

هادیهای هوایی روکش دار - نسل آینده خطوط توزیع در ایران

مهرداد طرفدارحق^۱، سید محمد سید قیاسی^۲، کریم روشن میلانی^۳

دانشگاه تبریز^۱، شرکت سیمکات تبریز^۲، شرکت توزیع برق آذربایجانشرقی^۳

کلمات کلیدی: هادیهای هوایی روکش دار، خطوط توزیع

چکیده

مقاله حاضر به معرفی ویژگی های هادیهای هوایی روکش دار با عایق پلی اتیلن کراس لینک (Crosslinked Polyethylene (XLPE و بررسی امکان استفاده از این هادیهها در خطوط توزیع 20 KV کشور می پردازد. انواع خطوط هوایی عایق شده، هادیهای هوایی روکش دار، ویژگی های الکتریکی، ویژگی های مکانیکی و ملاحظات اقتصادی خطوط هوایی روکش دار موضوعات اصلی مقاله می باشند.

۱ - مقدمه

گرچه بیش از چند دهه از نصب خطوط هوایی عایق شده در شبکه های 20KV کشورهای پیشرفته نمی گذرد اما مزایای فنی اقتصادی، زیست محیطی، ایمنی و افزایش کیفیت برق این نوع از خطوط، موجب گسترش قابل توجه آنها در شبکه های توزیع گردیده است. بعنوان مثال بیش از ۳۰٪ شبکه توزیع درفیلاند بطول ۳۲۰۰ کیلومتر، ۶۰٪ شبکه توزیع درسوند بطول ۲۸۰۰ کیلومتر، ۳۰٪ شبکه توزیع درنورژ بطول ۲۲۰۰ کیلومتر و ۹۶٪ شبکه توزیع در کره جنوبی با این نوع از خطوط جایگزین شده است. این در حالی است که اولین پروژه های خطوط هوایی عایق شده در سال ۱۹۷۰ در فنلاند اجرا شده و از نصب این خطوط در کره جنوبی بیش از ۱۵ سال نمی گذرد. بطور کلی با استفاده از خطوط هوایی عایق شده می توان به مزایایی همچون موارد زیر دست یافت :

- ۱ - کاهش قطعی های کوتاه مدت و بلندمدت انرژی الکتریکی
- ۲ - کاهش انرژی های توزیع نشده
- ۳ - امکان کاهش خسارات ناشی از آزادسازی حریم خطوط (Way-Leave Corridor)
- ۴ - افزایش قابلیت اطمینان شبکه بویژه در یک بازار برق رقابتی
- ۵ - حفظ ایمنی تجهیزات و استفاده کنندگان
- ۶ - حفظ محیط زیست از طریق کاهش شاخه زنی، قطع درختان و جلوگیری از مرگ و میر پرندگان
- ۷ - کاهش نشتی برق و برق دزدی
- ۸ - کاهش هزینه های نگهداری خط
- ۹ - افزایش امکان تعمیرات دوره ای و پیش بینی شده
- ۱۰ - کاهش ابعاد کراس آرمها و در نتیجه کاهش گشتاور و افزایش زیبایی محیط
- ۱۱ - امکان استفاده از میزان قابل توجهی از تکنیکها، ابزار آلات و تجربیات نصب خطوط رایج در احداث خطوط هوایی روکش دار
- ۱۲ - افت ولتاژ کمتر

۱۳ - خاصیت خازنی بیشتر

مزایای فوق به همراه امکان تولید انبوه این نوع از هادیها با تکنولوژی قابل دسترس و سرمایه گذاری معقول، لزوم اهمیت به استفاده از این نوع هادیها را توجیه می نماید. در این خصوص می توان به مقالات متعدد مانند استفاده از این هادیها در کشورهایی همچون اتریش، فنلاند، سوئد و نروژ [۱-۳]، استفاده از عایق های جدید و بررسی ویژگی های XLPE [۴ و ۵]، بررسی مسائل ایمنی و جریانهای ناشی [۶] و حفاظت خط در مقابل اضافه ولتاژهای داخلی و صاعقه [۷] اشاره نمود.

متأسفانه بنظر می رسد ویژگیهای خطوط هوایی روکش دار، یراق آلات، نحوه نصب، روشهای بهره برداری، ویژگی های الکتریکی و مکانیکی و همچنین مسائل اقتصادی مرتبط با این خطوط در داخل کشور چندان شناخته شده نمی باشد و لذا نیاز به انجام تحقیقات مرتبط، انتقال تکنولوژی و تدوین استانداردهای داخلی در این مورد الزامی بنظر می رسد. مقاله حاضر بمنظور بررسی اطلاعات اساسی در این خصوص پس از بخش مقدمه، در پنج بخش تحت عناوین انواع خطوط هوایی عایق شده، خطوط هوایی روکش دار، ویژگیهای الکتریکی خطوط هوایی روکش دار، ویژگیهای مکانیکی خطوط هوایی روکش دار، ملاحظات اقتصادی و نتیجه گیری به بررسی این نوع از خطوط می پردازد.

