کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ در شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت کشور با استفاده از هادی های آلومینیوم آلیاژی (AAAC)

ابوالفضل اکبرشاهی- علی یوسفی- نازنین جوادی

شرکت آلومتک- قزوین، بلوار آیت ا... خامنه ای- کارخانه آلومتک
Akbarshahi1357@gmail.com , Aliyousefi74@yahoo.com, Javadi.nazanin@gmail.com

چکیده

در این مقاله با توجه به اهمیت کاهش تلفات انرژی الکتریکی در شبکه های توزیع و انتقال کشور به مبحث کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ هادی های هوایی مورد استفاده در خطوط توزیع کشور به عنوان یکی از عناصر اصلی و تاثیر گذار در میزان تلفات کل پرداخته شده است. در این میان به موضوع مهمی در انتخاب هادی های هوایی مورد استفاده در خطوط توزیع کشور اشاره می شود که در طول سالیان متمادی به فراموشی سپرده شده و مورد توجه قرار نگرفته است و آن تلفات اهمی و افت ولتاژ بالای استفاده از هادی های ACSR با یک لایه آلومینیوم می باشد. در این هادی های تک لایه آلومینیومی به دلیل تلفات مغناطیسی مغزی فولادی ناشی از جریان های گردابی و پسماند، میزان مقاومت الکتریکی AC افزایش چشمگیری داشته، به طوری که این مقدار با عبور ۷۵ درصد جریان نامی از این هادی ها می تواند در مواردی تا ۴۲ درصد نسبت به هادی های AAAC معادل، افزایش پیدا کند و این یعنی افزایش چشم گیر تلفات اهمی و افت ولتاژ این هادی ها نسبت به آن چه در محاسبات، معیار اندازه گیری و تصمیم گیری قرار می گیرد. در این مقاله بر اساس موضوع ذکر شده، پیشنهاد شده استفاده از هادی های هوایی آلومینیومی تقویت شده با فولاد حاوی یک لایه آلومینیوم ممنوع شده و این هادی ها با هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی معروف به AAAC جایگزین شوند. با این جایگزینی ساده به دلیل عدم استفاده از مغزی فولادی در ساخت هادی های تمام آلیاژی، شاهد حذف اثرات القایی جریان الکتریکی بر روی مغزی فولادی و کاهش حداقل ۱۰ تا ۲۰ درصدی مقاومت الکتریکی و به تبع آن به همین نسبت شاهد کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ، در خطوط توزیع هوایی فشار متوسط کشور خواهیم بود.

کلید واژه

تلفات اهمی- جریان گردابی- کاهش تلفات شبکه-نسبت مقاومت AC به DC- هادی های ACSR با یک لایه آلومینیوم- هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی AAAC

۱- مقدمه

شبکه قدرت شامل سه بخش تولید، انتقال و توزیع است. انرژی الکتریکی پس از تولید در نیروگاه ها و عبور از شبکه های انتقال و توزیع به مصرف کنندگان می رسد، در این مسیر مقداری از انرژی به دلایل مختلف تلف می شود. قدمت بحث تلفات به اندازه قدمت صنعت برق می باشد و مسلما تلفات و معضلات این پدیده بسیار قدیمی است ولی آنچه باعث شده تا این مشکل همچنان به عنوان بحثی به روز در جامعه مهندسی برق مطرح باشد تبعات اقتصادی و هزینه های گزافی است که از این بابت پرداخت می شود.

بنابراین ضرورت پرداخت به بحث تلفات یک ضرورت انکار ناپذیر و آشکار به شمار می رود. تلفات توان که با مجذور بارهای عبوری از اجزای سیستم متناسب است در ساعات پیک بار از مقدار متوسط تلفات توان بسیار بیشتر خواهد بود؛ این بدان معنی است که در سخت ترین شرایط یعنی در زمان پیک بار بیشترین مقدار تلفات را نیز خواهیم داشت. با بررسی شبکه های توزیع مشخص می شود که با اتخاذ تمهیداتی می توان از میزان تلفات تا حدود زیادی کاست. در مجموع عوامل موثر در تلفات شبکه های توزیع دارای تعدد زیادی هستند که بطور کلی می توان آن ها را به دو دسته تلفات فنی شبکه و تلفات غیر فنی شبکه تقسیم کرد[۱].

این مقاله می کوشد با ارائه راهکار، به بحث کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ هادی ها به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل فنی ایجاد تلفات در خطوط توزیع برق کشور بپردازد.

۲- بررسی وضعیت موجود خطوط توزیع کشور از لحاظ تلفات

بر اساس آمار منتشر شده از سوی مرکز آمار شرکت توانیر تا سال ۱۳۹۲ طول خطوط فشار متوسط توزیع که عمدتاً مربوط به سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت می باشند به مقدار ۳۸۸۳۲۱ کیلومتر با رشد متوسط سالیانه ۷/۴ درصد نسبت به سال ۱۳۵۷ عنوان و ارائه شده است[۲].

در این آمار، میزان تلفات خطوط توزیع کشور در سال ۱۳۹۲ برابر با ۱۴/۸۳ درصد و تلفات در خطوط انتقال و فوق توزیع در همین سال ۳/۳۵ درصد و مجموع کل تلفات شبکه برق کشور برابر با ۱۴/۷۸ درصد گزارش گردیده است[۲].

