

روشهای کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط انتقال نیرو

سیامک پرکار
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر

بابک پرکار
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

بهروز وحیدی
استادیار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر

چکیده

با توجه به اثرات سوء بیولوژیک میدانهای مغناطیسی ناشی از خطوط انتقال فشار قوی و القاء ولتاژ و جریان در تجهیزات مجاور قرار گرفته در حریم مشترک با آن نظیر لوله‌های گاز، کابلهای مخابراتی و..... و نیز تداخلات الکترومغناطیسی در ساختارهای حساس قرار گرفته در مجاورت خطوط، در سالهای اخیر تلاشهای زیادی برای کاهش میدانهای مغناطیسی خطوط انجام شده و ایده‌های متعددی مطرح گردیده است. در این مقاله ضمن معرفی سه ایده از ایده‌های مؤثر در کاهش میدان مغناطیسی خطوط یعنی روش شکافت فاز و شیلد کردن و فشرده‌سازی خطوط به بررسی تأثیر آنها در کاهش میدان مغناطیسی با استفاده از بسته نرم‌افزاری تهیه شده به محاسبه میدانهای مغناطیسی خطوط انتقال پرداخته شده است. پر واضح است با گسترش خطوط انتقال فشار قوی در داخل کشور و عبور آن از مناطق مسکونی و همچنین با افزایش ساخت و ساز و بافت مسکونی در زیر خطوط انتقال فشار قوی اهمیت مطلب بیش از پیش آشکار می‌گردد.

کلمات کلیدی

کاهش میدان مغناطیسی - شکافت فاز - شیلد کردن - فشرده‌سازی خطوط - خطوط انتقال

Methods of Reducing Magnetic Field Near the Transmission Lines

B. Porkar
Ph. D. Student
Department of Electrical Engineering,
Sharif University of Technology

S. Porkar
M. Sc. Student
Department of Electrical Engineering,
Amirkabir University of Technology

B. Vahidi
Assistant Professor
Department of Electrical Engineering,
Amirkabir University of Technology

Abstract

Due to biological effects of magnetic fields of high voltage transmission lines and induced effects on gas pipe line, telecommunication system and interference with sensitive electronic equipment, many effort have been done to reduce transmission lines magnetic fields and several ideas have been introduced. In this paper we review three methods: phase split, shielded and

compacted line methods. With aid of a developed software programme these methods are then applied to transmission lines and the results are analyzed.

Keywords

Magnetic field reduction, Phase split, Shielding, Compacted line, Transmission lines

مقدمه

با توجه به نگرانیهای عمومی در مورد اثرات سوء بیولوژیک ناشی از میدانهای مغناطیسی خطوط انتقال فشار قوی [1, 2, 3, 4, 5]، طراحان خط در سالهای اخیر روشهای متعددی را برای کاهش میدان مغناطیسی خطوط انتقال ارائه داده و به مرحله اجراء در آوردهاند. در این میان باید توجه نمود که میدان مغناطیسی تنها یکی از پارامترهایی است که باید در طراحی خطوط انتقال در نظر گرفت و در کنار آن پارامترهای دیگری نظیر قابلیت اطمینان، پایداری، ایمنی، گرادیان ولتاژ سطحی هادیهای خط، میدانهای الکتریکی حول خط، ایزولاسیون و [6, 7] مطرح میباشند. پر واضح است که توجه صرف به یک پارامتر به نتایج فنی و اقتصادی غیر قابل قبول منتهی خواهد شد. لذا ایدههای کاهش میدان مغناطیسی خطوط باید موارد مذکور را نیز در برگیرد.

روشهای متنوع طرحهای خط با میدان مغناطیسی پایین عبارتند از: روش فشرده سازی خطوط [8]، شکافت فاز [8, 9]، شیلد کردن (پسیو یا اکتیو و با یا بدون جبران سازی [10, 11, 12]، پیچش هادیهای فاز [13]، جابجایی هادیهای فاز در طول اسپن [14] و استفاده از هادیهای روپوش دار. در این مقاله سه روش از مؤثرترین روشها یعنی روش شکافت فاز، شیلد کردن و فشرده سازی فازها بررسی می گردند.

۱- محاسبه میدان مغناطیسی در فواصل دور از خط

با توجه به اثرات سوء بیولوژیک، میدانهای مغناطیسی در اطراف خطوط انتقال بعنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی خطوط انتقال مطرح می باشد. در این مورد بجز در موارد خاص معمولاً انسانها در فواصل دور از خط، در مقایسه با فاصله گذاری بین فازها، در معرض میدانهای مغناطیسی ناشی از خطوط انتقال و توزیع قرار می گیرند. لذا در این قسمت با تکیه بر فرض مذکور و با بسط سریهای توانی میدان و آنالیز آنها رابطه ای نتیجه می گردد که با استفاده از آن ایدههای کاهش میدان مغناطیسی در فواصل دور از خط به نحو مطلوبی آشکار می گردد.

شکل (۱) N هادی مستقیم موازی با محور Z (عمود بر صفحه کاغذ) را نشان می دهد. بجز در نزدیکی دو انتهای خطوط در سایر نقاط میدان مغناطیسی تولید شده توسط هادیهای مذکور از قانون بیوساوار برابر است با:

$$B(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N I_k \frac{\vec{z} \times (\vec{r} - \vec{r}_k)}{|\vec{r} - \vec{r}_k|^2} \quad (1)$$

که μ_0 قابلیت نفوذ پذیری مغناطیسی هوا، I_k بردار جریان هادی K ام، \vec{r} بردار نقطه میدان و \vec{r}_k بردار موقعیت هادی می باشد. در این رابطه B بر حسب تسلا می باشد. اما با جایگزینی μ_0 با مقدار 4π چگالی شار در واحد میلی گوس بدست خواهد آمد.

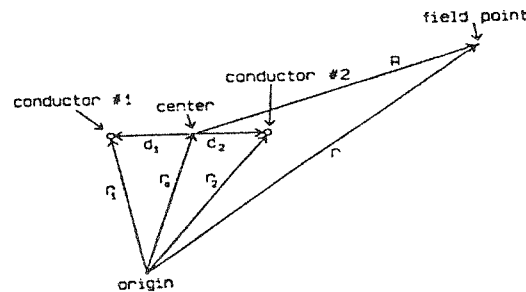
با معرفی مرکز جدید که بطور تقریبی در مرکز سیستم هادیها انتخاب می گردد. رابطه (۱) بصورت زیر در خواهد آمد:

$$B(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N I_k \frac{\vec{z} \times (\vec{R} - \vec{d}_k)}{|\vec{R} - \vec{d}_k|^2} \quad (2)$$

موقعیت دقیق \vec{r}_0 مهم نمی باشد اما باید در نقطه ای انتخاب گردد که جمع فواصل بین آن و تمام هادیها در سیستم مینیمم گردد. در این صورت در نقاطی از فضا که $R > d_k$ باشد با استفاده از تئوری دو جمله ای منجر رابطه (۲) را می توان با سری زیر بسط داد:

$$\frac{1}{|\vec{R} - \vec{d}_k|^2} = \frac{1}{R^2} \left[1 + 2 \frac{\vec{d}_k \cdot \vec{R}}{R} + \frac{4(\vec{d}_k \cdot \vec{R})^2 - d_k^2}{R^2} + \frac{8(\vec{d}_k \cdot \vec{R})^3 - 4d_k^2(\vec{d}_k \cdot \vec{R})}{R^3} + \dots \right] \quad (3)$$

\vec{R} بردار واحد طول می‌باشد. در رابطه (۳) ترم‌های بعدی متناسب با توانهای بالاتر می‌باشند.



شکل (۱) نقاط مبدا، هادیها و میدان.

با جایگذاری رابطه (۳) در (۲) و جمع آوری ترم‌های متناسب با $1/R$, $1/R^2$, $1/R^3$... خواهیم داشت:

$$B(\vec{R}) = B_1(\vec{R}) + B_2(\vec{R}) + B_3(\vec{R}) + B_4(\vec{R}) + \dots \quad (4)$$

$$B_1(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{2\pi R} \sum I_k (\vec{z} \times \vec{R}) \quad (5)$$

$$B_2(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} \left[2(\vec{R} \cdot \sum I_k d_k) \vec{z} \times \vec{R} - \vec{z} \times \sum I_k d_k \right] \quad (6)$$

$$B_3(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{2\pi R^3} \left\{ \vec{z} \times \vec{R} \left[4 \sum I_k (\vec{d}_k \cdot \vec{R})^2 - \sum I_k d_k^2 - 2\vec{z} \times \sum I_k d_k (\vec{d}_k \cdot \vec{R}) \right] \right\} \quad (7)$$

$$B_4(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{2\pi R^4} \left\{ \vec{z} \times \vec{R} \left[8 \sum I_k (\vec{d}_k \cdot \vec{R})^3 - 4 \sum I_k (\vec{d}_k \cdot \vec{R}) d_k^2 \right] - \vec{z} \times \left[4 \sum I_k \vec{d}_k (\vec{d}_k \cdot \vec{R})^2 - \sum I_k d_k^2 d_k \right] \right\} \quad (8)$$

۲- بررسی و تحلیل ترم‌های رابطه (۴) با روابط (۵) تا (۸)

۲-۱- تحلیل ترم درجه اول میدان

ترم درجه اول که متناسب با $1/R$ می‌باشد را با توجه به رابطه (۵) و با تعریف جریان برگشتی زمین برابر با جمع‌برداری تمام جریانهای هادی می‌توان به صورت زیر ساده نمود.

$$B_1(\vec{R}) = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi R} \vec{z} \times \vec{R} \quad (9)$$

بر طبق رابطه (۹) می‌توان نتیجه گرفت که ترم درجه اول میدان برابر است با میدان ناشی از یک جریان برگشتی زمین روی یک هادی تکی که در مرکز سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲-۲- تحلیل ترم درجه دوم سری میدان

