

مدل سازی و تخمین تلفات کرونا در خطوط انتقال HVDC دو قطبی

با استفاده از روش المان محدود

نغمه مرصعی^۱، محمد تبریزیان^{۲*}، مقداد انصاریان^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری

(دریافت: ۹۶/۱۲/۰۲، پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۸)

چکیده: تلفات کرونا یکی از مسائل اصلی در طراحی خطوط انتقال HVDC می باشد. تحقیقات بسیار زیادی در زمینه محاسبات تلفات کرونا در خطوط انتقال DC در ولتاژهای مختلف خط صورت پذیرفته است. در خطوط انتقال دو قطبی HVDC، یون های مثبت، منفی و ذرات ناشی از ترکیب یون ها بایکدیگر تحت تاثیر کرونا تولید می گردند. با توجه به حضور ذرات مختلف در کرونا، پیچیدگی محاسبات نسبت به میدان های تک قطبی بیشتر خواهد بود. در این مقاله روابط دو قطبی حاکم بر میدان حل شده و پس از محاسبه چگالی جریان بارهای مثبت و منفی، تلفات کرونا محاسبه می گردد. در محاسبات مربوط به چگالی جریان به منظور ساده سازی، فرض بر این خواهد بود که تمامی محدوده دارای بارهای مثبت و منفی بوده و ضخامت محیط شبیه سازی شده در اطراف کابل ها، محدود باشد و پتانسیل زمین به عنوان مرجع برابر با صفر در نظر گرفته خواهد شد. روش های عددی مختلفی برای محاسبه میدان الکتریکی وجود دارند. این روش های عددی قادر هستند مسایلی را که در آنها حل تحلیلی بسیار مشکل یا غیرممکن است را حل نمایند. روش های عددی پرکاربرد شامل روش های تفاضل محدود، المان محدود، المان مرزی، شبیه سازی بار و مونت کارلو می باشند. در این مقاله از روش المان محدود در محاسبه میدان کرونا در خطوط انتقال دو قطبی HVDC استفاده خواهد شد هم چنین در توپولوژی به کاررفته از روش شبیه سازی بار نیز استفاده خواهد شد.

کلیدواژه ها: خطوط انتقال دو قطبی، تلفات کرونا، روش المان محدود، HVDC

۱- مقدمه

نموده و استنباط کرده است که رابطه پاپکوف به طور منطقی نتایج صحیحی را برای هادی های هموار ارائه می دهد، اما ثابت تجربی P ، یک تابعی از دمای خط می باشد. منابع [۳-۵]، اولین قدم ها برای ارائه یک روش عددی جهت حل میدان های یونیزه شده مربوط به خطوط انتقال HVDC تک قطبی و دو قطبی ارائه دادند. فرض Deutsch و روش های متناظر دیگر، توسط محققان زیادی مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. مطالعات [۶-۸]، نشان می دهد که خطوط میدان یونیزه شده در هوای صاف به طور قابل توجهی از خطوط متناظر با بار آزاد فاصله دارد. واضح است زمانی که باد وجود دارد، فرض Deutsch صحیح نمی باشد. مرجع [۹]، از فرض Deutsch استفاده نمی کند اما فرض دیگری را به کار می برد که چگالی بار در نقطه θ بر روی سطح هادی با متوسط چگالی بار آزاد در داخل سر بهمین در نقطه ای مشابه θ متناسب باشد. که θ زاویه اندازه گیری شده نسبت به محور تقارن می باشد. در مراجع [۱۰-۱۳]، الگوریتم المان محدود برای حل میدان های یونیزه شده ارائه گردیده و روش ارائه شده برای حل میدان یونیزه شده مرتبط با خطوط واقعی تک قطبی و

تحلیل پدیده کرونا و یونیزاسیون میدان های الکتریکی در اثر شدت میدان الکتریکی قوی برای اولین بار توسط تاونزند صورت پذیرفت. تاونزند پدیده یونیزاسیون را در عایق های گازی (شبیه هوا) مورد بررسی قرار داد و پدیده شکست عایقی گازها را در دو مرحله تقسیم بندی نمود [۱]. پاپکوف تجزیه و تحلیلی تقریبی از میدان یونیزه شده انجام داد. در این مرجع یک ثابت تجربی P معرفی شده است تا توزیع جریان ناهمگون در سطح زمین در نظر گرفته شود. مرجع [۲]، یک تحقیق مقایسه ای مابین جریان های کرونا اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه پاپکوف ارائه می دهد. در این مقاله پیشنهاد شده است که یک سازگاری منطقی می تواند با افزایش ثابت تجربی P به دست آید (با سه برابر کردن ضریب P). مرجع [۳]، نتایج عددی مشخصه جریان-ولتاژ را با مقادیر به دست آمده از رابطه پاپکوف مقایسه

صرف نظر کرد.

روابط ریاضی توصیف کننده میدان دو قطبی یونیزه شده توسط کرونا در یک خط انتقال HVDC به صورت زیر قابل بیان است:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_+ + \rho_-}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J_{\pm} = \mp \frac{R_i \rho_{\pm}}{e} \quad (2)$$

$$J_{\pm} = \mu_{\pm} \rho_{\pm} E \mp D_{\pm} \nabla \rho_{\pm} \quad (3)$$

$$J = J_+ + J_- \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (6)$$

رابطه اول، رابطه پواسون در خصوص میدان الکتریکی E ، رابطه دوم، شرط پیوستگی جریان، رابطه سوم، چگالی جریان مثبت و منفی، رابطه چهارم، چگالی جریان کل و رابطه پنجم، پیوستگی بردار جریان کل و رابطه آخر، مربوط به رابطه بین میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی (ϕ) می باشد. ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلا، μ_+ و μ_- بیان کننده قابلیت جابجایی یون های مثبت و منفی است. ρ_+ و ρ_- بیان کننده چگالی های بارهای مثبت و منفی می باشند. D_+ و D_- ضریب انتشار یون های مثبت و منفی است و R_i ضریب بازترکیبی الکترون های آزاد با یون ها می باشد e نشان دهنده بار الکتریکی الکترون بر حسب کولن است.

روش انجام کار دارای سه بخش اصلی زیر می باشد: محاسبه بارهای فرضی اولیه و چگالی حجمی بارهای آزاد اولیه، به روز رسانی بارهای فرضی و چگالی حجمی بارهای آزاد و تحلیل نتایج و تکرار مساله در صورت نیاز.

در مرحله محاسبه بارهای فرضی اولیه و چگالی حجمی بارهای آزاد اولیه تنها از نرم افزار متلب (Matlab) استفاده شده و در هر دو مرحله دیگر از نرم افزارهای ANSYS و متلب به موازات هم استفاده شده است.

شرایط واقعی در یک خط انتقال DC فشار قوی دو قطبی با ولتاژ $\pm 400KV$ در شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفته است. در طول شبیه سازی ها از نرم افزارهای ANSYS و متلب در بخش های مختلف استفاده شده است. در بخش اول، شبیه سازی ها بدون در نظر گرفتن کرونا صورت پذیرفته است، در ادامه بارهای آزاد در اطراف خطوط انتقال نیز در نظر گرفته شده و مساله کرونا مورد بررسی قرار گرفته است. فلوجارت محاسبات

دوقطبی به کار رفته است. فنون مختلفی برای حل معادله پواسون و رابطه پیوستگی جریان به کار گرفته شده است. به عنوان مثال، رابطه پواسون در مرجع [۱۴]، توسط روش CSM، در مراجع [۷ و ۱۷-۱۵]، توسط روش المان مرزی (BEM)^۱، در مرجع [۱۸]، توسط روش المان محدود (FEM)، در مرجع [۱۹]، با روش معادله انتگرالی و در مرجع [۲۰] با روش معادله مشخصه حل شده است، البته رابطه پیوستگی جریان به یک رابطه دیفرانسیلی معمولی در طول خطوط میدان در مراجع [۱۶-۱۵] کاهش یافته است. در مراجع [۲۱-۲۲]، روش هایی برای حل رابطه پیوستگی جریان بر اساس مش المان محدود ارائه شده است. منبع [۲۳]، یک روش متفاوت ارائه داده است و در آن گسسته سازی رابطه پواسون با FEM انجام شده است. در این مرجع بار و پتانسیل نقطه ای به طور هم زمان مجهول در نظر گرفته شده است و روش نیوتن برای حل روابط غیرخطی استفاده شده است. منابع [۲۴-۲۵]، در مساله رسوب دهنده الکترواستاتیکی، روش اجزاء محدود دو بعدی را برای محاسبه میدان های یونیزه شده به کار برده اند و نمونه روش های تحلیلی کامل تر در این موضوع نیز در منابع [۲۶-۳۰]، ارائه و تشریح شده است.