همچنین بر اساس سخنان وزیر محترم نیرو جناب آقای مهندس چیت چیان، در افتتاحیه بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق ایران با کاهش ۱۰ درصد تلفات انرژی در بخش انتقال و توزیع، سالانه ۵ هزار میلیارد تومان صرفه‌جویی در مصرف سوخت صورت می‌گیرد و به عبارتی دیگر کاهش یک درصدی تلفات انرژی الکتریکی در خطوط برق کشور به مفهوم کاهش حداقل ۵۰۰ میلیارد تومان در مصرف سالیانه سوخت نیروگاهی کشور می باشد[۳].

باتوجه به ظرفیت ۷۰۰۰۰ مگاواتی برق کشور، یک درصد تلفات به معنای هدر رفت ۷۰۰ مگاوات برق تولیدی می باشد. با توجه به هزینه حدود یک میلیون دلاری ایجاد یک مگاوات نیروگاه ملاحظه می‌شود بیش از ۷۰۰ میلیون دلار (بیش از ۲۰۰۰۰ میلیارد ریال) سرمایه‌ای که برای ایجاد نیروگاه‌های کشور هزینه شده است، برای هریک درصد تلفات هدر رفته است[۳].

۳- سهم تلفات اهمی در کل تلفات شبکه برق کشور

نویسندگان آمار دقیقی از سهم دقیق هر یک از پارامترهای فنی و غیر فنی تاثیر گذار بر تلفات کل شبکه برق به دست نیاورده اند و در این بخش به نتایج ارائه شده در چند مقاله داخلی که به بررسی موردی این عوامل و تعیین سهم هر از از عوامل پرداخته اند اشاره خواهیم کرد.

در یکی از بررسی های صورت گرفته، نتایج ذیل مطابق جدول شماره ۱، به دست آمده است[۴].

جدول شماره ۱ : انواع تلفات در شبکه و مقدار آن ها بر حسب درصد

ردیف	انواع تلفات	درصد تلفات واقعی		درصد تلفات حداقل ممکن
		حداکثر	حداقل	
۱	تلفات اهمی خالص	۵/۲	۳/۶	۲/۸
۲	تلفات ناشی از سطح مقطع نامناسب	۱/۲۵	۰/۵	۰/۰۵
۳	تلفات ناشی از فرسودگی شبکه	۱/۵	۰/۸	۰
۴	تلفات ناشی از اتصالات سست	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۵
۵	تلفات ناشی از نامتعادلی	۱/۳	۱/۱	۰/۲
۶	تلفات در ترانسفورماتورها	۱/۶۵	۱/۵	۱/۳
۷	تلفات در تجهیزات پست	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱
۸	تلفات ناشی از کنتورها	۱	۰/۸	۰/۵
۹	سایرموارد (نشتی، غیر مجاز و ...)	۲/۲	۱/۶	۰/۴
	جمع	**۱۴/۴۵**	**۱۰/۱۷**	**۵/۴**

همانطور که مشخص است در این جدول تلفات اهمی بیش از ۳۰ درصد تلفات کل شبکه برق را شامل می شود و در صورتی که میزان تلفات کل شبکه توزیع کشور در سال ۱۳۹۲ را ملاک قرار دهیم می توان اظهار کرد که از ۱۴/۷۸ درصد کل تلفات شبکه توزیع کشور، حدود ۴/۵ درصد مربوط به تلفات اهمی هادی ها می باشد که با انتخاب صحیح هادی از نظر جنس و سطح مقطع، این مقدار قابل کاهش دادن می باشد.

۴- هادی های مورد استفاده در خطوط توزیع برق کشور

۴-۱- هادی های ACSR

هادی های آلومینیومی با مغزی فولاد یا ACSR به صورت گسترده در خطوط توزیع و انتقال کشور در چند دهه

گذشته استفاده شده اند و هنوز نیز این نوع از هادی ها جزو پرمصرف ترین محصولات در حوزه انتقال و توزیع کشور می باشند.

همانطور که ذکر گردید یکی از عوامل مهم در ایجاد تلفات در خطوط انتقال و توزیع کشور که به طور مستقیم به هادی مربوط می باشد تلفات اهمی است که سهم عمده ای در تلفات کلی موجود دارد. جهت کاهش تلفات اهمی یکی از اصلی ترین راهکارها استفاده از هادی هایی با مقاومت الکتریکی پایین می باشد. به عبارت دیگر جهت کاهش تلفات اهمی در یک هادی مشخص می باید تلاش نمود تا مقاومت الکتریکی هادی کاهش یابد. این روش باعث کاهش تلفات اهمی و به تبع آن کاهش هزینه مربوط به تلفات انرژی الکتریکی در کشور خواهد شد و صرفه جویی بالایی ایجاد خواهد نمود.

علی رغم تمامی تلاش های صورت گرفته شاهد آن هستیم هنوز تلفات الکتریکی به خصوص در خطوط توزیع کشور در سطح بالایی قرار دارد. لذا لازم است به دنبال راهکارهای دیگری برای کاهش این میزان تلفات در سطح خطوط توزیع کشور باشیم.

در سالیان گذشته در خطوط توزیع ۲۰ کیلو ولت کشور به طور کلی از هادی های آلومینیومی با مغز فولاد، ACSR، همچون Fox (Weasel)، Mink، Horse، Hyena (Dog) استفاده شده و به دلیل معادل بودن برخی از این هادی ها که درون پرانتز آورده شده اند، در آخرین دستورالعمل ابلاغ شده شرکت توانیر در سال ۱۳۹۱، پنج هادی مطابق جدول شماره ۲ معرفی شده اند[۵].