ترم درجه دوم میدان که متناسب با $1/R^2$ می‌باشد با توجه به رابطه (۶) برابر خواهد بود با:

$$\vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} \left[2(\vec{R} \cdot \vec{M}_2) \vec{z} \times \vec{R} - \vec{z} \times \vec{M}_2 \right] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، بردار ممان درجه دوم نامیده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\vec{M}_2 = \sum_{k=1}^N I_k \vec{d}_k \quad (11)$$

یک ویژگی مهم M_2 آن است که اگر جریان برگشتی زمین صفر باشد جهت و دامنه M_2 مستقل از موقعیت دقیق r_0 می‌باشد. برای بررسی ماهیت ترم درجه دوم میدان قسمت‌های حقیقی و موهومی آن را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم. برای بدست آوردن قسمت حقیقی ترم درجه دوم میدان، حاصلضربهای برداری در رابطه (۱۰) را با توجه به روابط زیر گسترش می‌دهیم.

$$\vec{M}_2 = \bar{x}M_{2x} + \bar{y}M_{2y} \quad (12)$$

$$\vec{z} \times \vec{R} = -\bar{x} \sin \theta + \bar{y} \cos \theta \quad (13)$$

$$\vec{z} \times \vec{M}_2 = -\bar{x}M_{2y} \sin \theta + \bar{y}M_{2x} \cos \theta \quad (14)$$

$$\vec{R} \cdot \vec{M}_2 = M_{2x} \cos \theta + M_{2y} \sin \theta \quad (15)$$

با جایگذاری روابط فوق در رابطه (۱۰)، ReB_2 بصورت زیر نتیجه می‌گردد:

$$Re \vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} \left[\bar{x}(-ReM_{2x} \sin 2\theta + ReM_{2y} \cos 2\theta) + \bar{y}(-ReM_{2x} \cos 2\theta + ReM_{2y} \sin 2\theta) \right] \quad (16)$$

اگر زاویه بین ReM_2 و محور x ها را ψ_{2R} تعریف کنیم رابطه (۱۶) بصورت زیر ساده می‌گردد:

$$Re \vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} |Re \vec{M}_2| \left[-\bar{x} \sin(2\theta - \psi_{2R}) + \bar{y} \cos(2\theta - \psi_{2R}) \right] \quad (17)$$

رابطه مشابهی را برای ImB_2 با جایگزینی این کمیت با ReB_2 و نیز ReM_2 و ψ_{2R} به ترتیب با ImM_2 و ψ_{2I} در رابطه (۱۷) می‌توان بدست آورد. از رابطه (۱۴) و نظیر موهومی آن دیده می‌شود که دامنه‌های ReB_2 و ImB_2 مستقیماً متناسب با دامنه‌های قسمت‌های حقیقی و موهومی بردار ممان درجه دوم می‌باشند. همانطوری که دیده می‌شود اندازه $Re \vec{B}_2$ به فاصله از منبع و نیز مقدار بردار ممان درجه دوم وابسته است و به جهت بین منبع و نقاط میدان بستگی ندارد.

۳-۲- تحلیل ترم درجه سوم سری میدان

در مورد ترم درجه سوم که متناسب با $1/R^3$ می‌باشد نیز مشابه با روش تحلیل ترم درجه دوم می‌توان قسمت حقیقی میدان درجه سوم را بصورت زیر بدست آورد:

$$Re \vec{B}_3 = \frac{\mu_0}{2\pi R^3} \left[\bar{x}(-ReM_{3x} \sin 3\theta + ReM_{3y} \cos 3\theta) + \bar{y}(-ReM_{3x} \cos 3\theta + ReM_{3y} \sin 3\theta) \right] \quad (18)$$

$$M_{3x} = \sum I_k (p_k^2 - q_k^2) \quad (19)$$

$$M_{3y} = \sum I_k P_k q_k \quad (20)$$

که P_k و q_k در واقع مؤلفه‌های تصویر بردار موقعیت هادی k ام روی محورهای x و y می‌باشند. با تعریف بردار ممان درجه سوم بصورت: $M_{3x} + yM_{3y}$ و ψ_{3R} به عنوان زاویه بین محور $\text{Re } \bar{M}_3$ و محور x رابطه (۱۸) به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\text{Re } \bar{B}_3 = \frac{\mu_0}{2\pi R^3} |\text{Re } \bar{M}_3| [-\bar{x} \sin(3\theta - \psi_{3R}) + \bar{y} \cos(3\theta - \psi_{3R})] \quad (21)$$

رابطه مشابهی را برای قسمت موهومی ترم درجه سوم میدان با جایگزینی $\text{Re } \bar{B}_3$ ، $\text{Re } \bar{M}_3$ و ψ_{3R} به ترتیب با $\text{Im } \bar{M}_3$ و $\text{Im } \bar{B}_3$ می‌توان بدست آورد. همانطوری که دیده می‌شود دامنه‌های $\text{Re } \bar{B}_3$ و $\text{Im } \bar{B}_3$ به فاصله از منبع و اندازه ممان درجه سوم بستگی دارند و به نحوه جهت‌گیری نقطه میدان از منبع بستگی ندارند.

۴-۲ - تحلیل ترم درجه چهارم سری میدان

این ترم متناسب با $1/R^4$ می‌باشد و مشابه روشهای تشریح شده برای ترم‌های درجه دوم و سوم رابطه زیر را می‌توان برای قسمت حقیقی ترم درجه چهارم میدان بدست آورد.

$$\text{Re } \bar{B}_4 = \frac{\mu_0}{2\pi R^4} |\text{Re } \bar{M}_4| [-\bar{x} \sin(4\theta - \psi_{4R}) + \bar{y} \cos(4\theta - \psi_{4R})] \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، ψ_{4R} زاویه بین $\text{Re } \bar{M}_4$ و محور x می‌باشد. مؤلفه‌های تصویر بردار ممان درجه چهارم روی محورهای x و y با روابط زیر بدست می‌آیند.

$$M_{4x} = -\sum I_k (3P_k q_k^2 - P_k^3) \quad (23)$$

$$M_{4y} = \sum I_k (3P_k^2 q_k - P_k^3) \quad (24)$$

در ادامه روش ارائه شده را برای محاسبه ترم درجه دوم میدان یک خط سه فاز تک‌مداره پیاده‌سازی می‌کنیم. فرض کنید که سه هادی (یا هادی باندل شده) خط در محل‌های τ_a ، τ_b و τ_c قرار گرفته و حامل جریانهای I_a ، I_b و I_c باشند. همانطوری که اشاره شد برای محاسبه M_2 با فرض صفر بودن جریان برگشتی زمین می‌توان مبداء را در هر جایی در نظر گرفت. لذا مبداء را در محل هادی C انتخاب کرده، داریم:

$$\bar{M}_2 = I_a \bar{d}_a + I_b \bar{d}_b \quad (25)$$

با مجذور کردن طرفین رابطه (۲۵) داریم:

$$|M_2|^2 = |I_a|^2 d_a^2 + |I_b|^2 d_b^2 + 2 \text{Re}(I_a I_b^*) d_a \cdot d_b \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، $d_a^2 = S_{ac}^2$ ، $d_b^2 = S_{bc}^2$ و $d_a \cdot d_b = \frac{(S_{ac}^2 + S_{bc}^2 - S_{ab}^2)}{2}$ بطوریکه $|d_i - d_j| = S_{ij}$ فاصله بین هادیهای i ام و j ام و τ_a

می‌باشد. با توجه به $I_a + I_b + I_c = 0$ داریم:

$$\operatorname{Re}(I_a I_b^*) = \left(\frac{(|I_c|^2 - |I_a|^2 - |I_b|^2)}{2} \right) \quad (27)$$

با قرار دادن روابط مذکور در (26) و ساده کردن آن داریم:

$$(B_2)_{\text{rms}} = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} \left[\frac{|I_a|^2}{2} (S_{ab}^2 + S_{ac}^2 - S_{bc}^2) + \frac{|I_b|^2}{2} (S_{ab}^2 + S_{bc}^2 - S_{ac}^2) + \frac{|I_c|^2}{2} (S_{ac}^2 + S_{bc}^2 - S_{ab}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

حال اگر دامنه جریانهای فاز مساوی باشند به عبارت دیگر فقط توالی مثبت داشته باشیم یعنی $I_a = I_b = I_c = I$

آنگاه رابطه (28) بصورت زیر کاهش می‌یابد.

$$(B_2)_{\text{rms}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{S_{ab}^2 + S_{ac}^2 - S_{bc}^2}{2}} \quad (29)$$

توجه کنید که:

$$(B_2)_{\text{rms}}^2 = (B_2)_{\text{maj}}^2 + (B_2)_{\text{min}}^2 \quad (30)$$

که $(B_2)_{\text{maj}}$ و $(B_2)_{\text{min}}$ به ترتیب اندازه نیم‌قطرهای اصلی و کوچک بیضی میدان می‌باشند که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$B_{\text{maj}}^2 = \frac{1}{2} [B_{\text{rms}}^2 + B_p^2] \quad (31)$$

$$B_{\text{min}}^2 = \frac{1}{2} [B_{\text{rms}}^2 - B_p^2] \quad (32)$$

که در روابط فوق B_p^2 عبارت است از:

$$B_p = \frac{\mu_0}{2\pi R^2} \left[\frac{(S_{ab}^2 - S_{ac}^2)^2}{2} + \frac{(S_{ab}^2 - S_{bc}^2)^2}{2} + \frac{(S_{ac}^2 - S_{bc}^2)^2}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (33)$$

هدف از گسترش میدان مغناطیسی بصورت یک سری آن بوده است که با توجه به متناسب بودن ترم‌های سری میدان با توانهای $1/R$ ، $1/R^2$ ، $1/R^3$ ، $1/R^4$ و ... برای محاسبه میدان در نقاط دور در مقایسه با فاصله‌گذاری بین فازها ترم‌های درجات پایین غالب بوده و می‌توان از اثرات ترم‌های درجات بالاتر صرف‌نظر نمود.