۲ - انواع خطوط هوایی عایق شده

شبکه های توزیع در اکثر کشورهای در حال توسعه و جهان سوم با استفاده از هادیهای لخت اجرا می شوند. این در حالی است که مصرف کنندگان انرژی الکتریکی در کشورهای پیشرفته بویژه در طی چند دهه اخیر شاهد روند رو به رشد استفاده از انواع خطوط هوایی عایق شده در شبکه های توزیع هوایی می باشند [۱-۳].

مسلماً مزایای ذکر شده در بخش ۱، دلایل استفاده از این نوع خطوط را کاملاً توجیه می نماید. رایج ترین انواع خطوط هوایی عایق شده در شبکه های توزیع هوایی عبارتند از:

۱ - هادی روکش دار (Covered Conductor (CC)

۲ - هادی با روکش ضخیم (Covered Conductor Thick (CCT)

۳ - کابل باندل هوایی (کابل خود نگهدار (Self-supporting Cable) در دو نوع با پوشش فلزی و با پوشش غیرفلزی

(یا به اختصار ABC) (Metallic/Non-Metallic Screened Aerial Bundled Cable (M/NMSABC)

۴ - کابل هوایی فاصله دار (Aerial Spacer Cable (ASC)

از بین موارد فوق CC و CCT بسیار مشابه می باشند (شکل ۱ و ۲). هر دوی آنها دارای هادیهای مجزا هستند که با عایق پلی اتیلن کراس لینک (Cross Linked Polyethylene (XLPE پوشیده شده اند. تفاوت اساسی CCT با CC این است که در نوع CCT ضخامت عایق، متناسب با سطح ولتاژ و سایز هادی تغییر میکند و همچنین دارای روکش خارجی از جنس پلی اتیلن سنگین (HDPE) High Density Polyethylene می باشد. نوع CC صرفاً در مقابل برخوردهای اتفاقی و کوتاه مدت دوفاز به هم یا فاز به زمین استقامت الکتریکی نشان می دهد در حالیکه CCT می تواند در مقابل تماس های طولانی مدت دو فاز به هم یا یک فاز به زمین استقامت عایقی مناسب داشته باشد.



شکل ۲- هادی هوایی با روکش ضخیم CCT



شکل ۱- هادی هوایی روکش دار CC

کابل باندل هوایی از سه فاز مجزای عایق شده و یک هادی لخت از جنس آلومینیوم آلیاژی (و گاهی یک هادی اضافی زمین) تشکیل می شود. بر روی فازهای عایق شده با XLPE، یک پوشش هادی جهت شکل دهی میدان الکتریکی کشیده شده است. و نهایتاً با یک نوار عایق و یک لایه HDPE ساختار اساسی کابل هوایی شکل می گیرد. شکل ۳ و ۴ بترتیب نمونه های کابل های باندل هوایی و نحوه اتصال آنها به پایه ها را نشان می دهد. در کابل های فوق، یک لایه نیمه هادی رشته هادیهای تابیده شده و عایق را دربرمی گیرد. رشته های تابیده شده میانی از جنس فولاد یا آلومینیوم آلیاژی بوده و جهت افزایش مقاومت مکانیکی کابل هوایی می باشد. کابل های NMSABC (با پوشش غیرفلزی) از نظر ساختار مشابه کابل های MSABC (با پوشش فلزی) می باشند اما فاقد پوشش هادی شکل دهنده میدان هستند.



شکل ۴- نحوه نصب کابل باندل هوایی به پایه



شکل ۳- نمونه ای از کابل باندل هوایی

در خطوط با کابل هوایی فاصله دار از کابل های هوایی که عموماً دو پوشش عایقی و روکشی دارند استفاده می شود. لایه داخلی از پلی اتیلن کراس لینک (XLPE) و لایه خارجی از پلی اتیلن مشکی یا خاکستری مقاوم در مقابل ترک خوردگی با چگالی زیاد و مقاوم در برابر سائیدگی تشکیل می شود. در ضمن لایه نازکی از نیمه هادی، هادیهای تابیده شده و عایق را در بر گرفته است. علاوه بر لایه های مذکور، در ولتاژهای بالاتر از ۱۵ کیلوولت از یک لایه محافظ دیگر جهت جلوگیری از ترک خوردگی لایه آخر نیز ممکن است استفاده شده باشد. کابل های مذکور توسط نگهدارنده های مخصوص که عموماً از جنس پلی اتیلن می باشند دور از هم نگهداشته می شوند. شکل ۵ و ۶ بترتیب نمونه هایی از کابل هوایی فاصله دار و نگهدارنده آنها را نشان می دهد.