نکته ای که در انتخاب این هادی ها باید به آن توجه نمود تعداد لایه های آلومینیومی مورد استفاده در تولید این هادی ها می باشد. همانطور که مشخص است از بین ۵ هادی اشاره شده، ۳ هادی پرمصرف در خطوط توزیع یعنی هادی های فاکس، مینک و هاینا در ساختار خود فقط یک لایه آلومینیوم داشته که حول مغزی فولادی تابیده شده است که در ادامه به اهمیت این موضوع در افزایش تلفات اهمی و افت ولتاژ این هادی ها خواهیم پرداخت.

جدول شماره ۲- مشخصات فنی هادی های ACSR مورد استفاده در خطوط توزیع فشار متوسط

نام هادی			FOX	MINK	HYNEA	WOLF	LYNX
سطح مقطع نامی هادی		mm^2	۴۳	۷۴	۱۲۶	۱۹۵	۲۲۶
ساختار هادی (قطر* تعداد)	Al.	mm	۶*۲/۷۹	۶*۳/۶۶	۷*۴/۳۹	۳۰*۲/۵۹	۳۰*۲/۷۹
	St.		۱*۲/۷۹	۱*۳/۶۶	۷*۱/۹۳	۷*۲/۵۹	۷*۲/۷۹
تعدادلایه آلومینیوم			۱	۱	۱	۲	۲
قطر هادی		mm	۸/۳۷	۱۰/۹۸	۱۴/۵۷	۱۸/۱۳	۱۹/۵۳
وزن واحد طول		Kg/km	۱۴۸/۱	۲۵۴/۹	۴۵۰/۹	۷۲۵/۳	۸۴۱/۶
نیروی پارگی هادی		kN	۱۳/۲۱	۲۱/۶۷	۴۰/۹۱	۶۸/۹۱	۷۹/۹۷
حداکثر مقاومت DC هادی در ۲۰°C		Ω/km	۰/۷۸۱۲	۰/۴۵۴۰	۰/۲۷۰۸	۰/۱۸۲۹	۰/۱۵۷۶
مقاومت AC در فرکانس نامی	°C ۲۵	Ω/km	۰/۷۷۸۷	۰/۴۵۲۹	۰/۲۷۶۰	۰/۱۸۷۰	۰/۱۶۱۱
	°C ۵۰	Ω/km	۰/۸۵۵۶	۰/۴۹۷۶	۰/۳۰۳۳	۰/۲۰۵۴	۰/۱۷۷۰
	°C ۷۵	Ω/km	۰/۹۳۲۵	۰/۵۴۲۳	۰/۳۳۰۵	۰/۲۲۳۹	۰/۱۹۳۰
راکتانس القایی		Ω/km	۰/۲۸۵۶	۰/۲۶۸۵	۰/۲۵۰۷	۰/۲۳۷۰	۰/۲۳۲۳

۴-۲- هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی AAAC

بیش از چندین دهه است که جایگزینی هادی های فرسوده خطوط هوایی توزیع موجود بدون تغییر در نوع و موقعیت پایه ها و همچنین نصب شبکه های جدید با هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی، AAAC، با توجه به مزایای این نوع از هادی ها نسبت به هادی های مسی و ACSR، در کشورهای پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است.

کشورهای خاورمیانه مانند امارات، عربستان سعودی، یمن و قطر استفاده از هادی های AAAC را از حدود سال ۱۹۶۰ آغاز نموده اند. در ایران و در سال ۱۳۴۸ به همت وزارت آب و برق مشخصه های فلش- اسپن در دماهای مختلف نصب برای هادی آلومینیوم آلیاژی تحت عنوان Aldrey منتشر شد. وزارت مذکور در سال ۱۳۵۰ جدول هادی های آلومینیوم آلیاژی شامل هادی های آلیاژی با سطح مقطع ۳۵، ۷۰، ۱۲۰ و ۱۸۵ میلیمتر مربع را منتشر نمود. علی رغم تحقیق انجام گرفته به طور شفاف مشخص نگردید که چرا پس از سال های مذکور استفاده از هادی های AAAC در ایران رایج نگردید. با تامل در مطالب مندرج در این بخش متاسفانه فاصله زمانی قابل توجهی در بکارگیری هادی های AAAC در ایران نسبت به بسیاری از کشورها قابل تشخیص است. بنظر می رسد این امر اساساً به دلیل عدم اهمیت کافی به مقوله هادی ها به ویژه از طرف

محققین و دست اندرکاران صنعت توزیع نیروی برق کشور می باشد.

هر چند آمار دقیقی از میزان استفاده از این هادی ها در خطوط برق کشور وجود ندارد ولی برخی بررسی ها نشان می دهند که این محصول در سال های دور در برخی از خطوط انتقال و توزیع کشور استفاده شده، ولی در چند دهه گذشته از این هادی ها در خطوط توزیع و انتقال برق کشور استفاده نشده است.

هم اکنون پس از حدود ۴۰ سال و به همت معاونت هماهنگی توزیع توانیر- دفتر پشتیبانی توزیع و در کمیته ملی تخصصی هادی ها، دستورالعمل تعیین الزامات و معیارهای ارزیابی فنی و آزمون های هادی های آلومینیوم آلیاژی تصویب و به کلیه شرکت های توزیع کشور ابلاغ گردیده است و هادی های تمام آلیاژی مطابق جدول شماره ۳ به عنوان گزینه های انتخابی جهت جایگزینی با هادی های ACSR معمول معرفی شده اند[۶ و ۷].