در این میان به نظر می‌رسد که ترم درجه اول به دلیل متناسب بودن آن با $1/R$ در مقایسه با سایر ترم‌های میدان غالب‌تر می‌باشد ولی نکته قابل توجه آن است که این ترم متناسب با I_0 یعنی جریان برگشتی زمین می‌باشد که در یک سیستم متعادل مقدار آن صفر می‌باشد و در عمل نیز مقداری کوچک دارد.

بنابراین با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت که ترم غالب بعدی در محاسبه میدان ترم درجه دوم خواهد بود. لذا می‌توان اندازه میدان مغناطیسی دور یک خط را با محاسبه تنها ترم درجه دوم با تقریب قابل قبولی بدست آورد. اما اگر بتوانیم کاری کنیم که ترم درجه دوم نیز حذف گردد، آنگاه ترم غالب درجه سوم خواهد بود که در واقع با این کار به کاهش قابل ملاحظه‌ای در میدان منتجه دست خواهیم یافت. همین روند را می‌توان برای ترم درجه سوم و ... نیز پیش برد. طرح انتخابی

بستگی به میزان کاهش مورد نیاز و نیز ملاحظات فنی و اقتصادی دارد.

روش مذکور یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روشها در کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط می باشد عبارت دیگر با انجام تمهیدات مناسب ترم های درجه دوم، درجه سوم و... را حذف می کنند در نتیجه میدان حاصله به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

۳- کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط انتقال نیرو با روش شکافت فاز

با توجه به مطالب ارائه شده فوق، اگر بتوانیم کاری کنیم که ترم درجه دوم میدان را حذف کنیم آنگاه ترم غالب در محاسبه میدان ترم درجه سوم یعنی متناسب با $\frac{1}{R^3}$ خواهد بود که به کاهش قابل ملاحظه ای در میدان منتهی می گردد. حال به بررسی شرایطی می پردازیم که ترم درجه دوم میدان حذف گردد. برای این منظور آرایش خط در شکل (۲) را در نظر بگیرید. مقدار بردار ممان درجه دوم در آرایش مذکور برابر خواهد بود با:

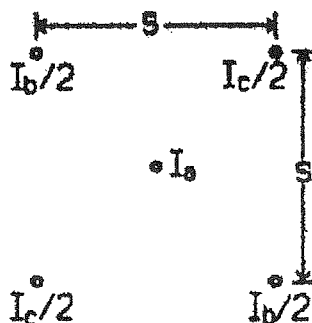
$$\bar{M}_2 = I_a \bar{d}_a + I_b \frac{(\bar{d}_{b1} + \bar{d}_{b2})}{2} + I_c \frac{(\bar{d}_{c1} + \bar{d}_{c2})}{2} \quad (34)$$

بعلت متقارن بودن آرایش داریم:

$$\frac{(\bar{d}_{b1} + \bar{d}_{b2})}{2} = \frac{(\bar{d}_{c1} + \bar{d}_{c2})}{2} = \bar{d}_a \quad (35)$$

با توجه به رابطه (۳۵)، رابطه (۳۴) بصورت زیر نتیجه می گردد:

$$\bar{M}_2 = (I_a + I_b + I_c) \bar{d}_a \quad (36)$$



شکل (۲) آرایش خط با میدان مغناطیسی پایین.

از رابطه (۳۶) دیده می شود که به شرط صفر بودن جمع برداری جریانهای فاز یا عبارت دیگر صفر بودن جریان برگشتی زمین بردار ممان درجه دوم صفر خواهد شد که حذف ترم درجه دوم میدان را نتیجه می دهد. این نکته با توجه به مطالب ارائه شده در ادامه مبنی بر صفر بودن یا کوچک بودن مقدار جریان برگشتی زمین قابل دستیابی می باشد. پیش شرط رابطه (۳۶) متقارن بودن آرایش خط با توجه به رابطه (۳۵) می باشد. عبارت دیگر با شکافت جریانهای دو فاز و توزیع متقارن آن در اطراف فاز باقیمانده و با شرط صفر بودن یا کوچک بودن مقدار جریان برگشتی زمین ترم درجه دوم میدان حذف یا مقدار کوچکی را خواهد داشت. آنگاه میدان مغناطیسی، مشابه با روابط ارائه شده در قسمت (۲) برابر خواهد بود با:

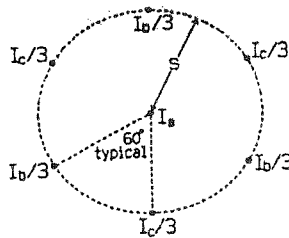
$$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S^2 I}{4\pi R^3} \quad (37)$$

$$B_{min} = 0 \quad (38)$$

با توجه به تأثیر جریان برگشتی زمین در تحلیل فوق و مهمتر از آن وجود آن در ترم درجه اول که غالب‌تر از ترم درجه دوم می‌باشد لزوم بررسی دقیق‌تر آن ضروری بنظر می‌رسد. نوعاً این جریانه‌ها از 1% جریان خط تجاوز نمی‌کنند [9]. مقادیر کوچکتر نیز گزارش شده است، در مقابل مقادیر تا 3% نیز اندازه‌گیری شده است. البته باید توجه داشت که جریان مذکور توسط ترانسفورماتورهای جریان اندازه‌گیری می‌شود و امکان غیر دقیق بودن آنها بعلاوه سطح پایین جریان وجود دارد [8].

ترم درجه اول میدان تقریباً مستقل از فاصله‌گذاری بین فازها و طراحی خط می‌باشد. لذا هیچکدام از روشهای فشرده‌سازی خطوط و شکافت فاز این ترم را کاهش نمی‌دهند. لذا یکی از معیارهای مهم در طراحی خطوط با میدان مغناطیسی پایین، کنترل و محدود کردن جریان برگشتی زمین می‌باشد که یکی از روشهای مؤثر ترانسپوز کردن خط می‌باشد.

حال آرایش شکل (3) را در نظر بگیرید در این حالت فازهای b و c به سه زیر فاز تقسیم شده است و بطور متقارن حول فاز a قرار گرفته است. آرایش مذکور به آرایش ستاره (STAR) معروف است.



شکل (3) آرایش خط میدان پایین با طرح ستاره.

در آرایش مذکور نه تنها ممان درجه دوم بلکه ممان درجه سوم نیز صفر می‌باشد. لذا ترم غالب میدان ترم درجه چهارم می‌باشد که به کاهش قابل توجهی در میدان منتهی خواهد شد. میدان منتهی در آرایش مذکور برابر است با:

$$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S^3 I}{2\pi R^4} \quad (39)$$

$$B_{min} = 0 \quad (40)$$

روابط مربوط به محاسبه میدان مغناطیسی آرایش‌های متداول خطوط با آرایش معمول و شکافت فاز شده را با استفاده از بسط سری میدان تشریح شده در قسمت 2 در جدول (1) آورده شده است. حال میزان مؤثر بودن روش شکافت فاز را در مقایسه با طرحهای معمول خط را با استفاده از نرم افزار تهیه شده برای محاسبه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی خطوط انتقال بررسی می‌کنیم. روابط ارائه شده در قسمت‌های 2 و 3 و نیز جدول (1) که با تکیه بر تقریب فاصله دور نقاط محاسبه در مقایسه با فاصله‌گذاری فازها بدست آمده‌اند، برای بدست آوردن ایده‌های کاهش میدان بسیار مفید می‌باشند. حال که ایده مورد نظر را در قسمت 3 بدست آوردیم، میدان مغناطیسی را با روابط دقیق محاسبه می‌کنیم.

در این رابطه بسته‌نرم‌افزاری تهیه شده میدان مغناطیسی حول خطوط را از فرمول دقیق زیر که جریان برگشتی زمین را در قالب عمق نفوذ مختلط در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌کند [15].

$$B_{rms} = -2 \sum I_n \left\{ \left[\left(\frac{y - y_i}{r_{cn}^2} \right) - \left(\frac{y + y_i + \alpha}{r_{in}^2} \right) \right] \vec{u}_x - \left[\left(\frac{x - x_i}{r_{cn}^2} \right) - \left(\frac{x - x_i}{r_{in}^2} \right) \right] \vec{u}_y \right\} \quad \text{mG} \quad (\text{میلی گوس})$$

$$r_{cn} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

$$r_{in} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i + \alpha)^2}$$

$$\alpha = \sqrt{2} \delta_g e^{-j\frac{\pi}{4}}$$

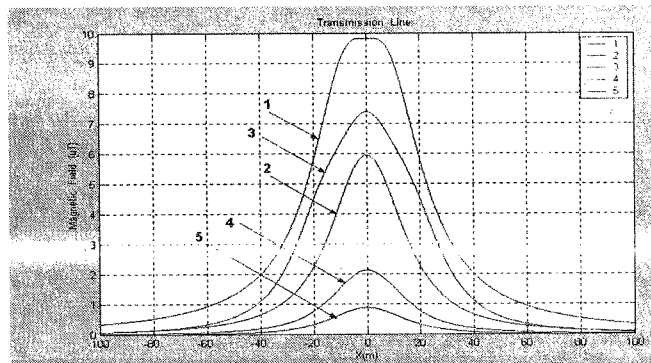
$$\delta_g = 503 \sqrt{\frac{\rho_g}{f}}$$

جدول (1) چگالی شار مغناطیسی در فواصل دور از آرایش های مختلف تک مداره.

