای مقاطع خیلی بزرگ حتی بهتر نیز هست . این مسئله در دو گراف ذیل نشان داده شده است .



شکل 10 : مقایسه ظرفیت جریان اضافه بار ( A ) در یک ساعت برای سایز های مختلف



شکل 11 : مقایسه ظرفیت جریان اضافه بار ( A ) در 5 ساعت برای سایز های مختلف

در خصوص نمودار های فوق ، فرضیات ذیل در نظر گرفته شده است :

- شروع از حداکثر بار ( در دمای هادی 90 درجه )
- حداکثر دمای هادی در اضافه بار: 100 درجه
- محاسبات بر اساس استاندارد IEC 60853-2 انجام شده است

## اندازه گیری مقاومت AC

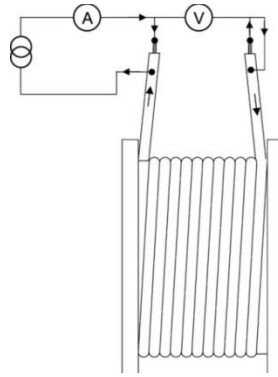
دو روش پایه برای تعیین مقاومت AC در هادی وجود دارد . اولین آنها روش رنگ سنجی است که این روش بر مبنای اندازه گیری اختلاف دما ناشی از تلفات هدایتی است . این روش بسیار زمان بر است . دومین روش ، روش های الکتریکی اندازه گیری مقاومت AC است . این روش ها بر مبنای اندازه گیری جریان هادی و تعیین سهم ولتاژ مربوط به این جریان است . همه این روش ها به شدت به عدم حضور میدان مغناطیسی یا مواد مغناطیسی غیر خطی وابسته است . در این روش ها ولتاژ با یک دستگاه دیجیتالی  $3\Omega$  با سرعت عکس برداری بالا ( بیشتر از یک میلیون نمونه در هر ثانیه ) ثبت می گردند . اطلاعات نمونه برداری مقادیر مختلط ولتاژ و جریان هستند . با استفاده از فرم تبدیل فوریه ، مقاومت AC را می توان به سادگی به صورت زیر بدست آورد :

$$R_{ac} = \frac{|\tilde{V}|}{|\tilde{I}|} \cos(\arg(\tilde{V}) - \arg(\tilde{I}))$$



که در آن  $\tilde{V}$  تبدیل فوریه ولتاژ و  $\tilde{I}$  تبدیل فوریه جریان است

این روش حتی می تواند به صورت آزمون روتین نیز استفاده گردد. جریان از طریق یک سمت کابل تزریق می گردد و در طرف دیگر نیز هادی و اسکرین به یکدیگر وصل شده اند. بنابراین افزایشی در مقاومت AC ناشی از جریان دورهای کناری ( اثر هم جواری ) وجود ندارد. میدان مغناطیسی ناشی از جریان هادی بوسیله میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط اسکرین خنثی می گردد. به این طریق می توان افت ولتاژ در طول کابل اندازه گیری و در نتیجه مقاومت AC را تعیین کرد.



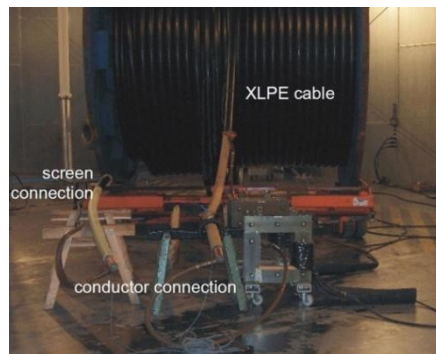
شکل 12 : طرح شماتیک اتصالات در اندازه گیری مقاومت AC

دقت فاز تحت تاثیر تعداد نمونه برداری قرار دارد و با فرض خطای نمونه برداری  $\pm 1$  نمونه دقت فاز را می توان بوسیله رابطه زیر بدست آورد.