شکل ۶- نمونه ای از نگهدارنده کابل هوایی



شکل ۵- نمونه ای از کابل هوایی فاصله دار

بمنظور مقایسه انواع کابل ها و هادیهای روکش دار فوق باید توجه داشت که کابل های هوایی فاصله دار نیازمند استفاده از یراق آلات، آموزش های جدید کادر فنی و صرف هزینه های بیشتر هستند. این موارد موجب می گردد استفاده از این خطوط در اولویتهای پائینتر در مقایسه با سایر خطوط قرار گیرد [۸]. از طرف دیگر وزن و قیمت MSABC تقریباً دو برابر نوع NMSABC بوده و همچنین مقادیر جریان نامی و جریان عیب آنها کمتر از NMSABC می باشد. کابل های NMSABC نیز گرانتر از انواع CC و CCT بوده و در ضمن انجام عملیات خط گرم در مورد آنها بسیار دشوارتر می باشد. بدین ترتیب از بین انواع چهارگانه خطوط هوایی عایق دار توزیع، صرفاً دو نوع CC و CCT مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. البته خطوط CCT گرانتر از نوع CC می باشد و بجز در مناطق پردرخت یا طوفان خیز، استفاده از خطوط CC بجهت اقتصادی بودن توصیه میشود. به همین جهت اکثر خطوط هوایی عایق دار در کشورهای پیشرفته از نوع هادی های روکش دار (CC) می باشند.

۳ - هادیهای روکش دار Covered Conductors

جنس هادی در انواع مختلف هادی های روکش دار شبکه های توزیع از نوع آلومینیوم، آلومینیوم آلیاژی و یا آلومینیوم با مغز فولاد (ACSR) می باشد (در شبکه های فشار ضعیف از هادیهای مسی نیز استفاده شده است). با وجود اینکه آلومینیوم به دلیل وزن سبک به عنوان یک هادی مناسب به طور وسیعی در هادی های روکش دار مورد استفاده قرار می گیرد ولی عواملی همچون افزایش استقامت مکانیکی و ممانعت از پارگی و خوردگی منجر به استفاده از آلومینیوم آلیاژی در این خصوص شده است. شکل دهی رشته هادیها نیز یکی از مواردی است که منجر به کاهش تأثیرات نامطلوب عوامل فیزیکی محیط بر روی هادیها و نهایتاً خطوط می گردد. استفاده از رشته هادیهای شکل یافته به صورت فشرده و تولید هادیهای کمپکت روکش دار از دیگر مواردی است که ضمن بهبود شرایط مکانیکی هادیهای فوق، موجب سهولت توزیع حرارت در آنها شده و کاهش مقاومت الکتریکی را نیز به همراه دارد.

هادیهای روکش دار دارای یک روکش عایقی با ضخامت معینی (به طور متوسط ۳ میلیمتر) برای تمام رده های شبکه فشار متوسط تا ۳۳/۱۹ کیلوولت می باشند. پس از ساخت هادی و کمپکت نمودن آن ابتدا یک لایه نسبتاً نازک از جنس نیمه هادی بر روی هادی کشیده شده و سپس با ضخامت معینی از مواد عایقی XPLE (پلی اتیلن کراسلینک) پوشیده می شود. این هادیها در ولتاژ کاری ۲۰ KV نسبت به برخورد های موردی بین فازها و فاز به زمین نقش عایقی را داشته و از ایجاد اتصالاتی ها ممانعت به عمل می آورند. عایق این نوع هادیها غالباً به رنگ مشکی بوده و در مقابل اشعه ماوراء بنفش خورشیدی (UV) از مقاومت لازم برخوردار است. لایه نیمه هادی پوششی بر روی سطوح هادیها در ولتاژهای ۲۰ KV و بالاتر نقش شکل دهی میدان را دارد. لازم به ذکر است اخیراً هادیهای روکش دار در بعضی از شرکتهای داخلی در حال طی مراحل تولید می باشد. جدول ۱ نمونه ای از هادیهای روکش دار آلومینیوم با مغز فولادی (ACSR) شبکه های فشار متوسط تولید شده در شرکت سیمکات را بعنوان یکی از شرکتهای پیشرو در این زمینه، نشان می دهد.