۲- روش تحقیق

فرضیات عمده در این تحقیق عبارتند از:

(a) فضا از بارهای مثبت و منفی پر می باشد. ضخامت لایه یونیزاسیون در اطراف هادی آن قدر کوچک است که با توجه به فضای بین دو الکتروود قابل صرف نظر می باشد.

(b) قابلیت تحرک یون های مثبت و منفی μ_+ و μ_- ثابت می باشد.

(c) ضریب انتشار یون های مثبت و منفی قابل صرف نظر است.

(d) میدان سطح تخلیه هادی بدون توجه به میزان شدت کرونا در مقداری ثابت باقی می ماند (فرض Kaptzov)

با توجه به این که ضخامت لایه یونیزه شده در مقایسه با ارتفاع خط انتقال از سطح زمین بسیار کوچک می باشد فرض اول قابل قبول است. فرض صرف نظر از ضریب انتشار با توجه به نتایج به دست آمده در مرجع [۳۱]، اتخاذ می گردد. چون طبق نتایج به دست آمده در این مرجع، در نظر گرفتن ضریب انتشار باعث افزایش جزئی دقت محاسبات شده است و تاثیر کمی برای این ضریب مشاهده شده است. مرجع [۱۴]، بر روی تاثیر مدت زمان عمر یون ها بر روی حل معادلات میدان یونیزه شده در خط انتقال تک قطبی تک هادی بحث کرده است. نتایج این مرجع نشان می دهد که تغییر در سرعت یون ها در طول مدت زمان عمر یون تاثیر ناچیزی در نتایج دارد و بنابراین، می توان از آن

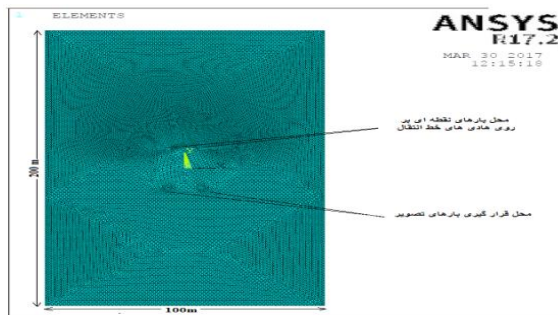
با داشتن ۱۲ نقطه بر روی دو هادی و نوشتن ۱۲ رابطه خطی به صورت رابطه (۷)، می توان بارهای خطی را پس از حل دستگاه معادلات به دست آورد.

$$V_j = \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r'_{ij}}{r_{ij}}\right) \quad , j = 1, 2, \dots, 12 \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $r_{i,j}$ و $r'_{i,j}$ به ترتیب بیان کننده فاصله بار i ام از نقطه j ام و فاصله تصویر بار i ام از نقطه j ام می باشند [۳۳-۳۲].

با مشخص شدن بارهای فرضی اولیه می توان شبیه سازی را در نرم افزار ANSYS.17.2 انجام داده و توزیع میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی را در فضای شبیه سازی به دست آورد. در این بخش شبیه سازی دارای بارهای تصویر نیز می باشد و ۲۴ بار خطی بر روی مدل شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

در این بخش مش بندی مطابق شکل (۱) انجام می شود. همان گونه که در این شکل دیده می شود حجم فضای شبیه سازی به علت در نظر گرفتن تصویر بارهای فرضی افزایش یافته است. در این شکل محدوده شبیه سازی دارای ارتفاع ۲۰۰ m و عرض ۱۰۰ m می باشد. محدوده کرونا که در اطراف خط انتقال برابر با قطر هادی خط انتقال می باشد. با توجه به این که قطر هادی برابر با ۱۰ cm می باشد لذا در اطراف هر هادی ۱۰ cm به عنوان محدوده کرونا در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) محدوده کرونا و نحوه تقسیم بندی آن در اطراف هادی خط انتقال نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود محدوده کرونا با ضخامت ۱۰ cm در اطراف هادی خط انتقال به ۱۰ لایه تقسیم بندی شده است و هر لایه دارای ضخامتی برابر با ۱ cm می باشد. این تقسیم بندی به منظور در نظر گرفتن بارهای آزاد در مراحل بعدی بر روی گره های فضای مش بندی تعبیه شده است. مش بندی مربوط به لایه کرونا (در اطراف هادی) در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای مش بندی کل بخش ها از المان های مثلثی استفاده شده است و مش ها به صورت متقارن در هر لایه قرار گرفته اند.



شکل (۱): نحوه مش بندی فضای شبیه سازی

به نحوی است که مرتباً خروجی های نرم افزار ANSYS در نرم افزار متلب، مورد تحلیل قرار می گیرند و ورودی های جدید ANSYS به دست می آیند و با توجه به این که ورودی و خروجی ها در ANSYS گره به گره در هر مرحله باید بارگذاری و استخراج شوند، لذا حجم محاسبات خیلی زیاد بوده و آنالیزها بسیار زمان بر است. برای انجام شبیه سازی ها در این بخش از یک خط انتقال دو قطبی تک باندل با ولتاژهای $\pm 400KV$ استفاده نموده و مشخصات فیزیکی خط مورد بحث به شرح زیر فرض شده است:

- شعاع هادی خط (بر حسب متر): $R = 0.0457$

- فاصله طولی دو لاین از هم (بر حسب متر): $D = 11.6$

- ارتفاع خط انتقال از سطح زمین (متر): $H = 14$

بازه شبیه سازی در راستای محور X و Y، در حدود ۷ برابر ارتفاع خط (۱۰۰ متر) در نظر گرفته خواهد شد.

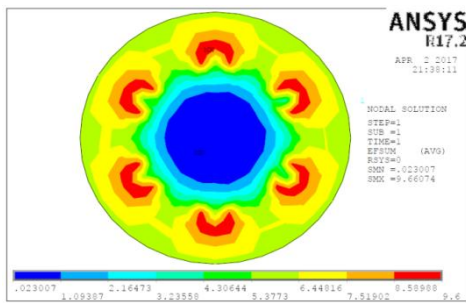
شرایط مرزی نیز در حوزه شبیه سازی به صورت زیر است:

۱- پتانسیل الکتریکی بر روی هادی های خط انتقال به ترتیب برابر با $400KV+$ و $400KV-$ می باشد.

۲- پتانسیل الکتریکی بر روی سطح زمین ($Y=0$)، برابر با صفر می باشد.

۳- به منظور افزایش دقت محاسبات، بر روی سه مرز $Y=100$ ، $X=0$ و $X=50$ ، پتانسیل الکتریکی برابر با صفر در نظر گرفته نشده است تا روش المان محدود مقادیر واقعی (که بسیار کوچک و نزدیک صفر می باشند) پارامترهای الکتریکی را نمایش دهد.