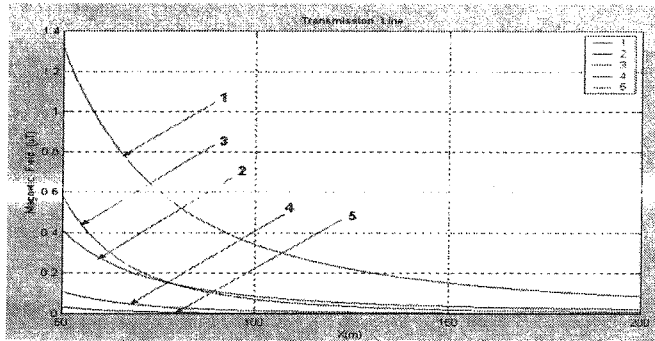
۱		$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S I}{2\pi R^2} \quad B_{min} = 0$
۲		$B_{rms} = \frac{\mu_0 \sqrt{6} S I}{4\pi R^2} \quad B_{maj} = B_{min} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S I}{4\pi R^2}$
۳		$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{13} S^2 I}{2\pi R^3} \quad B_{min} = 0$
۴		$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S^2 I}{4\pi R^3} \quad B_{min} = 0$
۵		$B_{rms} = B_{maj} = \frac{\mu_0 \sqrt{3} S^3 I}{2\pi R^4} \quad B_{min} = 0$

که ρ_g مقاومت ویژه زمین به ohm.m و f فرکانس می باشد. جریان خط در تمام آرایشها 1000A فرض شده و آرایشهای جدول (1) به ترتیب از بالا به پایین با 1, 2, 3, 4 و 5 شماره گذاری شده اند. ارتفاع فاز پایینی در تمام آرایشها از سطح زمین 15m و فاصله گذاری فازهای مجاور $S=10m$ فرض گردید. پروفیل های منتهی از بسته نرم افزاری مذکور در شکل (4) نشان داده شده است که با توجه به آن نکات زیر نتیجه می گردد:

- همانطور که انتظار می رفت آرایش شکافت به سه زیر فاز میدان بسیار پایینی را در مقایسه با سایر آرایشها دارا می باشد.
- همچنین آرایش شکافت به دو زیر فاز در فرم مربعی نیز میدان مغناطیسی پایین تری را در مقایسه با آرایشهای معمولی و نیز آرایش شکافت به دو زیر فاز در فرم افقی دارا می باشد که این مطلب با روابط منتهی در جدول (1) تطابق دارد.
- اما آرایش معمولی دلتا میدان مغناطیسی پایین تری را در مقایسه با آرایش شکافت فاز به دو زیر فاز در فرم افقی دارا می باشد که به نظر می رسد با مطالب و روابط جدول (1) در تناقض می باشد اما با دور شدن از خط با توجه به شکل (5) مشاهده می گردد که میدان مغناطیسی حول آرایش شکافت فاز از میدان معمولی دلتا کمتر می شود که این مطلب با توجه به اینکه روابط جدول (1) برای نقاط دور صادق می باشند در تطابق می باشد.

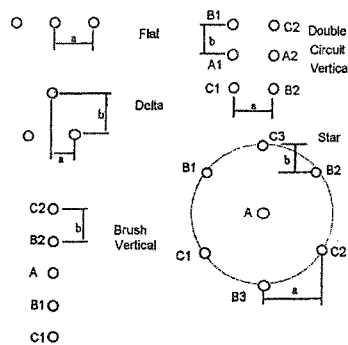


شکل (4) پروفیل میدان مغناطیسی آرایشهای مختلف.



شکل (۵) پروفیل میدان مغناطیسی آرایشهای مختلف در فواصل دور.

- و نیز اینکه آرایش دلتا میدان مغناطیسی پایین تری را نسبت به آرایش افقی نتیجه می دهد. شکل شماره (۶) مشخصات آرایشهای معمول و شکافت فاز و فشرده را نمایش میدهد.



شکل (۶) مشخصات آرایشهای معمول و شکافت فاز و فشرده.

۱-۳- محدودیت های روش شکافت فاز - افزایش نویز صوتی (AN (Audible Noise))

یک عامل محدودکننده در روش های فشرده سازی خطوط و شکافت فاز افزایش نویز صوتی تولید شده بوسیله کرونا می باشد. در استانداردها سطوح مجاز نویز صوتی برای هر سطح ولتاژی مشخص شده است. بعنوان مثال در مرجع [9] آورده شده است که سطح AN در شرایط باران، در یک فاصله 24.4m از مرکز خط برای خطوط 115-500kv، نباید از 55dB و برای خط 765kv نباید از 60dB تجاوز نماید.

سطح مقطع فاز برای آرایش های معمولی خط با توجه به بار در جدول (۲) آورده شده است. اگر قرار باشد که سطح مقطع کل فاز در روش شکافت فاز همان مقدار جدول (۲) را دارا باشد، در نتیجه هادی هایی با سطح مقطع کمتر برای زیر فازها خواهیم داشت که این امر موجب افزایش کرونا و افزایش نویز صوتی خواهد شد.

جدول (۲) ابعاد نوعی، جریانه و میدانهای مغناطیسی منتهجه برای خطوط مسطح با فاصله گذاریهای معمول.

ولتاژ خط kv					پارامتر
765	500	345	230	115	
13.7	10.7	9.15	7.6	6.40	فاصله فاز به فاز (m)
490	400	310	180	160	اسپین (m)
22.9	19.5	14.2	6.7	6.4	شکم (m)
12.2	9.8	9.2	8.5	7.9	فاصله از زمین در وسط اسپین (m)
5-7	3	2	1	1	جریان ماکزیمم (KA)
45	35	30	25	15	میدان مغناطیسی در فاصله ۳۰ متری از خط و جریان IKA (mG)
340	110	60	25	12	میدان مغناطیسی در فاصله ۳۰ متری از خط و جریان ماکزیمم (mG)
4x483 up to 4x902	2x902 or 3x483	2x483	1x483	1x282 up to 1x483	طرح معمول فاز

این مشکل در روش فشرده‌سازی خطوط نیز بعلت نزدیک‌کردن فازها به هم تشدید می‌گردد لذا برای رعایت سطوح مجاز نویز صوتی در طرحهای فشرده‌سازی خطوط و شکافت فاز تعداد زیر هادیهای فاز باید به صورت زیر اصلاح گردد [8].

جدول (۳) فواصل جداسازی در طرحهای مختلف خطوط.

آرایش & فاصله‌گذاری	ولتاژ خط kv				
	765	500	345	230	115
خط مسطح a	13.7	10.7	9.15	7.6	3.65
خط دلتا a b	6.9	6.1	6.1	7.6	3.65
	11.9	8.9	4.6	3.8	1.83
خط مسطح فشرده a		6.71	4.58	3.66	1.49
خط دلتا فشرده a b		3.36	2.29	1.98	1.07
		6.41	3.97	1.83	1.04
خط شکافت فاز عمودی b		5.28	3.57	2.44	1.49
خط شکافت فاز دو مداره a b		6.71	4.58	3.96	2.14
		5.28	3.57	2.44	1.49
خط STAR a b				3.93	2.27
				2.27	1.31

– در خطوط 115-230 kv با طرحهای فشرده‌سازی خط همراه با شکافت فاز به دو یا حتی سه زیر فاز، مشکلی در رابطه با نویز صوتی وجود ندارد.

– در خط kv ۲۳۰ با طرح فشرده سازی خط با باندل دوتایی مشکل نویز صوتی نداریم، اما اگر این طرح به همراه روش شکافت فاز استفاده شود باید در هر فاز از ۳ زیرهادی در باندل استفاده شود.

– در خط kv 500 طرح فشرده سازی خط به تنهایی به ۳ زیرهادی در باندل نیاز دارد و استفاده از آن همراه با شکافت فاز دوتایی به ۵ زیر هادی در باندل نیاز دارد.

جدول (۳) فاصله گذاری بین فازها را در آرایش‌های مذکور در سطوح ولتاژی مختلف نشان می‌دهد [8].

۳-۲- ملاحظات اقتصادی روش شکافت فاز

جدول (۴) درصد تقریبی هزینه‌های تجهیزات و متعلقات اصلی خط با آرایش افقی معمول با سطوح ولتاژ مختلف را نشان می‌دهد [۸].

جدول (۴) درصد تقریبی هزینه‌های تجهیزات و متعلقات اصلی خط با آرایش افقی معمول با سطوح ولتاژ مختلف.

ولتاژ خط kv		مواد سازنده
115-230	345-765	
0.45	0.3	هادیها و سیم های زمین
0.3	0.35	برجها و فونداسیون
0.25	0.35	مقره ها و متعلقات

هزینه کل تغییر آرایش خط و تبدیل آن به آرایش های متنوع شکافت فاز از حاصلضرب هزینه طرح خط با آرایش مسطح در چهار فاکتور B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 بدست می‌آید [۸]. این چهار پارامتر در جدول (۵) تعریف شده‌اند. روابط ارائه شده بصورت تجربی نتیجه شده‌اند.

جدول (۵) ضرایب مؤثر برای محاسبه هزینه نسبی برای آرایش‌های مورد نظر.

پارامتر متغیر	هادیها و سیم های زمین	برجها & فونداسیون	مقره ها & متعلقات
سطح مقطع کل هادیهای خط و سیم های زمین (B_1)	S/S_0	$(0.2+0.8S_0)/S_0$	ثابت
تعداد کل هادیها (B_2)	$(0.8+0.2n)/n_0$	$0.8+0.4 \times [(n-n_0)/n_0]^{0.5}$	ثابت
تعداد کل زیر هادیها در روش شکافت فاز (B_3)	ثابت	ثابت	$N/3$
فاصله بین فازها (B_4)	ثابت	$(0.8+0.2D)/D_0$	اگر هیچ جداکننده فازی استفاده نشود: 1.0 اگر جداکننده فازی استفاده شود: $1.0+2F/N$

S_0 و S به ترتیب سطح مقطع هادیها و سیم های زمین در آرایش مورد نظر و آرایش خط مسطح، n و n_0 به ترتیب تعداد کل هادیها در آرایش مورد نظر و آرایش خط مسطح، D و D_0 به ترتیب فاصله گذاری فاز در آرایش مورد نظر و آرایش خط مسطح، N تعداد کل زیر فازها در آرایش مورد نظر، F تعداد جداکننده‌های عایقی برای یک مجموعه در آرایش مورد نظر (F به طرح خط بستگی دارد).