۴- ویژگیهای الکتریکی خطوط هوایی روکش دار

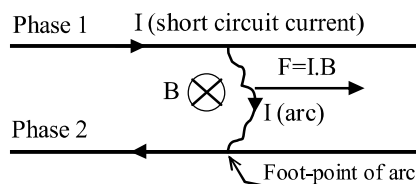
وجود پوشش عایقی در هادیهای هوایی روکشدار موجب ایجاد ویژگیهای الکتریکی خاص برای این نوع از هادیها می گردد. مهمترین این موارد عبارتند از:

- ۱- حفاظت در مقابل صاعقه
- ۲- تخلیه های جزئی
- ۳- تغییر مقادیر اندوکتانس و کاپاسیتانس خط
- ۴- جریان شارژ

در ادامه مطالب این بخش به توضیح اجمالی ویژگی های فوق در خطوط توزیع فشار متوسط 20kV برای هادیهای روکش دار CC خواهیم پرداخت.

۴-۱- حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ

خطوط هوایی توزیع در معرض برخورد صاعقه قرار دارند. بروز هرگونه اضافه ولتاژ در هادیهای روکش دار بگونه ای که موجب ایجاد قوس الکتریکی بین فازها یا فاز و زمین گردد می تواند موجب ایجاد حرارت اضافی و خرابی عایق ها شود. دلیل این امر این است که وجود روکش عایقی موجب عدم حرکت پای قوس بر روی هادی می گردد. در واقع در هادیهای لخت در صورت بروز قوس الکتریکی بر روی هادی، قوس الکتریکی بر روی هادی حرکت نموده و در نتیجه حرارت موضعی بوجود نمی آید. شکل (۵) این موضوع را نشان می دهد. در واقع قوس الکتریکی (مثلا بین دو فاز)، مانند یک سیم حامل جریان می باشد که در اطراف خود میدان مغناطیسی با اندوکسیون B را ایجاد می کند. به محض ایجاد میدان مغناطیسی مذکور، از طرف میدان بر قوس الکتریکی حامل جریان، نیروی F وارد شده و موجب جابجایی قوس در طول سیم می گردد. جهت نیروی وارده را توسط قانون دست چپ فلیمنگ می توان تعیین نمود. این در حالی است که روکش عایقی ها موجب عدم حرکت قوس گردیده و حرارت حاصل از قوس که بستگی به میزان جریان و تنظیم رله ها دارد تنش حرارتی موضعی شدید ایجاد می نماید که حتی می تواند موجب آسیب دیدن هادیها نیز گردد.



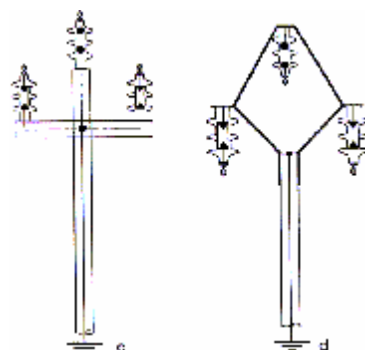
شکل ۷- نیروی وارده بر قوس از طرف میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان قوس

بمنظور جلوگیری از مشکل فوق دو روش زیر مورد استفاده قرار می گیرد :

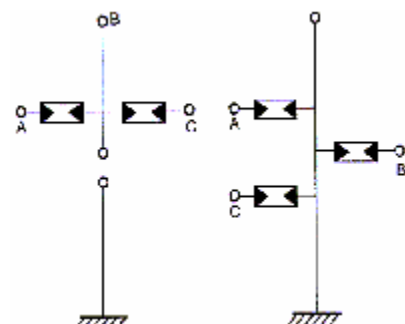
۱- استفاده از سیم محافظ جهت جلوگیری از برخورد صاعقه به هادیها.

۲- استفاده از تجهیزات منحرف ساز قوس

شکل (۸) دو روش رایج استفاده از هادی محافظ را نشان می دهد. در شکل (الف-۸)، هادی میانی (فاز B)، نقش محافظت دو فاز دیگر را دارد. فازهای A و C از طریق برقگیر به پایه متصل بوده و فاز B نیز از طریق یک برقگیر هوایی از زمین ایزوله شده است. در شکل (ب-۸) هادیها از طریق برقگیر به پایه متصل بوده و یک سیم محافظ در بالای پایه، محافظت هادیها در مقابل برخورد صاعقه را بر عهده دارد مسلماً روش بکار رفته در شکل (الف-۸) موجب می گردد که در صورت برخورد صاعقه به خط، این برخورد بر روی فاز B که یکی از فازهای حامل انرژی الکتریکی می باشد موجب افزایش ولتاژ شود. در ضمن یک فاصله هوایی که موجب تنشهای مکانیکی قابل توجه می گردد مورد نیاز می باشد. از طرف دیگر در روش شکل (ب-۸) کیفیت حفاظت هادیها بهتر بوده اما این روش مستلزم استفاده از یک سیم محافظ اضافی و در نتیجه افزایش هزینه های نصب و بهره برداری خط میباشد. طبق آخرین تحقیقات، می توان با ترکیب دو روش فوق به بهترین شرایط حفاظت خط دست یافت. شکل (۹) نمونه هایی از پایه هایی را که بر اساس ترکیب روشهای فوق طراحی شده اند نشان می دهد.