جدول ۳ - مشخصات فنی هادی های AAAC خطوط توزیع فشار متوسط

نام هادی			AAAC 50	AAAC C 70	AAAC 120	AAAC 185
سطح مقطع نامی هادی		mm^2	۴۸	۷۲	۱۱۷	۱۸۱
ساختار هادی (قطر * تعداد)	Al.	mm	۷*۲/۹۵	۷*۳/۶۱	۱۹*۲/۸۰	۱۹/۳/۴۸
	St.		۰	۰	۰	۰
قطر هادی		mm	۸/۸۵	۱۰/۸۰	۱۴/۰۰	۱۷/۴۰
وزن واحد طول		Kg/km	۱۳۰/۶	۱۹۵/۶	۳۲۱/۲	۴۹۶/۱
نیروی پارگی هادی		kN	۱۴/۱۱	۲۱/۱۴	۳۴/۵۱	۵۳/۳۱
حداکثر مقاومت DC هادی در ۲۰°C		Ω/km	۰/۶۸۷۵	۰/۴۵۹۱	۰/۲۸۲۷	۰/۱۸۳۰
مقاومت AC در فرکانس نامی	۲۵°C	Ω/km	۰/۷۰۱۶	۰/۴۶۸۹	۰/۲۸۹۴	۰/۱۸۷۷
	۵۰°C	Ω/km	۰/۷۷۰۸	۰/۵۱۵۲	۰/۳۱۸۰	۰/۲۰۶۲
	۷۵°C	Ω/km	۰/۸۴۰۱	۰/۵۶۱۵	۰/۳۴۶۶	۰/۲۲۴۸
راکتانس القایی		Ω/km	۰/۲۸۲	۰/۲۶۹	۰/۲۵۳	۰/۲۴۰

۵- نسبت مقاومت AC به DC هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم

مقاومت الکتریکی هادی حامل جریان متناوب، بیشتر از زمانی است که هادی جریان مستقیم با همان بزرگی و در یک دمای مشابه حمل می کند. در هادی های همگن تک فلزی صلب یا تابیده شده، افزایش مقاومت AC به دلیل وجود اثر پوستی[۱] و اثر مجاورت[۲] می باشد[۸].

در هادی های ACSR، حضور مغزی فولادی منجر به افزایش جریان پسماند مغناطیسی[۳]، جریان های گردابی (فوکو)[۴] و توزیع مجدد چگالی جریان بین لایه های سیم های غیرآهنی می شود. تلفات مغناطیسی مغزی به دلیل جریان های فوکو و پسماند، باعث می گردد بخشی از ولتاژ در راستای عنصر القایی طولی در هر لایه جهت هم فاز شدن با جریان در همان لایه، افت نماید[۸].

بنابراین مقاومت آن لایه افزایش می یابد؛ علاوه بر افزایش مقاومت هر لایه غیر آهنی، توزیع جریان بین این لایه ها نیز نسبت به توزیع جریان مستقیم یا جریان متناوب با فقط تاثیر اثر پوستی، تغییر می نماید.

به صورت عملی و آزمایشگاهی نشان داده شده است که چگالی جریان و فاز آن در لایه میانی آلومینیومی در یک هادی ACSR سه لایه، بزرگتر از چگالی جریان لایه های خارجی و درونی می باشد[۸].

سیم ها در هر لایه در معرض اثر پوستی قرار داشته که بزرگی این اثر به محل قرار گیری لایه بستگی دارد.

توزیع نهایی جریان همان توزیعی است که از اثر ترانسفرمر[۵] به وجود آمده که هدف آن به حداقل رساندن مجموع تلفات توان هادی می باشد[۸].

نسبت مقاومت AC به DC در هادی هایی که دارای تعداد لایه آلومینیوم فرد می باشند بیشتر می باشد چراکه در این هادی ها حذف شار مغناطیسی که به دلیل وجود چرخش جریان در لایه هایی با جهت مختلف در لایه مجاور به وجود می آید، صورت نمی گیرد[۸].

بالاترین نسبت مقاومت الکتریکی AC به DC در هادی های ACSR که دارای یک لایه سیم آلومینیومی هستند اتفاق می افتد و کمترین نسبت مقاومت الکتریکی AC به DC در

[1] *Skin Effect*
2 proximity Effect
[3] *Magnetic Hysteresis Current*
[4] *Eddy Current*
[5] *Transformer Effect*

هادیهای ۲ لایه آلومینیوم رخ می دهد. به منظور کاهش نسبت مقاومت در هادیهای سه لایه، طول تاب لایه ها به صورت ویژه انتخاب و تعیین شده اند. هر چند برخی از ترکیبات طول تاب جهت تولید امکان پذیر نمی باشند[۸].
در این هادی ها با یک لایه آلومینیوم، به دلیل وجود شار میدان مغناطیسی بر روی مغزی فولادی، با عبور جریان و افزایش آن شاهد افزایش مقاومت AC هادی هستیم. به عبارت دیگر در این هادی ها با عبور جریان الکتریکی شاهد افزایش بسیار چشم گیر و قابل تامل، مقاومت الکتریکی AC بوده به طوری که با عبور ۷۵ درصد بار نامی از یک هادی یک لایه آلومینیومی با ساختار ۶ رشته آلومینیوم و ۷ رشته فولاد، امکان افزایش ۴۲ درصدی مقاومت الکتریکی متناوب آن وجود دارد کهاین امر به همین مقدار، منجر به افزایش میزان تلفات اهمی هادی خواهد شد[۹].