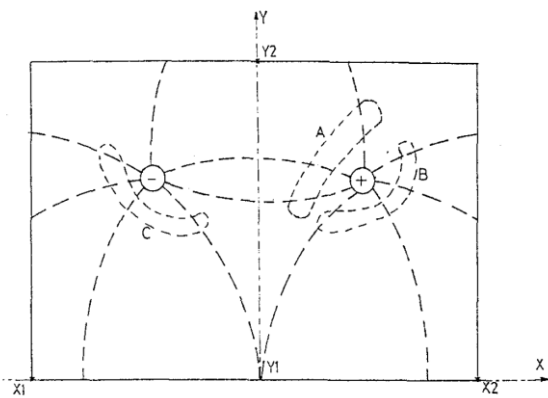
با توجه به این که وجود بارهای آزاد در فضای اطراف خطوط انتقال باعث بر هم خوردن نحوه توزیع میدان الکتریکی و همچنین پتانسیل الکتریکی در فضای اطراف خط انتقال می شود لذا نمی توان در شبیه سازی های مربوط به این بخش، ولتاژ ثابتی بر روی خطوط انتقال در شبیه سازی ها در نظر گرفت به منظور حل این مشکل از روش بارهای فرضی استفاده خواهد شد و هر هادی خط انتقال با تعدادی بار خطی در داخل هادی به منظور لحاظ نمودن ولتاژ خط انتقال در نظر گرفته خواهند شد. همچنین به منظور در نظر گرفتن پتانسیل صفر در سطح زمین از تئوری تصاویر استفاده شده و معکوس بارهای الکتریکی در داخل محیط شبیه سازی در نظر گرفته خواهند شد. هر هادی از خط انتقال با ۶ بار نقطه ای نمایش داده شده است که این بارهای نقطه ای در داخل هادی و در شعاعی کمتر از شعاع هادی در نظر گرفته شده است. ۶ نقطه (با موقعیت های $j=1, 2, \dots, 12$) بر روی هر هادی به منظور نوشتن روابط پتانسیل و محاسبه بارهای مجهول در داخل هادی در نظر گرفته شده است. به طور کلی ۲۴ بار خطی در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): توزیع میدان الکتریکی بر روی هادی با بارگذاری‌های انجام‌شده به روش بارهای فرضی

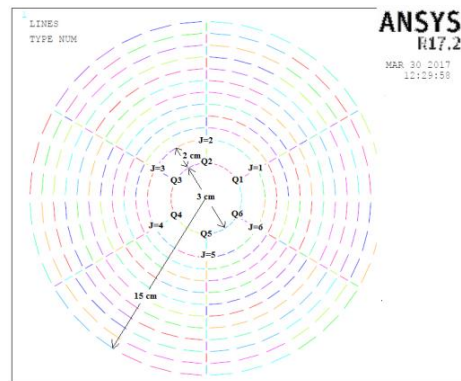
در ادامه به منظور محاسبه چگالی بارهای آزاد، فضای کرونا به دو بخش (میدان‌های تک قطبی و دو قطبی) تقسیم بندی می‌شود. این تقسیم‌بندی در شکل (۶) نمایش داده شده است. محدوده‌های C و B به ترتیب محدودهای تک قطبی مثبت و منفی می‌باشند و محدوده A ، محدوده دو قطبی می‌باشد. در محدوده C بارهای آزاد (ناشی از کرونا) مثبت، در محدوده B بارهای آزاد منفی و در محدوده A بارهای آزاد مثبت و منفی وجود دارند [۳۴].

به منظور پیاده‌سازی این موضوع فضای کرونای اطراف خط انتقال به ۳۶ مرز هم‌میدان ($k=1$ الی $k=36$) و ۱۱ مرز هم پتانسیل ($i=1$ الی $i=11$) تقسیم‌بندی شده است. ۱۸ مرز هم میدان متعلق به محدوده دو قطبی ($k=1$ الی $k=18$) و ۱۸ مرز باقیمانده ($k=19$ الی $k=36$) متعلق به محدوده تک قطبی می‌باشند.

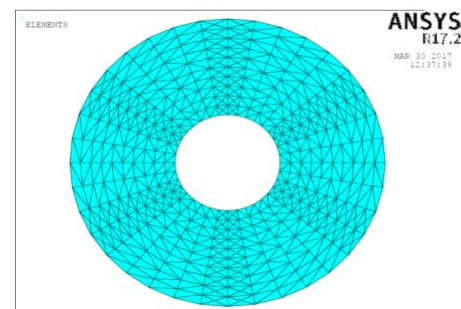


شکل (۶): تقسیم‌بندی فضای کرونا به دو محدوده تک قطبی و سه قطبی

در محدوده میدان دو قطبی ($k=1$ الی $k=18$) چگالی بارهای آزاد مثبت و منفی بر روی مرز هم پتانسیل $i=1$ به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۸-۹) محاسبه می‌شود. رابطه (۸) مربوط به محدوده میدان تک قطبی اطراف هادی مثبت می‌باشد و به طور مشابه رابطه (۹) توزیع بارهای الکتریکی منفی در مجاورت هادی خط انتقال با پلاریته منفی را نمایش می‌دهد. در محدوده میدان



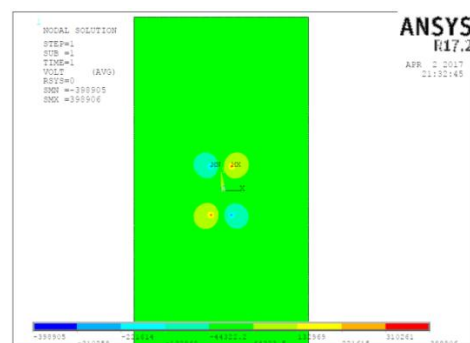
شکل (۲): تقسیم‌بندی فضای کرونا در اطراف هادی خط انتقال



شکل (۳): مش‌بندی فضای کرونای اطراف هادی خط انتقال

پس از بارگذاری اولیه با روش بارهای فرضی و حل مساله در نرم‌افزار ANSYS17.2، توزیع پتانسیل در فضای شبیه‌سازی به صورت شکل (۴) خواهد بود. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، پتانسیل الکتریکی بر روی هادی‌ها حداکثر بوده و برابر با ۳۹۹ Kv است.

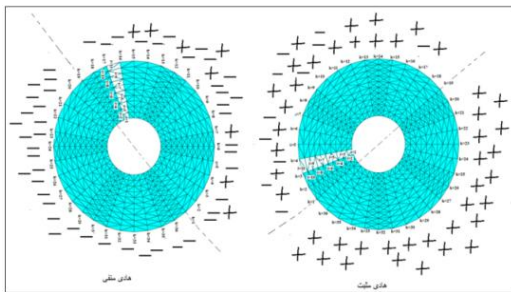
اعداد به دست آمده به خوبی نشان می‌دهد که بارگذاری انجام شده صحیح می‌باشد.



شکل (۴): توزیع پتانسیل الکتریکی در فضای شبیه‌سازی

در شکل (۵)، توزیع میدان الکتریکی بر روی هادی پس از بارگذاری اولیه به روش بارهای فرضی نشان داده شده است، همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود شدت میدان الکتریکی در شش نقطه (در محل قرارگیری بارهای فرضی) نسبت به سایر نقاط داخل هادی بیشتر است، در واقع این شش محل حداکثر مقدار میدان الکتریکی را دارا می‌باشند.

را بر روی دو هادی مثبت و منفی به‌دست آورد. در شکل (۸) نحوه پراکندگی بارهای آزاد در محدوده کرونا نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود در فضای دو قطبی میان دو هادی علاوه بر بارهای هم‌پلاریته با هر هادی، بارهای مخالف نیز حضور دارند. در این مرحله فرض بر این است که میزان این بارها در هر نقطه از محدوده دو قطبی بر روی سطح هادی مثبت ($i=1$) برابر با دو درصد از بارهای آزاد منفی در نقطه متناظر بر روی هادی با پلاریته منفی باشد. همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود، نحوه چینش موقعیت‌های $k=1$ الی $k=36$ در سمت هادی منفی با هادی مثبت متفاوت است.



شکل (۸): پراکندگی بارهای آزاد در محدوده کرونا

به‌منظور محاسبه چگالی بارهای آزاد در موقعیت‌های $i=2$ الی $i=10$ از اصل پیوستگی جریان منفی و مثبت کرونا بر روی محدوده کرونا استفاده خواهد شد.