شکل (۹) ساختارهای مختلف پایه های خطوط با روش ترکیبی



الف- بدون سیم محافظ ب- با سیم محافظ

شکل (۸) روشهای حفاظت خطوط CC

گرچه با استفاده از روشهای فوق می توان خطرات ناشی از برخورد صاعقه را کاهش داد اما عموماً از تجهیزات منحرف ساز قوس بر روی پایه ها که از نظر اقتصادی شرایط بسیار مناسبتری دارند استفاده می شود. شکل (۱۰) نمونه ای از تجهیزات منحرف ساز قوس را نشان می دهد. در صورت برخورد صاعقه به هادی و افزایش ولتاژ آن، انرژی صاعقه از طریق ایجاد قوس در محل تجهیزات مذکور تخلیه شده و از ایجاد قوس در محل برخورد صاعقه به هادی جلوگیری می شود. باید توجه داشت که اتصال الکتریکی تجهیزات مذکور به هادی موجب هم پتانسیل بودن تجهیزات انحراف دهنده قوس و هادی در تمامی شرایط عملکرد خط، از جمله حین برخورد صاعقه می گردد.



شکل ۱۰- نمونه ای از تجهیزات انحراف ساز قوس

۴-۲- تخلیه های جزئی

در محل اتصال هادیهای هوایی روکش دار به پایه ها، تغییر شکل شدید در منحنی سیم ایجاد میگردد. در واقع آویزان بودن هادیها از مقره ها موجب می شود که در محل اتصال مذکور که هادی انحناى شدید دارد، شدت میدان الکتریکی بطور قابل ملاحظه ای افزایش یابد. گرچه این موضوع در هادیهای لخت نیز وجود دارد اما شرایط مذکور صرفاً در هادیهای هوایی روکش دار موجب بروز مشکل می گردد.

دلیل این امر تشدید تخلیه های جزئی در عایق هادی به جهت افزایش شدت میدان الکتریکی است که نهایتاً می تواند موجب شکست عایقی و کاهش عمر مفید عایق گردد. بمنظور حل این مشکل، هادیهای روکش دار را در محل اتصال به مقره، لخت می نمایند. بدین ترتیب با توجه به ایجاد نقاط بدون پوشش، باید از یراق آلات عایقی در این محل ها استفاده نمود که این امر نیز موجب افزایش هزینه نصب و بهره برداری از این نوع خطوط می گردد.

۴-۳- تغییر مقادیر اندوکتانس و کاپاسیتانس خط

روکش دار بودن هادیها امکان نزدیک نمودن آنها به همدیگر را فراهم می کند. با توجه به روابط (۱) و (۲) می توان مشاهده نمود که این موضوع موجب کاهش فاصله متوسط هندسی (Deq)، و در نتیجه کاهش اندوکتانس و افزایش کاپاسیتانس خط می گردد. مهمترین اثر کاهش اندوکتانس، تقلیل افت ولتاژ در طول خط می باشد. از طرف دیگر افزایش ظرفیت خازنی خط ضمن بهبود پروفیل ولتاژ خط می تواند در تامین قدرت راکتیو شبکه که هزینه های زیادی را به مشترکین تحمیل می کند موثر باشد.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{Deq}{r'} \quad (1)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{Deq}{r}} \quad (2)$$

$$Deq = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \quad (3)$$

که در روابط فوق داریم:

L ، اندوکتانس واحد طول خط (H/m)، C ، ظرفیت خازنی واحد طول خط (F/m)، ϵ_0 ، پرمیتویته محیط خط، Deq ، فاصله متوسط هندسی بین فازهای سه گانه (m)، $D_{12} D_{23} D_{31}$ ، بترتیب فاصله بین فازهای ۱ و ۲ و ۳ (m)، r ، شعاع ظاهری هادی (m)، r' ، شعاع هادی با در نظر گرفتن اثر رشته ها (m)