۴ - کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط انتقال نیرو با روش شیلد کردن

یک حالت دیگر در رابطه با کاهش میدان مغناطیسی خطوط در مورد خطوطی است که احداث شده‌اند. هر چند که سعی می‌شود خطوط انتقال معمولاً در محل‌های غیر مسکونی نصب و تعبیه شوند اما در مناطق دارای بافت مسکونی متراکم نمی‌توان توسعه پیوسته ساختمان‌سازی را در زیر و نزدیک خطوط محدود کرد.

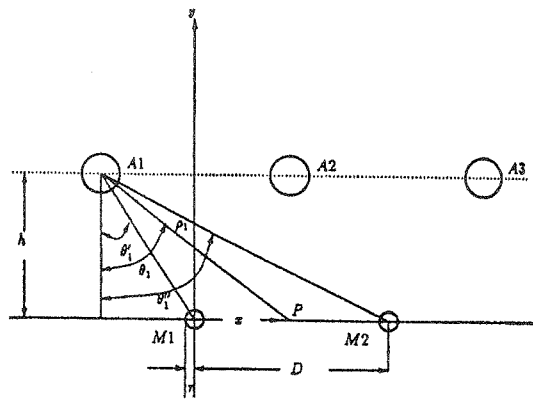
لذا پس از گذشت چندی مناطق اطراف خط از نظر آلودگی میدانی حائز اهمیت شده و لزوم تدابیر کار آمد و اقتصادی برای کاهش میدان مغناطیسی ضرورت می‌نماید. واضح است که در این مورد استفاده از روشهای کاهش میدان شکافت فاز و فشرده‌سازی خطوط عملی و به صرفه نبوده و مستلزم تغییرات زیادی در آرایش و شکل دکلها و سایر تجهیزات مربوطه می‌باشد.

در اینگونه موارد شیلد کردن روشی به صرفه و مؤثر می‌باشد. در این روش حلقه‌های بسته‌ای را در نزدیکی خطوط مورد نظر قرار می‌دهند.

متغیر بودن جریان فازهای خط نسبت به زمان موجب به وجود آمدن جریان القایی در حلقه مذکور می‌گردد. جهت جریان القایی و میدان مغناطیسی منتهی آن بر طبق قانون لنز مخالف میدان اصلی می‌باشد که کاهش میدان را نتیجه می‌دهد. دو نوع شیلد کردن داریم: شیلد پسیو و شیلد اکتیو. در شیلد کردن اکتیو برخلاف شیلد کردن پسیو که از منبع خارجی استفاده نمی‌کند، از یک منبع خارجی برای تولید جریان استفاده می‌گردد. واضح است که از شیلد اکتیو در مواردی استفاده می‌شود که شیلد کردن پسیو به تنهایی کفایت نمی‌کند و نیاز به کاهش بیشتر میدان داریم. در هر نوع روش شیلد کردن می‌توان از خازن گذاری سری برای جبران اندوکتانس حلقه و افزایش جریان در حلقه استفاده نمود. اولین گام در محاسبات روش شیلد کردن محاسبه جریان القایی در حلقه شیلد می‌باشد.

۴-۱- محاسبه جریان القاء شده در حلقه شیلد

شکل (۷) مدار حلقه شیلد متشکل از دو هادی M_1 و M_2 واقع در زیر هادیهای فاز را در نظر بگیرید. برای ایجاد جریان القایی سیمهای M_1 و M_2 باید تشکیل حلقه بسته‌ای را دهند. شار پیوندی ناشی از جریان I_1 هادی A_1 در حلقه شیلد بر طبق قانون بیوساوار برابر است با:



$$\Phi_1 = \int_r^D \vec{B}_1 dx \quad (42)$$

شکل (۷) شار پیوندی مدار شیلد با جریان هادی A_1 .

با توجه به سیستم مختصات نشان داده شده در رابطه (۴۲) تنها مؤلفه بردار چگالی شار B_1 در مقدار انتگرال مذکور سهیم می‌باشد. این مؤلفه برابر است با:

$$B_{1y} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi \rho_1} \sin\theta_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi h} \sin\theta_1 \cos\theta_1 \quad (43)$$

با توجه به شکل، $\rho_1 = \frac{h}{\cos\theta_1}$ ، $dx = h \cot\theta_1 d\theta_1$

$$\phi_{1y} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \int_{\theta_1'}^{\theta_1''} \sin\theta_1 \cos\theta_1 \cot\theta_1 d\theta_1 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \left[\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right]_{\theta_1'}^{\theta_1''} \quad (44)$$

اگر همین روش برای میدانهای مغناطیسی تولید شده بوسیله جریان I_2 و I_3 نیز بکار گرفته شود، شار کل منتهی گذرنده از حلقه شیلد برابر خواهد شد با:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (45)$$

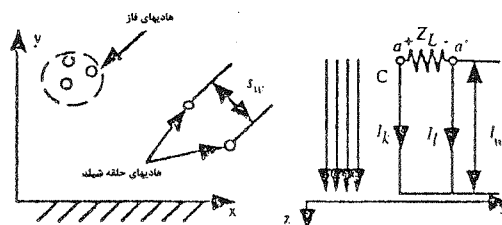
آنگاه ولتاژ القایی V_a در حلقه شیلد به طول L برابر است با:

$$V_a = j\omega\Phi L \quad (46)$$

با توجه به ولتاژ V_a و امپدانس حلقه Z_a ، جریان I_a در حلقه برابر است با:

$$I_a = \frac{V_a}{Z_a} \quad (47)$$

در مرجع [15] روش دقیق‌تری برای محاسبه جریان القایی در یک حلقه نزدیک ارائه می‌دهد. شمای مساله در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸) آرایش خط و حلقه تزویج.

حلقه شامل دو سیم موازی با خط انتقال بوده که در دو انتها به امپدانس Z_L ختم می‌گردد. هر کدام از سیم‌ها دارای شعاع a_w ، طول l_w و هدایت σ_w می‌باشند. فرض می‌شود که l_w خیلی بزرگتر از فاصله سیم‌های حلقه (S_w) باشد. برای حل مساله کافی است که مدار معادل تونن از دو سر را در شکل (۸) بدست آوریم. برای این منظور امپدانس را از مدار برداشته و پس از تعیین مدار معادل تونن برای محاسبه جریان القایی مجدداً آن را به مدار متصل می‌کنیم. اگر طول حلقه خیلی کوچکتر از طول موج (در 50HZ، 6000km) باشد، ولتاژ مدار باز در ترمینال را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V_{aa'} = - \int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (48)$$

در رابطه (۴۸) E میدان الکتریکی در غیاب حلقه و c کانتور در حلقه مشخص شده در شکل (۸) می‌باشد. امپدانس تونن یک خط انتقال با اتلاف برابر است با:

$$Z_{TH} = j2f\mu_0 l_w \ln\left(\frac{S_w}{a_w}\right) + 2(l_w + S_w)Z_S \quad (49)$$

$$Z_S = j \frac{f\mu_0}{a_w S_w} \left(\frac{\text{ber}(k) + j\text{bei}(k)}{\text{ber}'(k) + j\text{bei}'(k)} \right) \quad (50)$$

$$k = 0.00281 \times a_w \sqrt{f \cdot S_w} \quad (51)$$

در رابطه (۵۰) $\text{ber}(x)$ و $\text{bei}(x)$ توابع کلونین می‌باشند. با فرض غیر مغناطیسی بودن هادیهای رابطه (۴۸) برابر است با

$$V_{aa'} = - \sum_{n=1}^{N_C} (Z_{nk} - Z_{nl}) I_n \quad (52)$$

$$Z_{nk} = -jf\mu_0 \left\{ \ln \left[\sqrt{\frac{(d_n + d_k + \alpha_g)^2 + (h_n - h_k)^2}{(d_n - d_k)^2 + (h_n - h_k)^2}} \right] + C \right\} \quad (53)$$

$$C = \frac{\alpha_g^3}{24} \left\{ \frac{6(d_n + d_k + \alpha_g)(h_n - h_k)^2 - 2(d_n + d_k + \alpha_g)^3}{[(d_n + d_k + \alpha_g)^2 + (h_n - h_k)^2]^3} \right\}$$

Z_{nl} را می‌توان با جایگزین کردن l بجای k در رابطه (۵۳) بدست آورد. سیم k و l دو سیمی هستند که حلقه مذکور را مطابق شکل (۸) تشکیل می‌دهند. حال با اتصال امپدانس در دو سر ترمینال مقدار جریان القاء شده در حلقه برابر خواهد بود با:

$$I_k = \frac{V_{aa'}}{Z_{TH} + Z_L} \quad (54)$$

۴-۲- روش شیلد کردن

یک نکته مهم در مورد روش شیلد کردن انتخاب موقعیت مناسب برای حلقه شیلد می‌باشد حلقه مذکور می‌تواند در زیر هادیهای فاز یا بین هادیهای زمین باشد در ضمن می‌توان از سیم‌های زمین بعنوان حلقه شیلد استفاده نمود. فاصله بین هادیهای حلقه شیلد نیز حائز اهمیت می‌باشد. همانطوری که از رابطه (۴۶) دیده می‌شود برای افزایش جریان القایی

باید شار گذرنده از حلقه شیلد افزایش یابد که این امر با افزایش سطح حلقه مذکور امکان پذیر خواهد بود. افزایش سطح حلقه شیلد نیز با افزایش فاصله بین هادیهای حلقه شیلد امکان پذیر می‌باشد. با توجه به موقعیت نشان داده شده در شکل (۷) و رابطه (۴۴) واضح است که ماکزیمم شار گذرنده زمانی نتیجه می‌گردد که هادیهای حلقه شیلد درست در زیر و بالای هادیهای کناری قرار گرفته باشند.