الف - بخش میدان دو قطبی:

در این بخش هم بارهای مثبت و هم بارهای منفی وجود دارد. در این مرحله، مقدار شدت میدان الکتریکی بر روی هادی برابر با شدت میدان بحرانی کرونا در نظر گرفته شده است و بر روی هر هادی (مثبت یا منفی) شدت میدان بحرانی کرونای مربوط به همان هادی لحاظ شده است

$$E = (E_{crit+} = 32kv/cm, E = E_{crit-} = 31kv/cm)$$

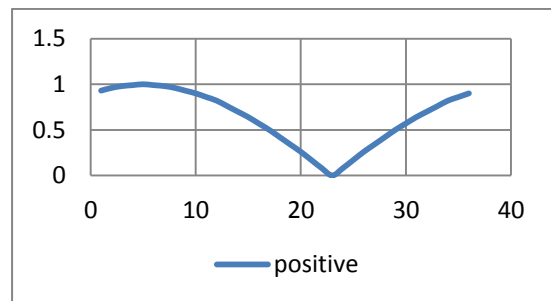
با توجه به این که ضخامت محدوده کرونا برابر با ۱۰ cm در اطراف هر هادی در نظر گرفته شده و این محدوده به ۱۰ زیر مجموعه مساوی تقسیم شده است لذا می‌توان طول dl را برابر با یک سانتیمتر در نظر گرفت. لذا با توجه به مقادیر در نظر گرفته‌شده برای پارامترها و به چگالی بارهای آزاد در موقعیت $i=1$ می‌توان بارهای آزاد در موقعیت $i=2$ را بر روی هادی‌های مثبت و منفی محاسبه نمود. ۱۸ نقطه بر روی فضای دو قطبی بر روی هادی مثبت وجود دارد و با دور شدن از هادی (موقعیت $i=1$)، چگالی بارهای آزاد کاهش می‌یابد. به‌طور خلاصه در مساله‌ای که پیش رو داشتیم، در اطراف هر هادی ۱۸۰ نقطه

دو قطبی هم بار مثبت و هم بار منفی وجود دارد که در بخش‌های بعد نحوه محاسبه آنها توضیح داده خواهد شد. روابط (۸-۹) توزیع بارهای آزاد در میدان‌های تک‌قطبی را نمایش می‌دهند.

$$\rho_+(i=1, k) = \rho_{e+} \cos\left(\frac{\pi-\theta_+}{2}\right) \quad (8)$$

$$\rho_-(i=1, k) = \rho_{e-} \cos\left(\frac{\pi-\theta_-}{2}\right) \quad (9)$$

با توجه به وجود ۳۶ منطقه هم‌میدان، هر منطقه ۱۰ درجه می‌باشد. به‌عنوان مثال در $k=5$ اندازه θ_+ برابر با ۱۸۰ درجه و اندازه θ_- برابر با صفر درجه می‌باشد. در شکل (۷) ضرایب مربوط $\cos\left(\frac{\pi-\theta_+}{2}\right)$ برای هادی مثبت (برحسب موقعیت‌های $k=1$ الی $k=36$) نمایش داده شده است.



شکل (۷): نحوه توزیع بارهای آزاد در رابطه ۸ بر حسب موقعیت‌های $k=1$ الی $k=36$

همان‌گونه که در منحنی ۷ دیده می‌شود بارهای آزاد مثبت به‌صورت متقارن نسبت به موقعیت $k=23$ بر روی سطح هادی پخش خواهند شد. در شکل (۷) هم محدوده مربوط به میدان تک قطبی هادی مثبت (یعنی از $k=19$ الی $k=36$) و هم محدوده میدان دو قطبی (یعنی از $k=1$ الی $k=18$) وجود دارد.

همان‌گونه که در روابط دیده می‌شود مقادیر اصلی چگالی بار آزاد بر روی مرز هم پتانسیل $i=1$ توسط ρ_{e+} و ρ_{e-} مشخص می‌گردد و روابط نحوه توزیع این مقدار اصلی را بر روی مرزهای $k=1$ الی $k=36$ به‌صورت یک رابطه سینوسی نمایش می‌دهد.

با توجه به این که در طول شبیه‌سازی‌ها شعاع هادی برابر با ۵ cm در نظر گرفته شده است خواهیم داشت:

$$V_{0+} = 950kv, V_{0-} = 920kv, \\ E_{crit+} = 32kv/cm, E_{crit-} = 31kv/cm$$

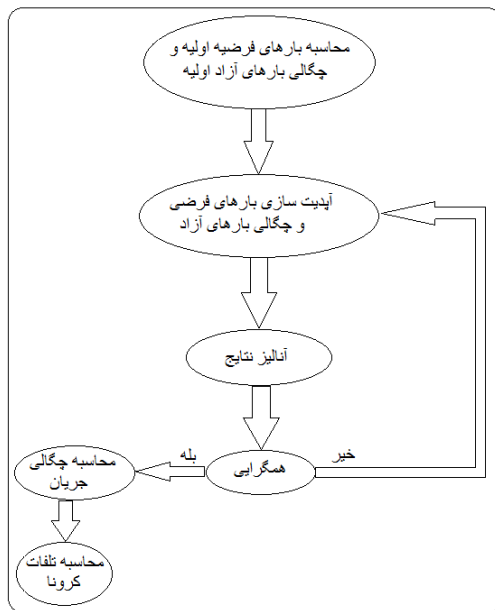
E_y نیز با استفاده از شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته محاسبه شده و برابر با $E_y = 0.246kv/cm$ است. مقادیر ρ_{e+} و ρ_{e-} به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$\rho_{e+} = 0.27e - 6 \\ \rho_{e-} = 0.15e - 6$$

حال با داشتن مقادیر ρ_{e+} و ρ_{e-} می‌توان توزیع بارهای آزاد

این که چگالی بارهای آزاد محاسبه شده برای بار مثبت بیشتر از بار منفی است لذا پتانسیل اعمالی بر روی هادی مثبت بیشتر از پتانسیل اعمالی بر روی هادی منفی می‌باشد. بارگذاری کل شبکه مشخص می‌باشد، لذا باید این مقادیر را در نرم‌افزار ANSYS به همراه تصویر بارهای فوق وارد نموده و پس از حل مجدد مساله در نرم‌افزار ANSYS به کمک روش المان محدود، توزیع پتانسیل و شدت میدان الکتریکی در فضای شبیه‌سازی را محاسبه نماییم. از نتایج به دست آمده برای پتانسیل الکتریکی و شدت میدان الکتریکی در جهت به‌روزرسانی چگالی بارهای آزاد محاسبه شده در محدوده کرونا استفاده خواهد شد. از پتانسیل الکتریکی محاسبه شده نیز در جهت به‌روزرسانی کردن چگالی بارهای آزاد در سطح هادی‌های خط انتقال (در موقعیت $i=1$) استفاده خواهیم کرد و از شدت میدان الکتریکی محاسبه شده بر روی محدوده کرونا در جهت محاسبه چگالی بارهای آزاد در سایر بخش‌های محدوده کرونا ($i=2$ الی $i=10$) استفاده خواهد شد. در ادامه شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب و ANSYS، طبق فلوجارت زیر، نتایج نهایی به دست آمده‌اند.

فلوجارت کلی شبیه‌سازی در شکل (۱۰) ارائه شده است:



شکل (۱۰): فلوجارت کلی نحوه شبیه‌سازی

گام الف: محاسبات بارهای فرضی اولیه و بارهای آزاد اولیه بر روی سطح هادی‌های خط انتقال

مرحله اول:

محاسبه بارهای فرضی در ۶ نقطه در داخل هر هادی خط انتقال

مرحله دوم:

محاسبه ولتاژ در محدوده کرونا در نرم‌افزار ANSYS با در نظر

(در مجموع ۳۶۰ نقطه) برای بارگذاری داریم و در اطراف هر هادی ۵۴۰ بارگذاری (یعنی در مجموع ۱۰۸۰ بارگذاری بر روی فضای کرونا) خواهیم داشت.

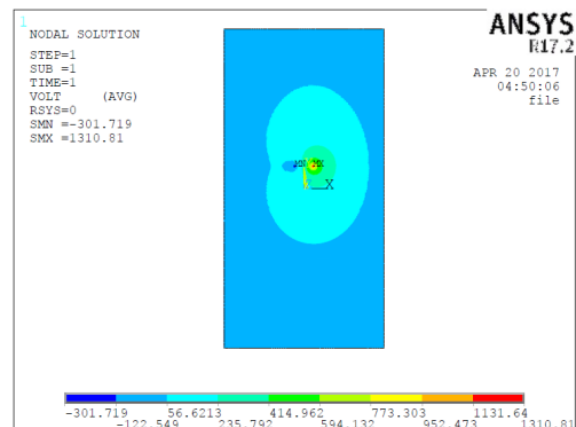
ب- بخش میدان تک قطبی اطراف هادی مثبت:

در بخش الف بارگذاری اطراف هادی مثبت در محدوده دو قطبی مشخص شد. در این بخش بارگذاری‌های اطراف هادی مثبت در میدان تک‌قطبی (که تنها شامل بارهای مثبت است) مشخص خواهد شد. بارگذاری‌های انجام شده در این قسمت شامل بارهای آزاد مثبت در محدوده $k=19$ الی $k=36$ و $i=1$ الی $i=10$ می‌باشد.