۴-۴ جریان شارژ

هاریهای هوایی روکش دار (CC) دارای بار الکتریکی بر روی عایق خود هستند. بعنوان مثال جریان شارژ برای یک هادی ۷۹۵ Kcmil با عایق پلی اتیلن که در ولتاژ ۲۵ کیلو ولت شیلد کامل گردیده است معادل ۰/۵ میلی آمپر در هر فوت است. مسلماً این جریان کم نمی تواند در صورت تماس اجسام یا اشخاص با هادی، موجب عملکرد فیوزها یا بریکرها گردد. این موضوع در خصوص محافظت جان اشخاص بسیار مهم است. در واقع در صورت تماس اشخاص با هادی های روکش دار، سیستم های حفاظتی قادر به تشخیص و قطع جریان نمی باشند. گرچه طبق استاندارد صرفاً جریانهای بیشتر از ۵ میلی آمپر برای اشخاص خطرناک می باشد و در اکثر مواقع جریان شارژ خطوط CC کمتر از مقدار فوق می باشد اما با توجه به اینکه جریان شارژ به ولتاژ کار، سطح مقطع هادی، ضخامت عایق و نوع هادی وابسته است بنابراین به هیچوجه نمی توان با اطمینان کامل هادی های روکش دار را لمس نمود. اگر به این موارد مسائلی همچون تخریب عایقی و یا خراش های مکانیکی احتمالی را اضافه کنیم رعایت موارد ایمنی کار با این نوع هادیها بسیار جدی تر خواهد بود. در واقع استانداردهایی همچون NESE و OSHA استانداردهای فواصل مجاز در مناطق پر ازدحام و یا مکان هایی را که احتمال تماس افراد با هادیهای روکش دار وجود دارد را دقیقاً مشابه هادیهای لخت در نظر گرفته است.

۵- ویژگیهای مکانیکی خطوط هوایی روکش دار

مشخصه حداکثر مقاومت کششی (حد نیروی گسیختگی) (U.T.S.) هادی آلومینیوم فولاد عبارت است از مجموع نیروی گسیختگی مفتول های آلومینیومی بعلاوه نیروی لازم برای یک درصد افزایش طول نسبی مفتول های فولادی (یا مفتول های آلیاژی) که برحسب واحد کیلوگرم نیرو برای هادیهای آلومینیوم فولاد با نسبت $Al/St=6/1$ در استاندارد شبکه های توزیع ایران مشخص شده اند و بعنوان مهمترین فاکتور طراحی خطوط هوایی در نظر گرفته می شوند. حداکثر تنش این هادیها عبارتند از نسبت حداکثر کشش U.T.S بر سطح مقطع سیم که از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$T_0 = \frac{U.T.S}{A} \quad (۴)$$

T_0 : تنش هادی [Kgf/mm^2], U.T.S: حد نیروی گسیختگی هادی [Kgf],
A: سطح مقطع نامی هادی [mm^2]

مقدار تنش سیم های آلومینیوم فولاد فعلی خطوط ایران با در نظر گرفتن ضریب اطمینان سیم $n=3$ طبق استاندارد وزارت نیرو مقدار ۱۱ کیلوگرم نیرو بر میلیمتر مربع بدست می آید. این مقدار برای هادیهای روکش دار CC بطور متوسط حدود ده کیلوگرم نیرو بر میلیمتر مربع می باشد. بدین ترتیب بدلیل استقامت بالای هادیهای CC و محدود بودن قدرت تیرهای بتنی به ۷ کیلوگرم نیرو بر میلیمتر مربع عملاً پارگی سیم های روکش دار در خطوط توزیع منتفی می گردد. از طرف دیگر براساس رابطه (۵) ملاحظه میگردد افزایش وزن هادیهای روکش دار نسبت به هادیهای لخت موجب افزایش نسبت کشش به وزن واحد طول هادیهای روکش دار خواهد گردید. مقدار راجع نسبت کشش به وزن واحد طول هادی های روکش دار بطور متوسط معادل ۸ است. در حالی که این مقدار برای هادیهای لخت بطور متوسط مساوی ۵ می باشد. با توجه به رابطه (۵) این مشکل را می توان با افزایش فلش سیم رفع نمود. یعنی در اجرای سیم کشی با هادیهای روکش دار در صورت انتخاب مقدار بیشتر برای فلش (f)، مقدار کشش هادیها در حد مجاز باقی می ماند. باید توجه داشت که شل شدگی زیاد هادیهای روکش دار بدلیل عدم اتصالی در برخورد فازها عامل باز دارنده در طراحی خط نمی باشد. از طرف دیگر این میزان شل شدگی با توان دوم فاصله بین پایه ها (S) نیز رابطه مستقیم دارد یعنی کم کردن فاصله بین پایه ها نیز بدون هیچ تغییر در سازه های فعلی می تواند مشکل تنش اضافی هادیهای روکش دار را حل نماید:

$$f = \frac{\omega S^2}{8T} = \frac{S^2}{8T/\omega} \quad (۵)$$

S: فاصله بین دو پایه متوالی (اسپین) [m], f: میزان شل شدگی سیم یا فلش [m], T: مقدار کشش وارده بر هادی [Kgf],
 ω : وزن واحد طول هادی [Kg/Km]