نکته دیگر در مورد فاصله بین هادیهای حلقه شیلد آن است فاصله آنها باید به ترتیبی انتخاب گردد که از لحاظ نصب روی دکل مشکلی نداشته باشند که با انتخاب آنها درست در زیر هادیهای فاز بیرونی این نکته نیز رعایت می‌شود.

واضح است که قرار گرفتن حلقه شیلد در زیر هادیهای فاز تاثیر بیشتری را در کاهش میدان در نزدیکی سطح زمین نسبت به حالتی که حلقه شیلد در بالای هادیهای فاز قرار می‌گیرد دارا می‌باشد. در این مورد هر چه حلقه شیلد به سطح زمین نزدیکتر باشد نتیجه مطلوبتر حاصل می‌گردد اما علیرغم ولتاژ پایین حلقه شیلد با این حال باید ایزولاسیون حلقه شیلد از سطح زمین و رعایت ارتفاع مجاز از سطح زمین به ویژه در وسط اسپن مورد توجه قرار گیرد. محدودیت مذکور در بعضی موارد به نحو جدی خود را نشان می‌دهد به طوری که نصب حلقه شیلد در زیر هادیهای فاز را بطور کلی را غیر ممکن و منتفی می‌سازد. در چنین مواردی حلقه شیلد را در بالای هادیهای فاز و زیر سیم‌های زمین قرار می‌دهیم. در این حالت با نصب مقره‌های اتکایی روی بازوی دکل هادیهای حلقه شیلد را نصب می‌گردد. نکته حائز اهمیت در این مورد آن است که با نصب حلقه‌های شیلد بصورت مذکور موقعیت سیم‌های زمین بعنوان سیم‌های محافظ در مقابل صاعقه باید مورد بازبینی قرار گیرد.

نکته مهم در مورد نصب حلقه‌های شیلد چه در زیر و چه در بالای هادیهای فاز بررسی استقامت مکانیکی بازوهای برج در مقابل بارگذاری اضافی ناشی از وزن هادی و مقره و نیروی باد و برف و یخ حلقه‌های شیلد می‌باشد. از طرف دیگر مسایل ایزولاسیون مورد نیاز بین هادیهای فاز و حلقه شیلد نیز باید در نظر گرفته شود. ضمن اینکه باید اندازه هادیهای حلقه شیلد برای عملکرد کرونا و ظرفیت حمل جریان بررسی و امتحان گردد.

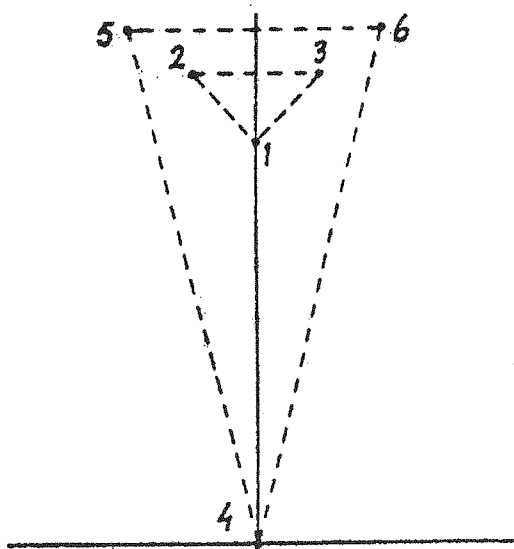
اگر خازن‌گذاری سری برای جبران‌سازی اندوکتانس خودی هادیهای حلقه شیلد استفاده گردد باید به انتخاب مناسب سطح ولتاژ خازن و در حالتی که حلقه شیلد در بالای هادیهای فاز نصب می‌گردد باید نسبت به حفاظت خازن در مقابل صاعقه بوسیله برقگیرها اقدام نمود [۱۶]

یک روش اقتصادی در استفاده از حلقه شیلد استفاده از سیم‌های زمین بعنوان حلقه‌های شیلد می‌باشد برای این منظور لازم است که سیم‌های زمین توسط مقره‌های اتکایی (Post Insulator) از دکل ایزوله شوند در این صورت برای اینکه سیم‌های زمین نقش اصلی خود یعنی حفاظت در مقابل صاعقه را دارا باشند باید در نظر گرفتن شاخک‌های گیره در دو سر مقره‌های مذکور امکان شکست الکتریکی را در هنگام اضافه ولتاژهای گذرا فراهم می‌نمایند. نکته دیگر در مورد طراحی فواصل بین شاخک‌های مذکور آن است که در هنگام کار عادی سیستم (و نیز استفاده از آن حلقه شیلد) ایزولاسیون کافی را فراهم نماید. اما استفاده از سیم‌های زمین بعنوان حلقه شیلد دارای تاثیر کمتری در کاهش میدان مغناطیسی در نزدیکی سطح زمین نسبت به سایر موقعیت‌های حلقه شیلد می‌باشد. دلیل این امر بعلاوه فاصله بیشتر حلقه شیلد مذکور از نقاط در سطح زمین و نیز کوچکتر بودن سطح حلقه شیلد نسبت به موقعیت‌هایی است که حلقه شیلد درست در زیر یا بالای هادیهای فازهای بیرونی قرار گرفته است. قرار دادن حلقه شیلد در سطح زمین علاوه بر آنکه به کاهش میدان منتجه در نزدیکی سطح زمین (ارتفاع ۱ متری) کمکی نمی‌کند بلکه در بعضی نقاط موجب افزایش غیر قابل قبول میدان نیز می‌گردد که نه تنها به لحاظ سلامتی بلکه مهمتر از آن بخاطر القاء ولتاژ و جریان در تجهیزات و وسایل اطراف و شوک در بدن انسان خطرناک می‌باشد. ضمن آنکه مشکلات عایقی ناشی از قرار دادن حلقه شیلد در سطح زمین نیز باید مورد توجه قرار گیرد. مسائل مذکور موجب می‌گردد که قرار دادن حلقه شیلد در سطح زمین منتفی گردد [۱۰]

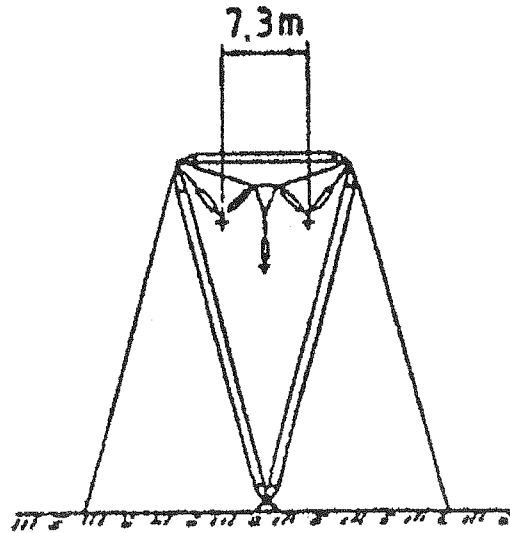
یکی از مزایای روش شیلد پسیو آن است که جریان متعادل سازی (القایی) در حلقه شیلد از جریانهای خط نتیجه می‌گردد. بنابراین جریان متعادل سازی همیشه متناسب با جریان بار می‌باشد به عبارت دیگر اثر جبران سازی برای هر مقدار جریان بار خط ثابت است. یک نمونه دیگر شیلد کردن در مرجع [۱۷] برای شیلد کردن خط 400 KV با آرایش نشان داده شده در شکل (۹)، بجای استفاده از حلقه شیلد دو سیمه از یک حلقه شیلد سه سیمه شامل دو سیم زمین و یک سیم که در سطح زمین قرار گرفته است استفاده شده است. آرایش مذکور در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این آرایش هادیهای

شماره ۱، ۲ و ۳ هادیهای فاز و هادیهای شماره ۴، ۵ و ۶ حلقه شیلد سه سیمه را تشکیل می‌دهند.

با تغذیه حلقه شیلد سه سیمه مذکور با یک منبع سه فاز کاهش قابل ملاحظه‌ای در میدان منتجه نزدیک سطح زمین نتیجه می‌گردد. نکته قابل توجه آن است که با توجه به توزیع نامتقارن هادیهای فاز و شیلد نسبت به نقاط مورد نظر محاسبه میدان، تغذیه نامتقارن هادیهای حلقه شیلد سه سیمه تاثیر مطلوبتری را در کاهش میدان در نقاط مورد نظر خواهد داشت در این مورد علاوه بر دامنه، زاویه ولتاژهای تغذیه کننده نیز در کاهش میدان تاثیر بسزایی دارند. لذا یک الگوریتم پیشنهادی برای یافتن اپتیمم زاویه و دامنه ولتاژ تغذیه کننده هادیهای شیلد، یک پروسه سعی و خطا برای یافتن ابتدا زاویه فاز ولتاژ اپتیمم و سپس دامنه ولتاژ اپتیمم خواهد بود.