ج- بخش میدان تک قطبی اطراف هادی منفی:

در میدان تک‌قطبی اطراف هادی منفی، چگالی بارهای آزاد مثبت برابر با صفر است. در ادامه با داشتن پتانسیل الکتریکی در محل‌های $z=1$ الی $z=6$ بر روی هر هادی و با مشخص بودن چگالی بارهای آزاد در منطقه کرونا، چگالی بارهای خطی موجود در داخل هادی (در شعاع سه سانتیمتری) به‌روزرسانی خواهد شد. به این منظور بایستی تاثیر کلیه بارهای آزاد در ۱۲ نقطه هدف (شش نقطه در داخل هر هادی) مورد بررسی قرار گیرد.

برای محاسبه تاثیر بارهای آزاد در ۱۲ نقطه مورد نظر از نرم‌افزار ANSYS استفاده نموده و در محیط شبیه‌سازی تنها چگالی حجمی بارهای آزاد محاسبه شده را قرار می‌دهیم. در شبیه‌سازی صورت گرفته شده در این بخش تنها بارهای آزاد وجود دارند و بارهای خطی که از روش بارهای فرضی محاسبه شده بودند در شبیه‌سازی وجود ندارند. توزیع پتانسیل الکتریکی در این حالت در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل (۹): پتانسیل ناشی از بارهای آزاد

همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود پتانسیل الکتریکی ناشی از بارهای آزاد بر روی نقاط J1 الی J6 برابر با ۱۳۱۰ ولت و بر روی نقاط J7 الی J12 برابر با ۳۰۱- ولت می‌باشد. با توجه به

گام ب: به‌روزرسانی بارهای فرضی و چگالی حجمی بارهای آزاد

مرحله اول:

اعمال چگالی بارهای حجمی آزاد در محدوده کرونای اطراف هادی‌های خط انتقال (به تنهایی و بدون در نظر گرفتن بارهای فرضی) در نرم‌افزار ANSYS و محاسبه ولتاژ و شدت میدان الکتریکی در سطح هادی و محدوده کرونا

مرحله دوم:

به‌روزرسانی بارهای فرضی با توجه به ولتاژهای به‌دست‌آمده در مرحله اول در ۶ نقطه فرضی در داخل هر هادی

مرحله سوم:

اعمال بارهای فرضی به‌روزرسانی‌شده در مرحله سوم (در داخل هادی‌ها خط انتقال و تصاویر خطوط) و همچنین چگالی حجمی بارهای آزاد به‌دست‌آمده در مرحله چهارم گام الف (در محدوده کرونا)، به‌طور هم‌زمان در نرم‌افزار ANSYS

گام ج: آنالیز نتایج

مرحله اول:

مقایسه ولتاژ مشاهده‌شده در این مرحله با ولتاژهای مشاهده‌شده در مرحله قبل در تک تک نقاط محدوده کرونا (هم در اطراف لاین مثبت و هم در اطراف لاین منفی با استفاده از نرم‌افزار متلب)

مرحله دوم:

اگر اختلاف ولتاژ نسبی مشاهده‌شده در مرحله اول کوچکتر از δ بود شبیه‌سازی‌ها به پایان رسیده است در غیر این صورت به مرحله سوم می‌رویم (در طول شبیه‌سازی‌ها δ برابر با ۰.۴٪ در نظر گرفته شده است).

مرحله سوم:

محاسبه چگالی حجمی بارهای آزاد با استفاده از روابط زیر (در نرم‌افزار متلب) و برگشت به مرحله اول از گام ب

$$e_{i,k} = |V_{i,k}^{m+1} - V_{i,k}^m| * V_{i,k}^{av}, \quad k = 1:36, i = 1:10 \quad (19)$$

$$V_{i,k}^{av} = \frac{V_{i,k}^{m+1} + V_{i,k}^m}{2}, \quad k = 1:36, i = 1:10 \quad (20)$$

$$\rho_{1,k}^{new} = \rho_{1,k}^{old} (1 + g * \max(e_{i,k})), \quad k = 1:36, i = 10 \quad (21)$$

گرفتن بارهای فرضی در ۶ نقطه در داخل هر هادی و تصاویر بارهای آزاد فرضی

مرحله سوم:

محاسبه چگالی حجمی بارهای آزاد اولیه در سطح هادی‌های خط انتقال (با استفاده از روابط زیر):

$$\rho_+(i = 1, k) = \rho_{e+} \cos\left(\frac{\pi - \theta_+}{2}\right) \quad (10)$$

$$\rho_-(i = 1, k) = \rho_{e-} \cos\left(\frac{\pi - \theta_-}{2}\right) \quad (11)$$

$$\rho_{e+} =$$

$$\frac{E_y D}{E_{crit+R}} 8 \varepsilon_0 V_{0+} (V - V_{0+}) / [D^2 V (5 - 4V_{0+}/V)] \quad (12)$$

$$\rho_{e-} \quad (13)$$

$$= \frac{E_y D}{E_{crit-R}} 8 \varepsilon_0 V_{0-} (V - V_{0-}) / [D^2 V (5 - 4V_{0-}/V)]$$

مرحله چهارم:

محاسبه چگالی حجمی بارهای آزاد در محدوده کرونای اطراف هادی‌ها (با استفاده از روابط زیر و حل مساله در نرم‌افزار متلب):

$$\frac{d\rho_+}{dt} = 10^3 (-35.3\rho_+^2 + 9.28\rho_+\rho_-) \quad (14)$$

$$\frac{d\rho_-}{dt} = 10^3 (35.3\rho_-^2 - 13.75\rho_+\rho_-) \quad (15)$$

$$\frac{d\rho_+}{dt} = 10^3 (-35.3\rho_+^2 + 9.28\rho_+\rho_-) = f_1(l, \rho_+), \quad \rho_+(l=0) = 0.2511e - 6 \quad (16)$$

$$\frac{d\rho_-}{dt} = 10^3 (35.3\rho_-^2 - 13.7\rho_+\rho_-) = f_2(l, \rho_-), \quad \rho_-(l=0) = -0.0029e - 6 \quad (17)$$

$$\rho_+(l = 0.01) = \rho_+(l = 0) + \frac{1}{6} (M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4) \times h \quad (18)$$

$$M_1 = f_1(0, \rho_+(l = 0)) = -2.21e - 9$$

$$M_2 = f_1\left(0 + \frac{1}{2}h, \frac{1}{2}M_1h + \rho_+(l = 0)\right) = -2.21e - 9$$

$$M_3 = f_1\left(0 + \frac{1}{2}h, \frac{1}{2}M_2h + \rho_+(l = 0)\right) = -2.21e - 9$$

$$M_4 = f_1(0 + h, M_3h + \rho_+(l = 0)) = -2.21e - 9$$

کمتر از مقدار تعیین شده می‌رسد و مساله به جواب نهایی بهینه رسیده است. در جدول (۱)، مقدار δ محاسبه شده برای هادی‌های مثبت و منفی نمایش داده شده است.

جدول (۱): مقادیر مشاهده شده δ در طول شبیه‌سازی

عنوان	هادی منفی	هادی مثبت
مقدار δ در بار اول	6.2%	5.95%
مقدار δ در بار دوم	4.03%	4.07%
مقدار δ در بار سوم	3.2%	3.3%

با داشتن مقادیر چگالی حجمی بارهای آزاد در محدوده کرونا می‌توان تلفات را در محدوده کرونا محاسبه نمود. به منظور محاسبه چگالی جریان کرونا، میزان تحرک بارهای معادل مثبت در اطراف هادی مثبت برابر با $\mu_+ = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}$ ، میزان تحرک بارهای معادل منفی در اطراف هادی منفی برابر با $\mu_- = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}$ در نظر گرفته خواهند شد و از رابطه (۲۲) برای محاسبه چگالی جریان در محدوده کرونا استفاده خواهد شد.

$$J = \mu \rho E \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، E نشان‌دهنده شدت میدان الکتریکی در محدوده کرونا بوده و ρ چگالی حجمی بارهای آزاد است. با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در نرم‌افزار ANSYS و اعمال چگالی بارهای آزاد نهایی شدت میدان الکتریکی در اطراف هادی مثبت و منفی (در محدوده کرونا) به صورت شکل‌های (۱۱-۱۲) خواهد بود. با توجه به داشتن این مقادیر می‌توان از نرم‌افزار متلب برای محاسبه نهایی مقادیر چگالی جریان در گره‌های مختلف محدوده کرونا استفاده نمود.