بر اساس هندبوک هادی های آلومینیومی، مقاومت AC هادی های تک لایه آلومینیومی متاثر از شار میدان مغناطیسی بر روی مغزی فولادی بوده (وجود میدان مغناطیسی غیر متوازن به دلیل وجود دو لایه با جهت بافت متفاوت) که این شار با افزایش جریان عبوری از هادی افزایش یافته و به تبع آن باعث افزایش مقاومت AC هادی می گردد[۹].

بنابراین به دلیل افزایش چشم گیر مقاومت الکتریکی AC بر اثر عبور جریان الکتریکی، هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم، کمتر به صورت الکتریکی مطلوب بوده و بیشتر در جاهایی که به استحکام بالا نیاز داشته و هدایت الکتریکی قربانی استحکام بالا می شود، مورد استفاده قرار می گیرند[۹] .

۶- اصلاح اطلاعات مقاومت الکتریکی AC و مقاومت القایی هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم خطوط توزیع، تحت عبور جریان و میزان تاثیر این اصلاحات در پارامترهای فنی

بر اساس آنچه در خصوص تاثیر اثرات مغناطیسی مغزی فولادی در مقاومت AC هادی های ACSR تحت بار، در بند قبلی گفته شد لازم است مقاومت AC و مقاومت القایی هادی های تک لایه آلومینیومی خطوط توزیع کشور یعنی هادی های فاکس، مینک و هاینا که در جدول شماره ۲ آورده شده اند ، دوباره محاسبه و سپس اصلاح گردند.
جهت انجام این محاسبات (افزایش مقاومت ناشی از اثرات مغناطیسی مغزی فولادی در هادی های ACSR با یک لایه آلومینیوم) از روابط زیر استفاده می گردد[۱۰ و ۱۱]:

$$H = \frac{c_s . I}{s} \quad \text{(Amper-turns per unit length)} \qquad (۱)$$

$$I^2 . \Delta R_a = n_c P_1 \quad \text{(watts)} \qquad (۲)$$

$$I^2 . \Delta X_a = n_c Q_1 \quad \text{(vars)} \qquad (۳)$$

$$\Delta R_a = n_c \frac{P_1}{I^2} = n_c \left(\frac{c_s}{s}\right)^2 . \frac{P_1}{H^2} \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۴)$$

$$\Delta X_a = n_c \frac{Q_1}{I^2} = n_c \left(\frac{c_s}{s}\right)^2 . \frac{Q_1}{H^2} \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۵)$$

$$\Delta R_1 = \frac{P_1}{H^2} \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۶)$$

$$\Delta X_1 = \frac{Q_1}{H^2} \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۷)$$

$$\Delta R_a = n_c \left(\frac{c_s}{s}\right)^2 . \Delta R_1 \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۸)$$

$$\Delta X_a = n_c \left(\frac{c_s}{s}\right)^2 . \Delta X_1 \quad (\Omega/\text{mile}) \qquad (۹)$$

که در آن H، شدت مغناطیسی حاصل از جریان؛ c_s، کسری از جریان کل که از رشته های آلومینیومی بصورت مارپیچی می گذرد؛ s، طول تاب؛ I، جریان عبوری؛ n_c، تعداد رشته های مغزی فولادی؛ P_1 و Q_1، به ترتیب تلفات واقعی و تلفات راکتیو یک رشته از مغزی فولاد ΔR_a و ΔX_a به ترتیب میزان افزایش مقاومت الکتریکی AC و مقاومت القایی هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم، بر اثر وجود مغزی فولادی می باشد که باید به مقاومت هادی در دمای مورد نظر افزوده شود.
پس از انجام محاسبات مربوطه و اعمال میزان تاثیر اثرات مغناطیسی مغزی فولادی در هادی های مورد نظر، مقاومت AC و مقاومت القایی به صورت جدول شماره ۴، اصلاح می گردند.
همانطور که مشخص است در اطلاعات مقاومتی جدول شماره ۲، اثرات مغناطیسی مغزی فولادی در هادی های فاکس، مینک و هاینا با یک لایه آلومینیوم بر اثر عبور جریان، دیده نشده است. پس از اعمال این اثرات، میزان مقاومت AC هادی های مورد نظر با تک لایه آلومینیوم، به میزان ۹ تا ۲۰ درصد افزایش پیدا می کنند که این امر می تواند منجر به افزایش تلفات اهمی هادی ها به همین میزان گردد.
ضمناً بر اساس جدول شماره ۴، مقاومت القایی این هادی ها نیز پس از اعمال تغییرات به میزان ۱۹ تا ۲۸

درصد افزایش یافته و به عبارت دیگر این امر می تواند به همین مقدار، باعث افزایش افت ولتاژ خطوط مورد استفاده گردد.