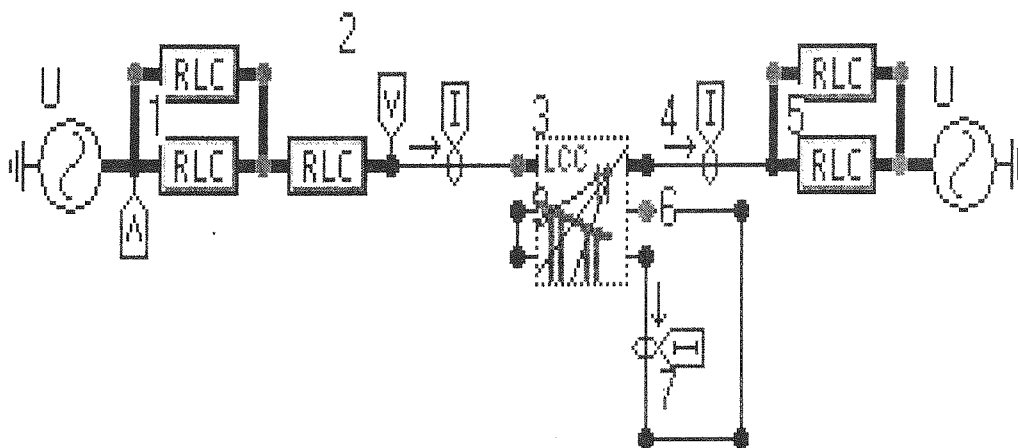
شکل (۱۰) آرایش هادیهای فاز و هادیهای شیلد.



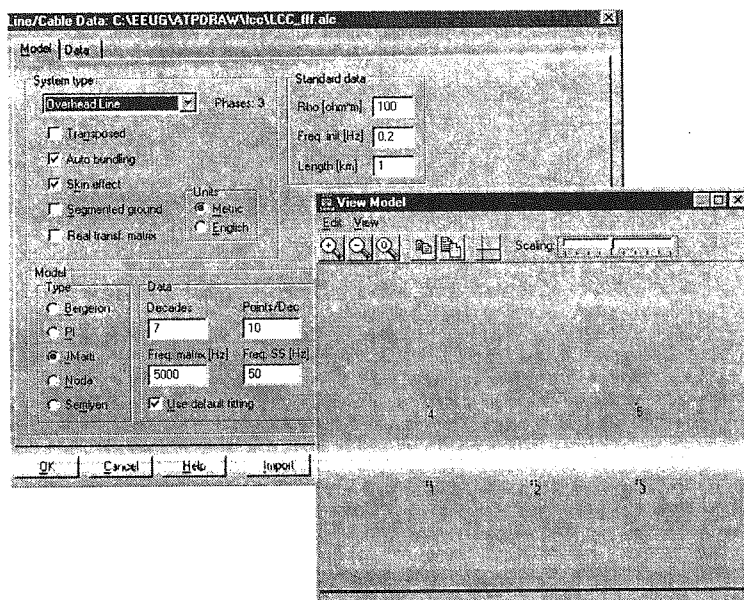
شکل (۹) آرایش خط 400kv.

۴-۳- شبیه سازی برای بررسی میزان تاثیر شیلد کردن

در این قسمت محل بهینه حلقه حفاظ برای اینکه حداکثر تاثیر را در کاهش میدان داشته باشد را با استفاده از ATPDraw و بسته نرم‌افزاری تهیه شده تعیین می‌کنیم.



شکل (۱۱) مدل سازی مسأله حفاظ کردن با ATPDraw.



شکل (۱۲) مدل‌سازی مسأله حفاظ کردن با ATPDraw.

ابتدا با قراردادن حلقه حفاظ در مکانهای مختلف، جریانهای القاء شده در آن را با استفاده از ATPDraw محاسبه کرده و سپس با استفاده از بسته نرم‌افزاری تهیه شده میدان منتهجه را در نقطه مورد نظر محاسبه می‌کنیم. برای مدل‌سازی خط در ATPDraw از مدل خط J.Marti استفاده شده است. شمای مدل‌سازی در شکل (۱۱) و اطلاعات مدل‌سازی خط و آرایش مسأله در یکی از موارد که حلقه حفاظ در محل سیمهای زمین در نظر گرفته شده، در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. طول حلقه حفاظ یک کیلومتر در نظر گرفته شده است. هادیهای ۱، ۲، و ۳ هادیهای فاز و هادیهای ۴ و ۵ هادیهای حلقه حفاظ می‌باشند.

#	Phase	Rin [cm]	Rout [cm]	Bess [ohm/km-DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	3.105	0.0585	-17.5	28	13	-60	45	4
2	2	0	3.105	0.0585	0	28	13	60	45	4
3	3	0	3.105	0.0585	17.5	28	13	60	45	4
4	0	0	1.6	0.304	-17.5	41	29	0	0	0
5	0	0	1.6	0.304	17.5	41	29	0	0	0

شکل (۱۳) مدل‌سازی مسأله حفاظ کردن با ATPDraw.

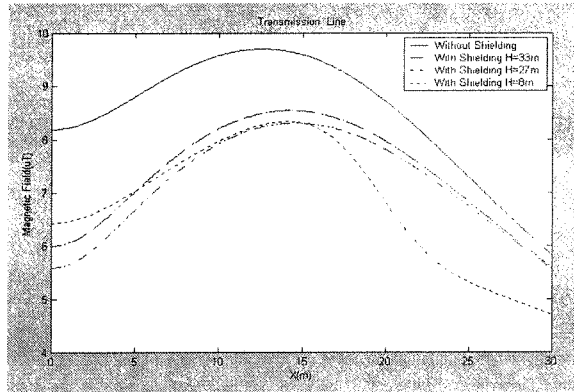
در جداول (۶) و (۷) پیک دامنه جریان خط و جریان حلقه حفاظ در وضعیت‌های مختلف در نظر گرفته شده نشان داده است. جدول (۶) جریانهای حلقه حفاظ در موقعیتهای مختلف حلقه حفاظ.

Horiz(2) (m)	Horiz(1) (m)	Vmid (m)	Vtower (m)	جریان حلقه حفاظ (A)
17.5	-17.5	29	41	219.31
17.5	-17.5	23	35	225.84
17.5	-17.5	4	16	225.87

شکل (۱۴) پروفیل میدان مغناطیسی را در وضعیت‌های مختلف در نظر گرفته شده در جدول (۶) به همراه پروفیل میدان بدون حضور حلقه حفاظ با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۶) در ابتدا موقعیت‌های افقی هادیهای حفاظ را ثابت فرض کرده و ارتفاع آن را به ترتیب در موقعیت سیمهای زمین (ردیف ۱)، در بین سیمهای زمین و هادیهای فاز (ردیف ۲) و در زیر هادیهای فاز (ردیف ۳) متغیر فرض می‌کنیم. با توجه به شکل (۱۴) دیده می‌شود که نصب هادیهای حفاظ در زیر هادیهای فاز میدان پایین‌تری را نسبت به سایر موقعیت‌های هادیهای حفاظ حلقه حفاظ نتیجه می‌دهد.

با توجه به نکته منتهی در شکل (۱۴)، در ادامه ارتفاع هادیهای حفاظ را در زیر هادیهای فاز انتخاب کرده و موقعیت افقی آنها را تغییر می‌دهیم. نتایج بدست آمده از نرم‌افزار ATPDraw در جدول (۷) آورده شده است.

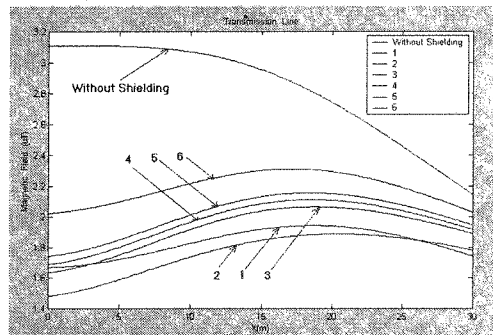


شکل (۱۴) پروفیل میدان مغناطیسی در موقعیت‌های ارتفاع مختلف هادیهای حفاظ.

جدول (۷) جریانهای حلقه حفاظ در موقعیت‌های مختلف حلقه حفاظ.

NO	جریان حلقه حفاظ (A)	Vtower (m)	Vmid (m)	Horiz(1) (m)	Horiz(2) (m)
1	146.01	20	6	-10	10
2	223.08	20	6	-15	15
3	225.18	20	6	-17.5	17.5
4	216.52	20	6	-18	18
5	185.92	20	6	-20	20
6	133.29	20	6	-30	30
WS	128.098	20	6	-40	40

شکل (۱۵) پروفیل میدان مغناطیسی را در وضعیت‌های مختلف در نظر گرفته شده در جدول (۷) به همراه پروفیل میدان بدون حضور حلقه حفاظ با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) پروفیل میدان مغناطیسی در موقعیت‌های افقی مختلف هادیهای حفاظ.

با توجه به شکل (۱۵) می توان نتیجه گرفت که آرایش شماره 2 پایین ترین میدان منتجه را در بین انتخابهای در نظر گرفته شده نتیجه خواهد داد اما با افزایش یا کاهش فاصله بین هادیهای حلقه حفاظ از این مقدار کاهش کمتری را در میدان منتجه خواهیم داشت. با توجه به شکل‌های (۱۴) و (۱۵) می توان نتیجه گرفت که محل بهینه هادیهای حلقه حفاظ در زیر هادیهای فاز می باشد در حالی که فاصله بین هادیهای حلقه حفاظ باید کمتر از فاصله بین هادیهای فاز بیرونی باشد. البته سهولت نصب هادیهای حلقه حفاظ نیز پارامتر مهمی می باشد که محاسبات مذکور را تحت شعاع قرار می دهد. با توجه به نکات مذکور در نظر گرفتن هادیهای حلقه حفاظ درست در زیر هادیهای فاز بیرونی بهترین انتخاب می باشد. نتایج بدست آمده نکات قسمت ۲-۴ را تایید می کند.