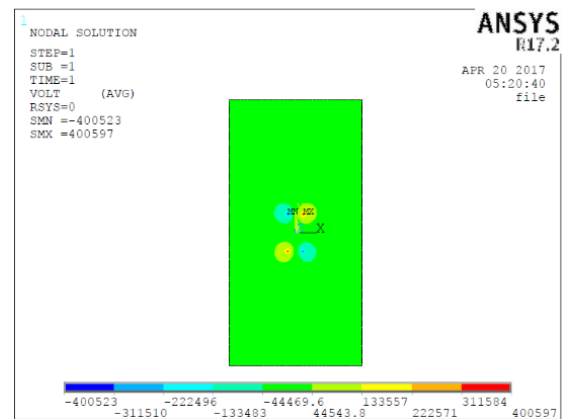
با دور شدن از سطح هادی‌های مثبت و منفی چگالی جریان های کرونا کاهش می‌یابد و هر چه به سمت هادی‌ها حرکت نماییم میزان جریان‌های ناشی کرونا افزایش می‌یابد. توزیع سینوسی چگالی جریان در محدوده در اطراف هادی (مخصوصاً در لایه‌های نزدیک‌تر به سطح هادی‌ها) به خوبی قابل رویت است.

در ادامه با توجه به مش‌بندی به کار رفته در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار ANSYS به راحتی می‌توانیم با استفاده از چگالی جریان مشخص شده در گره‌های فضای کرونا، جریان کرونا را محاسبه نماییم. با توجه به این که سایز المان‌های به کار رفته در فضای کرونا یکسان نمی‌باشد و با توجه به اصل پیوستگی جریان در فضای کرونا که در بخش‌های پیشین نیز اشاره شد، کافی است که جریان تنها در لایه اول و در مجاورت هادی‌های خط انتقال محاسبه شود. در اکثر مقالات علمی جریان مشاهده شده در سطح هادی‌ها (در اولین لایه) به عنوان جریان کرونایی

۳-۲- تطبیق (به‌روز رسانی) چگالی بارهای آزاد و بارهای خطی داخل هادی‌های خطوط انتقال

شدت میدان الکتریکی بر روی تمامی نقاط محدوده شبیه‌سازی برای محاسبه چگالی بارهای آزاد در محدوده شبیه‌سازی (غیر از $i=1$) مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

بنابراین، پس از هر شبیه‌سازی خروجی‌ها شامل ۴ جدول (توزیع پتانسیل و همچنین توزیع شدت میدان الکتریکی در اطراف هادی‌های مثبت و منفی) خواهد بود. در محاسبات نتایج مرحله قبل نیز موثر است. محاسبات تا زمانی ادامه خواهد یافت که مقدار تغییرات پتانسیل در دو مرحله متوالی ناچیز باشد. با توجه به حجم زیاد داده‌ها در این بخش محاسبات بر روی خروجی‌های نرم‌افزار ANSYS با کمک نرم‌افزار متلب انجام شده است. هدف اصلی در این بخش محاسبه چگالی جدید بارهای آزاد در فضای کرونا می‌باشد.



شکل (۱۱): اندازه ولتاژ در فضای شبیه‌سازی پس از اولین بارگذاری بارهای آزاد در فضای کرونا

در این بخش، تحلیل مساله به سه بخش دو قطبی، تک قطبی اطراف هادی مثبت و تک قطبی اطراف هادی منفی تبدیل خواهد شد. در ادامه با داشتن پتانسیل الکتریکی در محل‌های $j=1$ الی $j=6$ بر روی هر هادی و با مشخص بودن چگالی بارهای آزاد در منطقه کرونا، چگالی بارهای خطی موجود در داخل هادی (در شعاع سه سانتیمتری) به‌روزرسانی خواهد شد. به این منظور بایستی تاثیر کلیه بارهای آزاد در ۱۲ نقطه هدف (شش نقطه در داخل هر هادی) مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور باید چگالی حجمی بارهای آزاد محاسبه شده به تنهایی در نرم‌افزار ANSYS در شبیه‌سازی لحاظ شوند تا تاثیر آنها بر روی پتانسیل ۱۲ نقطه هدف محاسبه شود.

شبیه‌سازی‌های متوالی در نرم‌افزارهای ANSYS و متلب به‌طور متوالی نشان می‌دهد که علاوه بر بارهای فرضی و چگالی حجمی بارهای آزاد اولیه، با سه بار تکرار مساله مقدار δ به میزانی

متعلق به فضای دو قطبی کرونا بوده و المان‌های مستقر در محدوده‌های $k=19$ الی $k=36$ متعلق به فضای تک قطبی می‌باشند.

جدول (۲): جدول آنالیز نهایی محاسبات تلفات کرونا

مجموع تلفات کرونا (W/m)	مجموع جریان کرونا (mic.A/m)	بخش
۰/۰۴۰۲۸	۰/۱۰۰۷	محدوده تک قطبی هادی مثبت
۰/۰۷۵۴	۰/۱۸۸۵	محدوده دو قطبی هادی مثبت
۰/۰۲۵۸۴	۰/۰۶۴۶	محدوده تک قطبی هادی منفی
۰/۰۴۷۲۴	۰/۱۱۸۱	محدوده دو قطبی هادی منفی
۰/۱۱۵۶۸	۰/۲۸۹۲	هادی مثبت
۰/۰۷۳۰۸	۰/۱۸۲۷	هادی منفی
۰/۱۸۸۷۶	۰/۴۷۱۹	کل خط انتقال

همان‌گونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، میزان جریان کرونا در لاین مثبت بیشتر از لاین منفی می‌باشد، این موضوع ناشی از سرعت حرکت بارهای مثبت و منفی بوده و همچنین به علت اختلاف شدت میدان شروع کرونا در دو هادی نیز می‌باشد. همچنین در هادی مثبت و هم هادی منفی در محدوده‌های دو قطبی میزان تلفات و جریان های کرونا بیشتر می‌باشند. میزان جریان کرونای کل برای این خط برابر با $۰/۴۷۱۹$ میکرو آمپر بر متر بوده و تلفات کرونای کل خط نیز برابر با $۰/۱۸۸۷۶$ وات در هر متر از خط انتقال به دست آمده است.

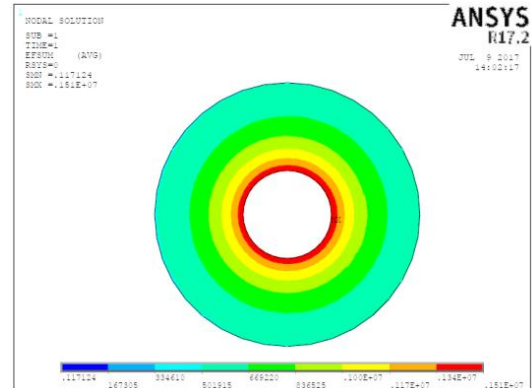
جدول (۳): مقایسه نتایج به دست آمده با سایر منابع

مرجع	جریان کرونا (بر حسب میکرو آمپر بر متر)	تلفات کرونا (بر حسب وات بر متر)
[۳۳]	۱/۳	۰/۵۵
[۳۵]	۱	۰/۴
روش-پیشنهادی	۰/۴۷	۰/۱۹