جدول ۴- مشخصات فنی هادی های ACSR بعد از اعمال اصلاحات مقاومتی

نام هادی		FOX	MINK	HYNEA
سطح مقطع نامی هادی	mm^2	۴۳	۷۴	۱۲۶
ساختار هادی (قطر* تعداد)	mm Al.	۶*۲/۷۹	۳*۳/۶۶	۷*۴/۳۹
	St.	۱*۲/۷۹	۱*۳/۶۶	۷*۱/۹۳
تعداد لایه آلومینیوم		۱	۱	۱
حداکثر مقاومت DC هادی در ۲۰°C	Ω/km	۰/۷۸۱۲	۰/۴۵۴۰	۰/۲۷۰۸
مقاومت AC در فرکانس نامی قبل از اصلاح	۲۵°C Ω/km	۰/۷۷۸۷	۰/۴۵۲۹	۰/۲۷۶۰
	۵۰°C Ω/km	۰/۸۵۵۶	۰/۴۹۷۶	۰/۳۰۳۳
	۷۵°C Ω/km	۰/۹۳۲۵	۰/۵۴۲۳	۰/۳۳۰۵
مقاومت AC در فرکانس نامی بعد از اصلاح	۲۵°C Ω/km	۰/۷۸۴۲	۰/۴۵۶۱	۰/۲۷۸۵
	۵۰°C Ω/km	۰/۹۳۰۹	۰/۵۷۲۷	۰/۳۶۵۵
	۷۵°C Ω/km	۱/۰۱۵	۰/۶۲۴۷	۰/۳۹۸۹
درصد افزایش مقاومت AC بعد از اصلاح نسبت به قبل	۲۵°C %	**۰/۷**	**۰/۷**	**۰/۹**
	۵۰°C %	**۸/۸**	**۱۵/۱**	**۲۰/۵**
	۷۵°C %	**۸/۹**	**۱۵/۲**	**۲۰/۷**
راکتانس القایی قبل از اصلاح	۵۰°C Ω/km	۰/۲۸۵۶	۰/۲۶۸۵	۰/۲۵۰۷
راکتانس القایی بعد از اصلاح	۵۰°C Ω/km	۰/۳۴۴۶	۰/۳۴۳۵	۰/۲۹۸۷
درصد افزایش مقاومت القایی بعد از اصلاح نسبت به قبل	%	**۲۰/۶۶**	**۲۷/۹۳**	**۱۹/۱۵**

۷- کاهش افت ولتاژ و تلفات اهمی شبکه با استفاده از هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی AAAC به جای هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم :

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول شماره ۴، مقاومت AC و مقاومت القایی هادی های ACSR و AAAC معادل آنها را که بر اساس استاندارد BS EN 50182 انتخاب شده اند، به ترتیب در جداول شماره ۵ و ۶ آورده شده است.

جهت انجام مقایسه ای مناسب، از استاندارد BS EN نزدیک ترین هادی های AAAC معادل ACSR از نظر مقاومت الکتریکی و ساختار برای انجام این منظور انتخاب شده اند[۱۲].

در ادامه، محاسبات مربوط به مقدار تلفات اهمی و افت ولتاژ هادی های انتخاب شده به صورت مقایسه ای، در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد معادل عبور ۷۵ درصد جریان نامی، صورت گرفته و نتایج آن به ترتیب در جداول شماره ۷ و ۸ ارائه گردیده است.

جدول ۵- مقاومت AC هادی های ACSR و AAAC معادل

هادی			مقاومت DC هادی در ۲۰°C	مقاومت AC هادی در ۵۰°C با عبور ۷۵٪ جریان نامی و فرکانس ۵۰ هرتز
نوع	نام تجاری	ساختار no./mm	Ω/km	Ω/km
ACSR	FOX	۶*۲/۷۹ ۱*۲/۷۹	۰/۷۸۱۲	۰/۹۵۳۰
AAAC	42-AL3	۷*۲/۷۷	۰/۷۷۹۷	۰/۸۷۱۹
ACSR	MINK	۶*۳/۶۶ ۱*۳/۶۶	۰/۴۵۴۰	۰/۵۸۵۵
AAAC	72/AL3	۷*۳/۶۱	۰/۴۵۹۱	۰/۵۱۳۴
ACSR	HYENA	۷*۴/۳۹ ۷*۱/۹۳	۰/۲۷۰۸	۰/۳۶۵۷
AAAC	125/AL3	۱۹*۲/۹۰	۰/۲۶۳۶	۰/۲۹۴۸

همانطور که از نتایج جداول ۷ و ۸ بر می آید استفاده از هادی های آلیاژی به جای هادی های ACSR تک لایه آلومینیوم فعلی، باعث کاهش تلفات اهمی به میزان۸/۵ ، ۱۲/۳ و ۱۹/۴ درصد و کاهش افت ولتاژ به میزان ۱۰/۵، ۱۵/۶ و ۲۰/۷ می شود که از این منظر این مقادیر بسیار چشم گیر بوده و قابل تامل می باشند.

جدول ۶- مقاومت القایی هادی های ACSR و AAAC معادل

هادی			راکتانس القایی در فاصله یک فوتی
نوع	نام تجاری	ساختار no./mm	Ω/km
ACSR	FOX	۶*۲/۷۹ ۱*۲/۷۹	۰/۳۴۴۶
AAAC	42-AL3	۷*۲/۷۷	۰/۲۸۲۰
ACSR	MINK	۶ * ۳/۶۶ ۱*۳/۶۶	۰/۳۴۳۵
AAAC	72/AL3	۷*۳/۶۱	۰/۲۶۹۰
ACSR	HYENA	۷*۴/۳۹ ۷*۱/۹۳	۰/۲۹۸۷
AAAC	125/AL3	۱۹*۲/۹۰	۰/۲۵۳۰

شایان ذکر است با افزایش میزان جریان در این هادی ها بر اساس روابط ۱ تا ۹، مقاومت AC و مقاومت القایی نیز افزایش مجدد خواهد داشت و نتایج از آنچه در جدول فوق محاسبه شده اند وخیم تر نیز خواهند گشت.

نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که شرایط تولیدی هادی های ACSR مورد نظر، به ویژه از نظر طول تاب، بهینه ترین حالت در نظر گرفته شده است؛ در صورتی که این هادی ها با طول تاب حداقل استاندارد تولید شوند آنگاه به طور مثال میزان افزایش مقاومت هادی هاینا در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد برابر با حداقل ۳۰ درصد خواهد شد و این به معنای ۳۰ درصد افزایش تلفات اهمی این هادی در خطوط ۲۰ کیلوولت توزیع کشور می باشد.

۸- کاهش هزینه افت ولتاژ و تلفات اهمی شبکه با استفاده از هادی های تمام آلومینیوم آلیاژی AAAC به جای هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم :

بر اساس آمار ارائه شده، طول خطوط فشار متوسط توزیع کشور در سال ۱۳۹۲ برابر با ۳۸۸۳۲۱ کیلومتر با رشد سالیانه ۷/۴ درصدی می باشد. این میزان رشد یعنی در طول یک سال شاهد افزایش این خطوط به میزان ۲۸۷۳۶ کیلومتر در کشور می باشیم[۲].

جدول ۷- مقایسه تلفات اهمی هادی های ACSR و AAAC معادل

هادی	جریان در ۵۰°C	تلفات انرژی یک مدار به طول ۱۰۰ کیلومتر	تلفات انرژی سالیانه	هزینه هر کیلووات ساعت انرژی تولید شده در کشور رایانه ای	درصد صرفه جویی (درصد کاهش تلفات اهمی)
نام تجاری	آمپر	کیلووات	مگاوات	ریال	٪
FOX	۱۱۵	۳۷۸۱	۳۳۱۲۲	۱۵۰۰	
42-AL3	۱۱۵	۳۴۵۹	۳۰۳۰۱	۱۵۰۰	۸/۵
MINK	۱۶۳	۴۶۶۷	۴۰۸۸۳	۱۵۰۰	
72/AL3	۱۶۳	۴۰۹۲	۳۵۸۴۶	۱۵۰۰	۱۲/۳
HYENA	۲۴۵	۶۵۸۵	۵۷۶۸۵	۱۵۰۰	
125/AL3	۲۴۵	۵۳۰۹	۴۶۵۰۷	۱۵۰۰	۱۹/۴

جدول ۸- مقایسه افت ولتاژ هادی های ACSR و AAAC معادل

هادی		جریان در ۵۰°C	میزان افت ولتاژ در یک خط ۱۰ کیلومتری ۲۰ کیلوولت با ضریب قدرت ۰/۹	درصد کاهش افت ولتاژ در هادی های AAAC نسبت به ACSR تک لایه آلومینیوم
نوع	نام تجاری			
		آمپر	کیلوولت	Ω/km
ACSR	FOX	۱۱۵	۴/۰۴۳	
AAAC	42-AL3		۳/۶۱۸	۱۰/۵
ACSR	MINK	۱۶۳	۲/۶۳۹	
AAAC	72/AL3		۲/۲۲۶	۱۵/۶
ACSR	HYENA	۲۴۵	۱/۷۱۸	
AAAC	125/AL3		۱/۳۶۳	۲۰/۷

از آنجا که در حال حاضر در خطوط فشار متوسط توزیع کشور بیشتر از هادی های ACSR تک لایه آلومینیوم به ویژه هادی های مینک و هاینا استفاده می شود، در صورتی که هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق در کشور را به صورت یارانه ای در سال ۱۳۹۳ برابر با ۱۵۰۰ ریال و بر اساس نرخ آزاد سوخت مصرفی ۷۳۰۰ ریال در نظر بگیریم، با فرض استفاده از این دو هادی به میزان برابر در توسعه خطوط پیش رو، میزان صرفه جویی در تلفات این خطوط در صورت استفاده از هادی های معادل AAAC، مطابق جدول شماره ۹، در طول یک سال با هزینه برق یارانه ای، ۳۴۹۶ میلیارد ریال و با برق آزاد برابر با ۱۷۰۱۰ میلیارد ریال خواهد شد[۱۳].

جدول ۹- مقایسه هزینه تلفات هادی های ACSR و AAAC معادل

هادی	جریان در ۵۰°C	تلفات انرژی یک مدار به طول ۱۴۳۶۸ کیلومتر در سال	هزینه تلفات سالیانه با برق یارانه ای ۱۵۰۰ ریال هر کیلووات ساعت	هزینه تلفات سالیانه با برق آزاد ۷۳۰۰ ریال هر کیلووات ساعت	میزان صرفه جویی سالیانه با برق آزاد ۷۳۰۰ ریالی
نام تجاری	آمپر	مگاوات	میلیارد ریال	میلیارد ریال	میلیارد ریال
MINK	۱۶۳	۵۸۷۳۸۶۲	۸۸۱۱	۴۲۸۷۹	
72/AL3	۱۶۳	۵۱۵۰۵۴۰	۷۷۲۶	۳۷۵۹۹	۵۲۸۰
HYENA	۲۴۵	۸۲۸۸۵۵۴	۱۲۴۳۳	۶۰۵۰۶	
125/AL3	۲۴۵	۶۶۸۱۶۱۳	۱۰۰۲۲	۴۸۷۷۶	۱۱۷۳۰
کل هزینه صرفه جویی سالیانه از محل کاهش هزینه تلفات (میلیارد ریال):					**۱۷۰۱۰**

۹- نتیجه‌گیری

هدف از ارائه این مقاله، ارائه راهکار جهت کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ هادی های مورد استفاده در شبکه برق فشار متوسط توزیع کشور می باشد. عدم استفاده از هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم در خطوط ۲۰ کیلوولت توزیع برق کشور و استفاده از هادی های AAAC به منظور کاهش تلفات اهمی و کاهش افت ولتاژ خطوط، مورد نظر می باشد.