۵ - کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط انتقال نیرو با روش فشرده سازی خطوط (کاهش فاصله بین فازها)

میدان مغناطیسی در محل \vec{r} (نقطه میدان) ناشی از یک جریان I در محل \vec{d} (نقطه منبع) برابر است با:

$$\vec{B} = c\vec{z} \times I \frac{(\vec{r} - \vec{d})}{|\vec{r} - \vec{d}|^2} \quad (55)$$

که $c = \mu_0 / 2\pi$ می باشد. آنگاه با استفاده از تئوری دو جمله ای و تعریف d_n^* به عنوان ضرب بردارهای یکه در صفحه مختلط، می توان رابطه زیر را نتیجه گرفت.

$$\frac{(\vec{r} - \vec{d})}{|\vec{r} - \vec{d}|^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{d}_n^*}{r^{n+1}} \quad (56)$$

جزئیات (۵۶) برای ترم های مختلف در قسمت دوم مقاله تشریح گردیده است. آنگاه با استفاده از روابط (۵۵) و (۵۶) داریم:

$$\vec{B} = c \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{M}_n}{r^{n+1}} \quad (57)$$

$$\vec{M}_n = \vec{z} \times \sum I_n \vec{d}_n^* \quad (58)$$

برای بررسی رفتار میدان دور یعنی در حالتی که $r \rightarrow \infty$ میل می کند، اولین مؤلفه غیر صفر n در محاسبه میدان دور غالب خواهد بود که از رابطه زیر بدست می آید.

$$\vec{B} = c \frac{\vec{M}_n}{r^{n+1}} \quad (59)$$

با توجه به رابطه (۵۸) برای M_n می توان رابطه کارآمد (۶۰) را نتیجه گرفت [18].

$$\vec{B} = c \left(\frac{d^n}{r^{n+1}} \right) I \quad (60)$$

در واقع رابطه (۶۰) پارامترهای موثر در اندازه ترم درجه n ام میدان را نشان می دهد. همانطوری که از رابطه (۶۰) دیده می شود این پارامترها عبارتند از: جریان هادی، فاصله بین هادیهای فاز و توان کاهشی n . بنابراین درجه کاهش میدان مغناطیسی در گرو کنترل این عوامل می باشد.

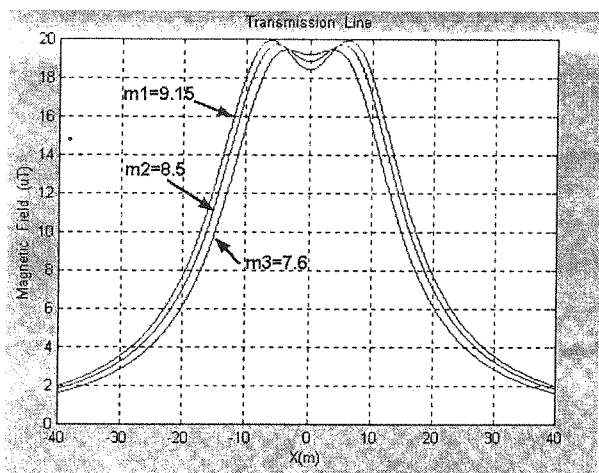
با توجه به رابطه (۶۰) دیده می شود که با کاهش فاصله بین فازها مقدار میدان کاهش می یابد. اما این روش دارای محدودیتهای می باشد. به عبارت دیگر کاهش فاصله بین فازها پارامترهای دیگر طراحی خط را تحت تاثیر قرار می دهد.

در واقع در تعیین فاصله بین فازها عوامل چندی دخالت دارند که عبارتند از:

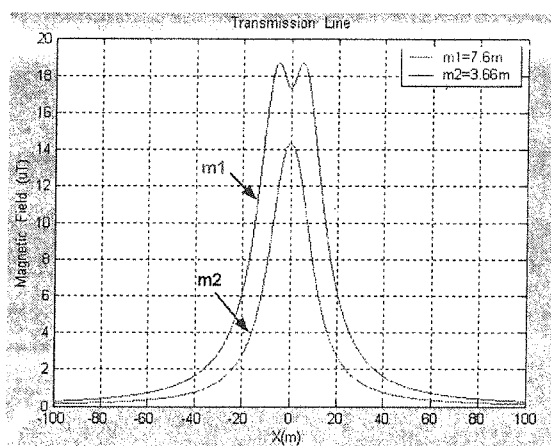
- ۱- تامین تحمل عایقی و ایزولاسیون مطلوب خط در شرایط سرویس.
- ۲- تامین سطوح مجاز میدان الکتریکی اطراف خط

در واقع کاهش فاصله بین فازها موجب افزایش شدت میدان الکتریکی در سطح زمین می‌گردد.

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) پروفیل‌های میدان خط ۲۳۰ کیلوولت با آرایش مختلف را نشان می‌دهند. پروفیل‌های میدان با استفاده از بسته نرم افزاری تهیه شده برای محاسبه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی حول خطوط انتقال نتیجه شده است. نرم افزار مذکور برای محاسبه میدان مغناطیسی از روابط (۴۱)، با در نظر گرفتن اثر جریان برگشتی استفاده می‌کند.



شکل (۱۷) خط ۲۳۰ کیلوولت، آرایش مثلثی، ارتفاع خط از سطح زمین ۸.۵ m، فاصله گذاری فازها ($m_1=9.15$)، ($m_2=8.5$) و ($m_3=7.6$)، $I=1000A$.



شکل (۱۶) خط ۲۳۰ کیلوولت، آرایش افقی، ارتفاع خط از سطح زمین ۸.۵ m، فاصله گذاری فازها ($m_1=7.6$)، ($m_2=3.66$) و $I=1000A$.

با توجه به محدودیت‌های اشاره شده روش کاهش فاصله بین فازها یک روش متوسط در کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط می‌باشد. البته فشردن خطوط موجب کوچک‌تر شدن ابعاد و در نتیجه بهینه‌ترین شدن هزینه دکلهای نیز می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مؤثرترین روشهای کاهش میدان مغناطیسی حول خطوط انتقال یعنی روشهای شکافت فاز، شیلد کردن و فشردن خطوط معرفی و با کمک بسته نرم‌افزاری تهیه شده میزان مؤثر بودن آن در کاهش میدان مغناطیسی در مقایسه با آرایش‌های معمول خطوط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش شکافت فاز به سه زیرفاز یا دوزیرفاز مؤثرترین و کارآمدترین روش در کاهش میدان مغناطیسی منتجه در اطراف خطوط انتقال می‌باشد. ضمن آنکه روش شیلد کردن نیز روش مؤثری در کاهش میدان می‌باشد، اما روش فشردن خطوط یک روش متوسط در کاهش میدان می‌باشد. نکته بسیار مهم در انتخاب روش کاهش میدان، میزان کاهش مورد نظر و مسایل فنی و اقتصادی می‌باشد. در این رابطه در کشور ما نیز با گسترش خطوط انتقال فشار قوی در مناطق مسکونی و ساخت و ساز در زیر خطوط انتقال فشارقوی، لزوم در نظر گرفتن طرح‌های کاهش میدان مغناطیسی برای کاهش اثرات سوء بیولوژیک بیش از پیش قابل توجه می‌باشد.

مراجع

- [1] N.Wertheimer, E.Leeper, "Adult Cancer Related to Electrical Wires Near the Home", International Journal of Epidemiology, vol.11, pp.345-355, 1982.
- [2] Bonneville Power Authority "Electrical and Biological Effects of Transmission Line", Portland, Ore :Bonneville Power Authority, 1993.

- [3] Anderson, L. E, "Biological Effects of Extremely Low-Frequency and 60HZ Fields", Biological Effects and Medical Application of Electromagnetic Energy, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1990, pp. 196-235.
- [4] P. S. Maruvada, D. L.Goulet, "Study Population Exposure to Magnetic Field due to Secondary Utilization of Transmission Line Corridors", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, No. 3, July 1995 pp. 1541-1548.
- [5] P.S.Maruvada, "Characterization of Power Frequency Magnetic Field in Different Environments", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 598-606.
- [6] Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, Second Edition, EPRI Report EL-2500, EPRI, Palo Alto, CA, 1982.
- [7] R. D. Begamudre, "Extra High Voltage AC Transmission Engineering", Second Edition, Wiley 1990.
- [8] V. S. Rashkes, R. Lordan, "Magnetic Field Reduction Methods: Efficiency and Cost", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998, pp. 552-559.
- [9] W. T. Kaune, L. E. Zaffanella, "Analysis of Magnetic Fields Produced Far From Electric Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992, pp. 2082-2089.
- [10] A. R. Memari, W. Janischewskyj, "Mitigation of Magnetic Field Near Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1577-1588.
- [11] R. A. Walling, J. J. Parseba, C. W. Burns, "Series Capacitor Compensated Shield Scheme For Enhanced Mitigation of Transmission Line Magnetic Fields", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp.461-469.
- [12] U. Jonsson, A. Larsson, J. O. Sjodin, "Optimized Reduction of The Magnetic Field Near Swedish 400kv Lines by Advanced Control of Shield Wire Currents, Test Results and Economic Evaluation", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.9, No. 2. April 1994. pp. 961-967.
- [13] P.Pettersson, "Reduction of Power System Magnetic Field by Configuration Twist", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, January 1997, pp.1678- 1683.
- [14] Y. Liu, L. E. Zaffanella, "Calculation of Electric Field and Audible Noise form Transmission Lines With Non-Parallel Conductors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp.1492-1497.
- [15] R. G. Olsen, S. L. Backus, R.D.Stearns, "Development and Validation of Software for Predicting ELF Magnetic Fields Near Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995, pp. 1523-1534.
- [16] R. A. Walling, J. J. Parseba, C. W. Burns, "Series Capacitor Compensated Shield Scheme For Enhanced Mitigation of Transmission Line Magnetic Fields", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 461-469.
- [17] U. Jonsson, A. Larsson, J. O. Sjodin, "Optimized Reduction of The Magnetic Field Near Swedish 400kv Lines by Advanced Control of Shield Wire Currents, Test Results and Economic Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp.961-967.
- [18] P. Pettersson, "Principle in Transmission Line Magnetic Field Reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp.1587-1593.