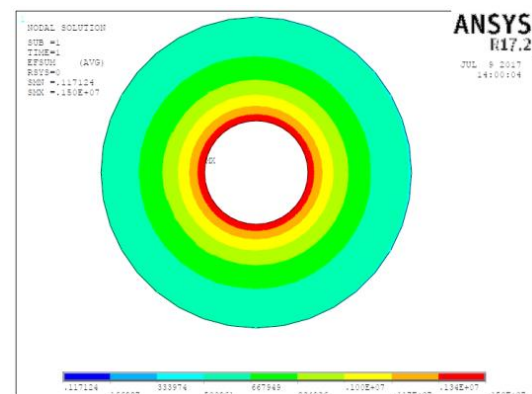
۳- نتیجه گیری

در این مقاله، چگالی حجمی بارهای آزاد در اطراف یک خط انتقال دو قطبی محاسبه گردید. در ادامه کار، چگالی جریان کرونا را بر روی سطوح هادی‌های مثبت و منفی به دست آورده و سپس با داشتن چگالی جریان کرونا، جریان کرونا در هر متر از خط انتقال در اطراف دو لاین مثبت و منفی از یک خط انتقال HVDC دو قطبی مشخص گردید و در نهایت، با توجه به مشخص بودن ولتاژ خط انتقال میزان تلفات کرونای خط انتقال در هر متر از آن تخمین زده شد. مشکل ترین و طولانی ترین بخش محاسبات مربوط به محاسبه چگالی حجمی بارهای آزاد در محدوده کرونا است. در واقع در روش المان محدود ارائه شده به طور مرتب از محیط نرم افزار ANSYS نتایج به دست آمده به صورت ورودی به محیط متلب منتقل شده و پس از انجام تجزیه و تحلیل در

خارج شده از هادی (و یا وارد شده از هادی) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱۲): اندازه بردار شدت میدان الکتریکی در محدوده کرونا در اطراف هادی مثبت



شکل (۱۳): اندازه بردار شدت میدان الکتریکی در محدوده کرونا در اطراف هادی منفی

به منظور محاسبه اندازه جریان کرونا یک متر از طول خط انتقال در نظر گرفته شده است. در شبیه سازی‌های صورت پذیرفته در نرم افزار ANSYS محیط یک دایره 5 cm (قطر هادی) به 36 قسمت تقسیم شده است و المان‌های موجود در لایه اول 36 عدد بوده و طول هر یک از آنها برابر با 1 cm فرض شده است. با توجه به این محاسبات، می‌توان مقدار جریان کرونا در اطراف هادی‌های مثبت و منفی در خط انتقال مورد بررسی را مشخص نمود. در جدول (۲) آنالیز نهایی مربوط به جریان و تلفات در خط انتقال مورد بحث نمایش داده شده است. در این جدول ولتاژ هادی‌های خط انتقال همان مقدار نامی 400 Kv در نظر گرفته شده است و جریان کرونا و تلفات کرونا به ترتیب بر حسب میکرو آمپر بر متر و وات بر متر می‌باشد که تلفات کرونا را در هر متر از خط انتقال نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در بخش‌های پیشین نیز اشاره شد المان‌های مستقر در محدوده‌های $k=18$ الی $k=1$ (هم در هادی مثبت و هم در هادی منفی)،

محاسبات بوده است لذا این امکان نیز وجود دارد که نتایج به دست آمده در مقالات فوق دارای خطا بوده و نتایج حاصله در این مقاله دقیق تر باشد، در هر صورت، ارزیابی دقیق نتایج مقالات مختلف طبعا بستگی به نتایج حاصله از تست‌های آزمایشگاهی و میدانی دارد که اجرای آنها به سادگی امکان پذیر نیست.

برای ادامه پژوهش در این زمینه، می توان تاثیر پارامترهایی نظیر ابعاد دکل خط انتقال و عوامل محیطی (نظیر دما، باد و ...) را به عنوان عوامل ثانویه در مساله در نظر گرفت و شبیه سازی‌ها را با توجه به این ملاحظات انجام داد. همچنین می توان مساله باندل گذاری در خطوط انتقال DC فشار قوی و نحوه تاثیر گذاری آنها را در تلفات کرونا مورد بررسی قرار داد.

۴- مراجع

- [1] V. I. Popkov, "On the Theory of Unipolar DC Corona," *Elektrichestvo*, Technical Translation 1093, National Research Council of Canada, no. 1, pp. 33-48, 1949.
- [2] J. H. Simpson, "Theoretical and Experimental Studies of Corona Loss from D. C. Lines," Corona Research Meeting, Montreal, P.Q., Canada, March 17-18, 1966.
- [3] M. P. Sarma and W. Janischewskyj, "Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines: I- Unipolar Lines," *IEEE Trans. PAS*, vol. 88, pp. 718-731, 1969.
- [4] M. P. Sarma and W. Janischewskyj, "Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines: II- Bipolar Lines," *IEEE Trans. PAS*, vol. 88, pp. 1476-1491, 1969.
- [5] P. S. Maruvada, "Corona-Generated Space Charge Environment in the Vicinity of HVDC Transmission Lines," *IEEE Trans. PAS*, vol. 17, pp. 125-130, 1982.
- [6] A. A. Elmoursi and G. S. P. Castle, "Modelling of Corona Characteristics in a Wire-Duct Precipitator Using the Charge Simulation Technique," *IEEE Trans. IA*, vol. 23, pp. 95-102, 1987.
- [7] K. Adamiak, "Simulation of Corona in Wire-Duct Electrostatic Precipitator by Means of the Boundary Element Method," *IEEE Trans. IA*, vol. 30, pp. 381-386, 1994.
- [8] W. Li, B. Zhang, R. Zeng, and J. He, "Discussion on the Deutsch Assumption in the Calculation of Ion-Flow Field Under HVDC Bipolar Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2759-2767, 2010.
- [9] M. Khalifa and M. Abdel-Salam, "Improved Method for Calculating DC Corona Losses," *IEEE Trans. PAS*, vol. 93, pp. 720-726, 1974.
- [10] T. Takuma, T. Ikeda, and T. Kawamoto, "Calculations of Ion Flow Fields of HVDC Transmission Lines by the Finite Element Method," *IEEE Trans. PAS*, vol. 100, pp. 4802-4810, 1981.
- [11] T. Lu, H. Feng, Z. Zhao, and X. Cui, "Analysis of the Electric Field and Ion Current Density Under Ultra High-Voltage Direct-Current Transmission Lines Based on Finite Element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1221-1224, 2007.
- [12] T. Lu, H. Feng, X. Cui, Z. Zhao, and L. Li, "Analysis of the Ionized Field Under HVDC Transmission Lines in the Presence of Wind Based on Upstream Finite Element Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 8, pp. 2939-2942, 2010.

نرم افزار متلب مجدداً به نرم افزار ANSYS برگردانده شد و این سیکل تا حصول جواب نهایی ادامه یافت. در طول شبیه سازی‌های صورت گرفته از روش بارهای فرضی نیز استفاده شد. روش ارائه شده در این مقاله مبتنی بر المان محدود بوده و برخی روابط تحلیلی و عددی مربوط به فیزیک مساله نیز در طول محاسبات استفاده شده است. به طور خلاصه روش پیشنهادی و کار انجام شده در این مقاله، تلفیقی ابتکاری از روش‌های ارائه شده در چندین مرجع بوده که به طور دقیق شبیه سازی شده اند. مطالعات انجام شده بر روی مراجع مختلف نشان می دهد که در منابع موجود، شبیه سازی‌های دقیق و با بیان کامل جزئیات وجود ندارد و سایر مراجع، نتایج تجزیه و تحلیل‌ها را صرفاً به صورت عددی نمایش داده و از نمایش کانتورهای میدان و ولتاژ مربوط به فضای کرونا صرف نظر نموده اند. همان گونه که در بخش‌های پیشین نیز اشاره شد، عوامل مختلف موثر در تلفات کرونا نظیر قطر هادی خط انتقال، ولتاژ خط و همچنین فاصله خطوط از یکدیگر و از سطح زمین تاثیر گذار هستند. با توجه به شبیه سازی صورت پذیرفته بر روی خط انتقال ذکر شده باید در مراجع قبلی دنبال خط انتقالی مشابه خط انتقال مورد بحث بگردیم تا مقایسه به درستی صورت پذیرد.

از میان منابع موجود، دو مرجع [۳۳ و ۳۵]، خطوط انتقال DC دوقطبی مشابه خط انتقال مورد بحث در شبیه سازی‌ها به کار برده اند. در جدول (۳) نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج به دست آمده در این منابع مقایسه شده است.