با روکش دار کردن هادیهای لخت پارامترهای تاثیرگذار دیگری در طراحی مکانیکی خطوط بایستی تجدید نظر گردند. با مقایسه هادیهای لخت و هادیهای روکش دار با سطح مقطع نامی یکسان آلومینیوم ملاحظه می گردد، بطور متوسط ۴۶ درصد افزایش وزن هادیهای CC در واحد طول نسبت به هادیهای لخت و نیز ۵۳ درصد افزایش قطر بیرونی هادیهای روکش دار CC ویژگیهای خاص مکانیکی برای طراحی و بهره برداری از این خطوط را می طلبد. تولید کنندگان فعلی هادیهای روکش دار تلاش می نمایند با کاهش قطر هادی آلومینیوم از طریق کمپکت کردن و یا استفاده از آلیاژهای خاص آلومینیومی تا حدودی سطح باد خور و وزن واحد طول سیم ها را کاهش دهند. از طرف دیگر با روکش دار کردن هادیها و صیقلی شدن سطح خارجی و همچنین انتخاب رنگ سیاه برای روکش که موجب افزایش حرارت جذب شده خورشید می گردد شرایط برای تشکیل یخ کاهش یافته و شرایط بهتر مکانیکی برای هادی ایجاد می شود. همچنین ماهیت عایق بودن فازها امکان کم کردن فاصله بین هادیها با استفاده از طول کمتر کراس آرم و نگهدارنده های یک تکه را فراهم می نماید که یکی از محاسن طراحی مکانیکی این خطوط می باشد.

۶- ملاحظات اقتصادی هادیهای هوایی روکش دار

هزینه های سرمایه گذاری اولیه ، هزینه های تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی و خسارات وارده در اثر قطعی برق و انرژی های توزیع نشده از موارد اصلی است که در مقایسه خطوط توزیع هوایی موجود و خطوط اجرا شده با هادیهای هوایی روکش دار مورد توجه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن جزئیات هریک از هزینه های مذکور و انجام محاسبات مربوطه در یک افق ۲۵ ساله و با احتساب نرخ کاهش ارزش ۴٪ و برگشت سرمایه ۱۰٪، هزینه های زیر به ازای هر تیر (یا فاصله دو تیر) حاصل میشود.

جدول ۲- مقایسه اقتصادی بین خطوط با هادیهای روکش دار و بدون روکش (هزینه ها بر حسب هزار ریال به ازای هر تیر میباشد)

خطوط توزیع هوایی موجود	سرمایه گذاری	تعمیرات پیشگیرانه	تعمیرات اصلاحی	خسارات قطعی برق	جمع هزینه ها
۷۴۱۶	۲۶۱۶	۵۳۶	۱۶۵۶	۱۲۲۲۴	
خطوط توزیع هوایی روکش دار	۹۷۹۲	۴۰۰	۸۰	۵۵۲	۱۰۸۲۴

نتایج فوق مبین این واقعیت می باشد که علیرغم بالا بودن ۳۲ درصدی هزینه سرمایه گذاری در خطوط توزیع هوایی روکش دار، کل هزینه های مصروفه در ۲۵ سال ، ۱۱٪ کمتر از خطوط توزیع هوایی موجود می باشد. این کاهش درحالی است که هیچ یک از هزینه های مربوط به آزاد سازی حریم و شاخه زنی مسیر خطوط توزیع در نظر گرفته نشده باشد. براساس برآورد انجام شده در شرکت توزیع برق آذربایجان شرقی در سالهای ۷۸ تا ۸۱ میانگین هزینه های آزادسازی حریم (عرصه واعیانی) در مناطق شهری ۸۰ میلیون ریال در هر کیلومتر و در مناطق روستایی ۵ میلیون ریال در هر کیلومتر بوده است و طی همین سالها بیش از ۱۰ میلیون ریال در هر کیلومتر بطور متوسط از بابت شاخه زنی پرداخت خسارت شده است. ضمن اینکه هزینه های شاخه زنی از هر چند سال متناوباً تکرار می گردد. با اجرای خطوط توزیع هوایی روکش دار و متعاقب آن پیشنهاد تجدید نظر در فواصل حریم خطوط توزیع ، قدمی مهم در جهت کاهش هزینه های آزادسازی حریم و شاخه زنی درختان برداشته خواهد شد و تصویب آن، کاهش بیش از پیش هزینه های تمام شده خطوط توزیع هوایی روکش دار را در بردارد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به مزایای فنی، اقتصادی، زیست محیطی، کاهش قطعی ها، زیبایی مسیر خط و سایر موارد مذکور در مقاله لزوم اهمیت هر چه بیشتر دست اندر کاران و مدیران بخش توزیع کشور به انواع خطوط عایق شده کاملاً محسوس می باشد. بنظر می رسد از بین انواع خطوط عایق شده، خطوط با هادیهای روکش دار (CC) از نظر هزینه، امکانات ایجاد خط تولید و استفاده گسترده از یراق آلات، تجربیات و تیرهای موجود در کشور مناسبترین نوع خطوط می باشد. البته بهره برداری از این خطوط مستلزم استفاده از یراق آلات ویژه هادی قوس (و یا پایه های ویژه)، کراس آرمهای کوتاهتر، تجهیزات عایق بندی خط در محل اتصال به مقره می باشد که در مقایسه با انواع دیگر خطوط مشابه شرایط بسیار مناسبتری را از نظر امکان تولید قطعات دارد. این خطوط سرمایه گذاری اولیه بیشتری نسبت به خطوط رایج دارند اما در طول مدت بهره برداری مفید خط حتی بدون در نظر گرفتن صرفه جویی های ناشی از آزاد سازی حریم وشاخه زنی مسیرخطوط بسیار اقتصادی تر از خطوط رایج می باشند.