بر اساس آنچه در خصوص تلفات مغناطیسی مغزی فولادی در هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم ارائه شد نتایج مهم ذیل به دست آمده است:

۱. هادی های ACSR با یک لایه آلومینیوم مانند هادی های فاکس، مینک و هاینا که در خطوط توزیع فشار متوسط هوایی ایران مورد استفاده قرار می گیرند، جزو گروه هادی های الکتریکی نبوده و در جایی که ویژگی های الکتریکی هادی فدای استحکام مکانیکی آن می گردد می توانند مورد استفاده قرار گیرند.

۲. وجود مغزی فولادی در هادی های مذکور، باعث ایجاد جریان گردابی و پسماند مغناطیسی شده به طوری که مقاومت AC و مقاومت القایی در این هادی ها افزایش چشم گیری دارند.

۳. در هادی های فاکس، مینک و هاینا به ترتیب در

دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و عبور ۷۵ درصد جریان نامی هادی، شاهد افزایش تقریبی ۹، ۱۵ و ۲۰ درصدی مقاومت AC و به تبع آن افزایش تلفات اهمی این هادی ها به همین مقدار در مقایسه با هادی های معادل AAAC می باشیم.

۴. بر اثر تلفات مغناطیسی مغزی فولادی در هادی های فاکس، مینک و هاینا به ترتیب شاهد افزایش ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ درصدی افت ولتاژ نسبت به هادی های AAAC معادل خود هستیم.

۵. استفاده از این هادی ها در خطوط ۲۰ کیلوولت کشور با فرض استفاده از هادی های مینک و هاینا در توسعه یک ساله این خطوط با قیمت تمام شده برق آزاد برابر با ۷۳۰۰ ریال برای هر کیلووات ساعت برابر با افزایش هزینه ۱۷۰۱۰ میلیارد ریالی برای یک سال می باشد که با استفاده از هادی های AAAC این مقدار هزینه در طول یک سال صرفه جویی می شود.

۶. با توجه به اهمیت بحث کاهش تلفات و همچنین ویژگی های منحصر به فرد هادی های آلیاژی AAAC به ویژه در خطوط توزیع کشور، به نظر می رسد پیشنهاد می گردد استفاده از هادی های ACSR با یک لایه آلومینیوم در این خطوط ممنوع شده و هادی های AAAC جایگزین شوند.

۷. با بهره گیری از هادی های AAAC و صرفه جویی ایجاد شده از محل کاهش تلفات اهمی و افت ولتاژ در طول یک سال، می توان به جایگزین کردن هادی های ACSR تک لایه آلومینیوم موجود در خطوط ۲۰ کیلوولت کشور پرداخته و در طول چند سال، شاهد حذف هادی های ACSR با تک لایه آلومینیوم در خطوط توزیع و به تبع آن افزایش بهره وری در این خطوط باشیم.

مراجع

[۱]نجف زاده، حسن. "بررسی تلفات در بخش توزیع و روش های کاهش آن." پروژه شماره ۲۳، سایت www.wikipower.ir، ۲۴۲ صفحه.

[۲]معاونت منابع انسانی و تحقیقات، (۱۳۹۳) "۴۷ سال صنعت برق ایران در آیینه آمار- ۱۳۴۶-۱۳۹۲."برگرفته از سایت آمار توانیر، ۴۷ صفحه.

[3] http://barghnews.com/fa/news/6335.

[۴] کابلی، مهدی، قاسملو قیداری، مهدی(۱۳۸۳) "بررسی تلفات در شبکه های توزیع برق زنجان." نهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق ، ۸ صفحه.

[۵]معاونت هماهنگی توزیع توانیر، (۱۳۹۱)"دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون های هادی های آلومینیوم با مغز فولاد (ACSR)." کمیته تخصصی هادی ها، ۱۹ صفحه.

[۶]معاونت هماهنگی توزیع توانیر، (۱۳۹۱)"دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون های هادی های آلومینیوم آلیاژی مورد استفاده در شبکه های هوایی (AAAC)." کمیته تخصصی هادی ها، ۱۸ صفحه.

[۷] طرفدار حق، مهرداد.(۱۳۸۹) "ضرورت ها، مزایا وموانع به کارگیری هادیهای تمام آلومینیوم آلیاژی در شبکه های توزیع هوایی ایران." پانزدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق ، ۱۰ صفحه.

[8] Cigre, (April 2008). "Alternating Current (AC) Resistance Of Helically Stranded Conductors ." Working Group B2.12, ,pp 58.

[9] L.Kirkpatrick, (1989). "Aluminum Electrical Conductor Handbook."Third Edition ,Chapter 3 & 4.

[10] W.A.Lewis, P.D.Tuttle, (1958). "The Resistance and Reactance Of Aluminum Conductors, Steel Reinforced." AIEE Transactions, Col. 77 ,pt. III, , pp 1189-1215.

[11] W.A.Lewis, L.W.Matsch, (1958). "The Magnetic Properties of ACSR Core Wire."Abid ,pp 1178-1189.

[12] BS EN 50182, (2013). "Conductors for Overhead Lines-Round Wires Concentric Lay Stranded Conductors.",pp78.

[۱۳] فلاحتیان، هوشنگ. معاون وزیر نیرو، خبرگزاری مهر، شناسه خبر ۲۲۹۶۶۱۵.