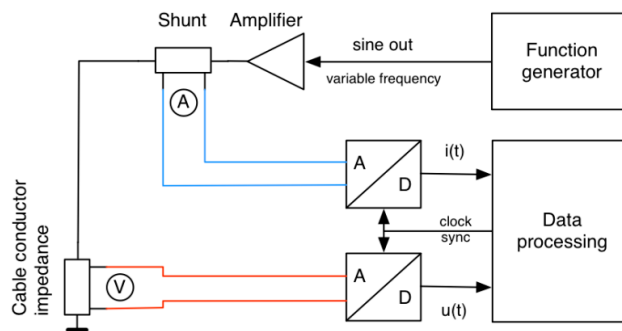
$$\Delta\phi = \frac{2\pi f}{SR}$$

که در آن  $f$  فرکانس و  $SR$  سرعت نمونه برداری است.

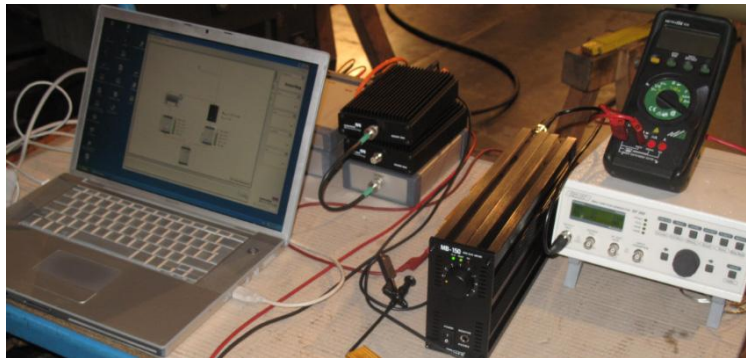
اندازه گیری در فرکانس نزدیک به صفر منجر به اندازه گیری DC (به ازای  $ks=0$ ) خواهد شد. در فرکانس های بالاتر نتایج نشان دهنده تاثیر طراحی هادی در ضریب  $ks$  است.



شکل 13 : اندازه گیری مقاومت AC بر روی کابل با طول کامل بر روی قرقه



شکل 14 : بلوک دیاگرام تجهیزات استفاده شده



شکل 15 : تجهیزات ساده و قابل کنترل برای اندازه گیری مقاومت AC

## نتیجه گیری

استفاده از هادی های بهینه شده برای مقاطع بالا در کاهش مقاومت AC و افزایش ظرفیت جریان تاثیر بسیاری دارد. طرح هایی که جهت بهینه سازی هادی استفاده می گردند شامل هادی های میلیکن هستند که در آنها می توان با عایق کردن هر یک از رشته ها ( استفاده از سیم های لاکه ) و یا استفاده از مس اکسید شده وضعیت را بهبود بخشید .

استفاده از هادی های بهینه شده در مقاطع کوچکتر تاثیر کمی دارد اما با افزایش مقطع ، افزایش چشمگیری دارد به صورتی که حتی می توان از مقطعی پایین تر نیز استفاده نمود .

استفاده از هادی های لاکه باعث افزایش هزینه نصب می گردد زیرا برقراری اتصالات هادی های لاکه نیاز به تکنیک و ابزار مخصوص به خود دارد .

تحت شرایطی که امکان عایق نمودن رشته های هادی وجود نداشته باشد می توان با استرند یک جهته هادی ، مقاومت AC را کاهش داد .

اندازه گیری مقاومت AC به دو روش انجام می شود . روش اول ، روش رنگ سنجی یا روش حرارتی است که بسیار زمان بر است . اما روش دوم که به صورت اندازه گیری های الکتریکی است کمک زیادی در بررسی میزان کاهش مقاومت AC می نماید .

## کلمات کلیدی

- [1] . Humphreys Milliken
- [2] . Proximity effect
- [3] . Digitizer

## منبع

- [1] . D. Dubois, P. Mirebeau, "The use of insulated wires Milliken conductors in high voltage power transmission underground AC line", Jicable
- [2] . G. Schroder, J. Kaumanns, "Advanced measurement of AC resistance on skin effect reduced large conductor power cable", International conference on insulated power cable, Jicable, June 2011
- [3] . Udo Fromm, "Optimized conductors for XLPE cables with a large cross-section", Wiley InterScience, EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER , 2005

## تهیه کننده

شرکت سیمکو - واحد تحقیق و توسعه و آموزش