۸- مراجع

- [1] W. Panosch, K. Schongrundner, K. Kominek, "20 KV Overhead Lines with Covered Conductors", CIRED 2001, 18-21 June 2001, Sec. 1-19.
- [2] L. Voidhaug, C. Robertson, "MV Overhead Lines Using XLPE Covered Conductors – Scandinavian Experience and Norweb Developments", The Reliability of Transmission and Distribution Equipment Conference, 29-31 March 1995, pp. 52-60.
- [3] K. Alstoft, S. Refsnaes, T. Bovre, H. Thomassen, "A New Overhead Line Concept Based on Covered Conductors", CIRED, 2-5 Hune 1997, pp. 3.7.1-3.7.5
- [4] S. Ramachandran, L. H. Gross, "New Flexible Insulation for Distribution Power Cables", Rural Electric Power Conference (REPC), Raleigh – Durham, NC, 4-6 May, 2003, pp. A4-1-A4-4.
- [5] C. C. Landinger, A. L. Clapp, W. A. Thue, "Safety Considerations of Aerial Systems Using Insulated and Coverd Wire and Cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No.2, April 1997, pp. 1012-1016.
- [6] T. Henriksen, K. Alstad, J. Huse, " Lightning Protection Mean for XLPE- Covered Conductors as Integral Parts of the Line Insulation", CIRED, 2-5 Hune 1997, pp. 3.29.1-3.29.6.
- [7] M.R. Soares, " Spacer and ABC Lines Aid in Reliability", T & D World Magazine, Nov. 1997.

جدول ۱- مشخصات فنی نمونه ای از هادیهای روکش دار شبکه فشار متوسط تولیدی توسط شرکت تولید سیم و کابل تبریز(سیمکات)

جنس هادی: آلومینیوم سخت کشیده شده، نوع هادی: ACSR، جنس عایق: XLPE

نام هادی	سطح مقطع نامی mm ²	ساختار هادی		وزن هادی		عایق		مقاومت الکتریکی Ohm/Km	نیروی پارگی KN	هادی تمام شده		بسته بندی	
		آلومینیوم	فولاد	آلومینیوم	فولاد	ضخامت	وزن			قطر	وزن	سایز مترایز قرقره	
		N×Mm	N×Mm	Kh/m	Kh/m	mm	Kg			mm	Kg/Km	m	
Weasel	۳۶	۶×۲/۵۹	۱×۲/۵۹	۸۷	۴۱	۳	۱۰۷	۰/۹۰۷۷	۱۱/۴	۱۳/۸	۲۳۵	۱۲۰	۴۰۰۰
Fox	۴۲	۶×۲/۷۹	۱×۲/۷۹	۱۰۱	۴۸	۳	۱۱۳	۰/۷۸۲۷	۱۳/۲	۱۴/۴	۲۶۲	۱۲۰	۴۰۰۰
Mink	۷۳	۶×۳/۶۶	۱×۳/۶۶	۱۷۳	۸۲	۳	۱۳۹	۰/۴۵۴۱	۲۱/۸	۱۷/۰	۳۹۴	۱۴۰	۴۰۰۰
DOG	۱۱۸	۶×۴/۷۲	۷×۱/۵۷	۲۸۸	۱۰۶	۳/۵	۲۰۴	۰/۳۳۲۷	۳۲/۷	۲۱/۲	۵۹۸	۱۴۰	۲۰۰۰
Hyena	۱۲۶	۷×۴/۳۹	۷×۱/۹۳	۲۹۰	۱۶۰	۳/۵	۲۰۹	۰/۲۷۱۲	۴۰/۹	۲۱/۶	۶۵۹	۱۴۰	۲۰۰۰
Lynx	۲۲۶	۳۰×۲/۷۹	۷×۲/۷۹	۵۰۷	۳۳۵	۴	۳۱۱	۰/۱۵۷۶	۷۹/۸	۲۷/۵	۱۱۵۳	۱۸۰	۲۰۰۰