همان گونه که در جدول (۳) مشاهده می شود، اختلاف نتایج به دست آمده می تواند ناشی از اختلاف اندازه‌های فرض شده برای المان‌های به کار رفته در تجزیه و تحلیل باشد، چون در این مقاله از روش المان محدود، استفاده شده است و در این روش نتایج حاصله به ابعاد و اندازه المان‌ها بستگی و حساسیت دارد، بنابراین، نمی توان نتایج جدول (۳) را به عنوان نتایج قابل مقایسه با هم در نظر گرفت و ارائه این جدول صرفاً برای نشان دادن نمونه نتایج مقالات دیگر است که با توجه به دقیق نبودن اندازه المان‌ها در این مقالات، نتایج آنها با این مقاله که در آن اندازه المان‌ها مشخص است، دقیقاً قابل مقایسه نیست البته با شبیه سازی‌های مجدد و متعددی که توسط نگارندگان مقاله صورت گرفته و امکان توجیه منطقی نتایج حاصله، صحت شبیه سازی و اعتبار نتایج برای نویسنگان مقاله محرز شده است. لازم به ذکر است که تغییر در روش محاسبات، الزاماً باعث تغییرات زیادی در نتایج نخواهد شد و علت اصلی تغییرات ممکن است به علت تفاوت در نوع مش بندی و اندازه المان‌های انتخاب شده باشد. با توجه به این که در تجزیه و تحلیل انجام شده در سایر مقالات، نوع و اندازه المان‌ها ذکر نشده لذا قضاوت چندانی در این خصوص نمی توان داشت، ضمناً نتایج به دست آمده در سایر منابع نیز به صورت آزمایشگاهی تایید نشده است و مبنای کار تنها مدل سازی و

- [25] P. A. Lawless and L. E. Sparks, "A Mathematical Model for Calculating Effects of Back Corona in Wire-duct Electrostatic Precipitators," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, pp. 242-256, 1980.
- [26] Z.-X. Li, G.-F. Li, J.-B. Fan, and Y. Yu, "Corona Onset Voltage of Bipolar Bundle Conductors of HVDC Transmission Line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 693-702, 2011.
- [27] G. Huang, J. Ruan, Z. Du, and C. Zhao, "Highly Stable Upwind FEM for Solving Ionized Field of HVDC Transmission Line," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 719-722, 2012.
- [28] X. Zhou, T. Lu, X. Cui, Y. Zhen, and G. Liu, "Simulation of Ion-Flow Field Using Fully Coupled Upwind Finite-Element Method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1574-1582, 2012.
- [29] H. Yin, B. Zhang, J. He, and W. Wang, "Restriction of Ion-Flow Field Under HVDC Transmission Line by Installing Shield Wire," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1890 - 1898, 2013.
- [30] J. Qiao, J. Zou, and B. Li, "Calculation of the ionised field and the corona losses of high-voltage direct current transmission lines using a finite-difference-based flux tracing method, *IET Generation, Transmission & Distribution* vol. 9, no. 4, pp. 348 - 357, 2015.
- [31] T. Takuma and T. Kawamoto, "A Very Stable Calculation Method for Ion Flow Field of HVDC Transmission Lines," *IEEE Trans. PWRD*, vol. 2, pp. 189-198, 1987.
- [32] B. L. Qin, J. N. Sheng, Z. Yan, and G. Gela, "Accurate Calculation of Ion Flow Field under HVDC Bipolar Transmission Lines," *IEEE Trans. PWRD*, vol. 3, pp. 368-376, 1988.
- [33] Z. M. Al-Hamouz and M. Abdel-Salam, "Finite-Element Solution of Monopolar Corona on Bundle Conductors," *IEEE Transaction on industry application*, vol. 35, no. 2, pp. 380-386, 1999.
- [34] Z. M. Al-Hamouz, M. Abdel-Salam, and A. Mufti, "Improved calculation of Finite Element Analysis of Bipolar Corona Including Ion Diffusion," *Industry Application Conference*, pp. 1912-1918, 1996.
- [35] Z. M. Al-Hamouz, "Corona Power Loss, Electric Field, and Current Density Profiles in bundled Horizontal and vertical Bipolar Conductors," *IEEE Transaction on industry application*, vol. 38, no. 5, pp. 1182-1189, 2002.
- [13] P. Sarma Maruvada, "Influence of Wind on the Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2561- 2569, 2014.
- [14] B. L. Qin, J. N. Sheng, Z. Yan, and G. Gela, "Accurate Calculation of Ion Flow Field under HVDC Bipolar Transmission Lines," *IEEE Trans. PWRD*, vol. 3, pp. 368-376, 1988.
- [15] E. Kuffel, A. Dzierzynski, and J. Poltz, "Final Report on: Development of Numerical Method for Analysis of Bipolar Corona on an HVdc System," *The University of Manitoba*, January 28, 1987.
- [16] J. Poltz and E. Kuffel, "A New Method for the Two-Dimensional Bipolar Ion Flow Calculation," *6th International Symposium on High Voltage Engineering*, New Orleans, LA, USA, Aug.28-Sept.1, 1989.
- [17] M. Yu, "The Study of Ionized Fields Associated with HVDC Transmission Lines in the Presence of Wind," *Ph.D Dissertation*, Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of Manitoba, 1993.
- [18] A. J. Butler, Z. J. Cendes, and J. F. Hoburg, "Interfacing the Finite-Element Method with the Method of Characteristics in Self-Consistent Electrostatic Field Models," *IEEE Trans. IA*, vol. 25, pp. 533-538, 1989.
- [19] B. Zhang, J. He, R. Zeng, S. Gu, and L. Cao, "Calculation of Ion Flow Field Under HVdc Bipolar Transmission Lines by Integral Equation Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1237-1240, 2007.
- [20] B. Zhang, J. Mo, H. Yin, and J. He, "Calculation of Ion Flow Field Around HVdc Bipolar Transmission Lines by Method of Characteristics," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, Article Sequence Number: 7204604, 2015.
- [21] M. Abdel-Salam and Z. Al-Hamouz, "Analysis of Monopolar Ionized Field as Influenced by Ion Diffusion," *IEEE Trans. IA*, vol. 31, pp. 484-493, 1995.
- [22] M. Abdel-Salam and Z. Al-Hamouz, "A Finite-Element Analysis of Bipolar Ionized Field," *IEEE Trans. IA*, vol. 31, pp. 477-483, 1995.
- [23] G. Ghione and R. D. Graglia, "Two-Dimensional Finite-Boxes Analysis of Monopolar Corona Fields Including Ion Diffusion," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 26, pp. 567-570, 1990.
- [24] J. R. McDonald, W. B. Smith, H. W. Spencer, and L. E. Sparks, "A Mathematical Model for Calculating Electrical Conditions in Wire-duct Electrostatic Precipitation Devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 48, pp. 2231-2243, 1977.

**Modeling and Estimation of Corona Losses in the Bipolar HVDC
Transmission Lines Using the Finite Element Method**

N. Morasaei, M. Tabrizian*, M. Ansarian

Yadegar Emam Islamic Azad University of Shahr Rey

(Received: 21/02/2018, Accepted: 20/10/2018)

Abstract

Corona losses are one of the main issues in the design of HVDC transmission lines. Several research has been performed on the calculation of the Corona losses in DC transmission lines in different line voltages. In the HVDC Bipolar transmission lines, the positive and negative ions and particles caused by the combination of ions with each other under the influence of corona are generated. With regard to the presence of the different particles in Corona, the calculation complexity is more than mono-polar fields. In the present study, the bipolar relationships in the field are solved and the Corona losses are determined after calculating the the current density of the positive and negative charges. For simplicity in the calculation of the current density, it is assumed that the whole range has positive and negative charges and the thickness of the simulated environment around the cables is limited and the potential of the earth is considered as a zero reference. There are different numerical methods in order to calculate the electrical field. These methods are able to solve the issues in which analytical solving is very difficult or impossible. The common numerical methods include Finite Difference Methods, Finite Element, Boundary Element, charge Simulation, and Monte Carlo. In the present study, the Finite Element approach is used to calculate the Corona field in the bipolar HVDC transmission lines. Also, the charge simulation approach is used in the used topology.

Keywords: Bipolar Transmission Lines, Corona Losses, Finite Element Method, HVDC

* Corresponding author E-mail tabrizian@iausr.ac.ir